

طراحی کنترل کننده تناسبی - مشتقی برای پایدارسازی زمان محدود شناور زیردریایی خودگردان با شش درجه آزادی با ورودی غیرخطی ناحیه مرده، نامعینی و نویز

محمد پور محمود آقابابا*

دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

شادی آقابابازاده

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

یکی از عوامل مهم به منظور پایدارسازی شناورهای زیردریایی خودگردان در نظر گرفتن غیرخطی‌گری بالای محیط اطراف این سیستم‌ها می‌باشد. در این مقاله، ابتدا پایداری سراسری زمان محدود شناور زیردریایی خودگردان با شش درجه آزادی بدون ورودی غیرخطی بر اساس کنترل کننده زمان محدود تناسبی - مشتقی، ارائه شده است. کنترل کننده مدنظر ساده‌تر بوده و با مدل‌سازی پارامترها سروکار نداشته بنابراین به سهولت قابل اعمال می‌باشد. پایداری سیستم با روش مستقیم لیاپانوف، اصل تغییرناپذیری لاسال و روش همگن هندسی، تضمین شده است. در ادامه پایداری سراسری زمان محدود شناور زیردریایی با ورودی غیرخطی ناحیه مرده، نامعینی و اثرات ناشی از نویز با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف و لم پایداری زمان محدود به اثبات رسیده است. تحلیل‌های نظری پایداری زمان محدود حالات شناور زیردریایی خودگردان را نشان می‌دهند و نتایج تحلیل‌ها توسط شبیه‌سازی تأیید شده است. **واژه‌های کلیدی:** شناور زیردریایی خودگردان، کنترل کننده تناسبی - مشتقی، غیرخطی‌گری ناحیه مرده، کنترل زمان محدود.

Design of Finite – time Proportional- Derivative (AFPD) Controller for Stabilization of Six DOF Autonomous Underwater Vehicle (AUV) with Input Dead- zone Non-Linearity, uncertainty and Noise

M. PourmahmoodAghababa

Department of Electrical Engineering , Urmia University of Technology , Urmia, Iran

Sh. Aghababazadeh

Department of Electrical Engineering , Urmia University of Technology , Urmia, Iran

Abstract

One of the important factors for stabilization of autonomous underwater vehicles (AUV) is considering high nonlinearity of underwater environments. In this paper, firstly global finite-time stability of six DOF autonomous underwater vehicles without input dead-zone non-linearity based on adaptive finite- time proportional-derivative (AFPD) controller is proposed. The proposed controller doesn't refer to the modeling parameter and is much simpler; thus it is readily implemented. Stability of the system is guaranteed by the Lyapunov's direct method, LaSalle's invariance principle and geometric homogeneity techniques. Then global finite- time stability of the system with considering input dead-zone non-linearity, uncertainty and noise based on Lyapunov's direct method and a finite-time stability lemma is proven. Theoretical analysis also shows the finite-time stability of the AUV's states. Analysis results are confirmed via computer simulations.

Keywords: Autonomous underwater vehicle, Proportional- derivative controller, Dead-zone non-linearity, Finite-time control.

متعدد می‌باشند که راندمان و قابلیت اطمینان این کنترل کننده‌ها به میزان بالایی به انواع متفاوت حرکت سیستم زیردریایی وابسته می‌باشد [۳]. در این پژوهش پایدارسازی شناورهای زیردریایی خودگردان مورد مطالعه قرار گرفته که دلایل اصلی انتخاب این نوع شناور عبارتند از: (۱) برخلاف شناورهای دیگر نیاز به اپراتور انسانی ندارند (۲) نیاز به ایستگاه اپراتور انسانی در سطح اقیانوس نداشته و این می‌تواند هزینه کل را در مأموریت‌های دراز مدت کاهش دهد. (۳) یک شناور زیردریایی خودگردان قابلیت برنامه‌ریزی بدون مداخله انسان را در هر شرایط محیطی دارا بوده بنابراین ایستگاه کنترل می‌تواند دور از محیط خشن و غیرقابل پیش‌بینی اقیانوس قرار بگیرد [۲].

مسئله ردیابی مسیر یک شناور زیردریایی خودگردان یک مسئله چالش برانگیز در محیط‌های ناشناخته و پیچیده می‌باشد [۴]. بنابراین پایدارسازی و کنترل پارامترهای زیردریایی در مطالعات گوناگون مورد بحث واقع شده است. Shen و همکاران مطالعه‌ای را در زمینه کنترل نفوذ در آب شناورهای زیردریایی خودگردان بر اساس روش

۱- مقدمه

نیاز به ربات‌های زیردریایی خودگردان به علت نقش مهمی که در اکتشاف نفت و گاز، بازرسی عمق دریا، نقشه‌برداری از اقیانوس، تعمیر و نگهداری خطوط لوله‌کشی، کاربردهای نظامی و علوم دریایی دارند به‌طور گسترده افزایش یافته است. شناورهای زیردریایی خودگردان اجازه دسترسی سریع و کم‌هزینه بشر را به نواحی غیرقابل دسترس داده و باعث حفظ جان بشر در مأموریت‌های خطرناک می‌شوند [۱]. سیستم‌های زیردریایی در سه دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند: (۱) شناور با سرنشین زیر آبی (۲) شناورهای کنترل شده از راه دور (ROV) (۳) شناورهای خودگردان زیر آبی [۲]. سیستم‌های زیردریایی، تجهیزات هوشمند دارای نیروی خودکار با کنترل کننده‌های خودگردان و سنسورهای

IRemotely Operated Vehicle

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.p.aghababa@ee.uut.ac.ir

زمان محدود همراه با ورودی غیرخطی به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته است. تقسیم‌بندی مقاله به این شرح است: در بخش دو مقدمات ریاضی مورد استفاده در طراحی کنترل‌کننده‌ها بیان می‌شود؛ در بخش سه معادلات دینامیکی سیستم شناور زیردریایی خودگردان ارائه می‌شود؛ بخش چهار شامل کنترل‌کننده‌های طراحی شده و اثبات پایداری سراسری زمان محدود سیستم حلقه بسته می‌باشد؛ بخش-های پنج و شش به ترتیب شامل نتایج شبیه سازی و نتیجه‌گیری بوده و در بخش هفت نیز نمادهای به کار گرفته شده نشان داده می‌شود.

۲- مقدمات ریاضی

در این بخش مقدمات ریاضی جهت طراحی کنترل‌کننده بیان می‌شوند. در این راستا ابتدا مفاهیم مربوط به پایداری زمان محدود، همگنی، تابع غیرخطی ناحیه مرده و لم‌های مورد استفاده جهت اثبات پایداری ارائه می‌شوند.

تعریف ۱ (پایداری زمان محدود):
سیستم زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x), \quad f(0) = 0, \quad x \in R^n \quad (1)$$

که در تعریف بالا $f: U_0 \rightarrow R^n$ یک تابع پیوسته در همسایگی باز از U_0 می‌باشد. فرض کنید که این سیستم دارای جواب واحد با هر شرط اولیه ای می‌باشد. نقطه تعادل $x=0$ از این سیستم پایدار زمان محدود محلی است اگر که پایدار لیاپانوف بوده و همگرایی زمان محدود در یک همسایگی $U \subset U_0$ از مبدا را داشته باشد. همگرایی زمان محدود به معنای وجود تابع $T: U \setminus \{0\} \rightarrow (0, \infty)$ است به طوری که $\forall x_0 \in U \subset R^n$ ، جواب سیستم بالا که با $s_t(x_0)$ نشان داده می‌شود در زمان $t \in [0, T(x_0)]$ بصورت $s_t(x_0) \in U \setminus \{0\}$ باشد و $\lim_{t \rightarrow T(x_0)} s_t(x_0) = 0$. اگر $U = R^n$ پایدار زمان محدود سراسری بدست می‌آید [۱۶].

تعریف ۲ (همگنی):

تابع $R \rightarrow R^n$ با $r = (r_1, \dots, r_n) \in R_+^n$ وزن‌های d همگن می‌باشد اگر برای هر $\varepsilon > 0$ داشته باشیم:

$$V(\varepsilon^1 x_1, \dots, \varepsilon^n x_n) = \varepsilon^d V(x), \quad \forall x \in R_+^n \quad (2)$$

میدان برداری f با در نظر گرفتن وزن‌های $r = (r_1, \dots, r_n)$ از درجه d ، همگنی باشد اگر برای همه $1 \leq i < n$ ، امین عضو f یک تابع همگن از درجه $d + r_i$ باشد [۱۶].

لم ۱ [۱۷]: سیستم زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x) + \hat{f}(x), \quad f(0) = 0, \quad \hat{f}(0) = 0, \quad x \in R^n \quad (3)$$

که در این سیستم، $f(x)$ یک میدان برداری پیوسته از درجه $d < 0$ با در نظر گرفتن وزن‌های $r = (r_1, \dots, r_n)$ فرض کنید که $x=0$ یک نقطه تعادل پایدار مجانبی سیستم (۱) باشد. بنابراین $x=0$ یک نقطه تعادل پایدار زمان محدود محلی از سیستم (۳) می‌باشد اگر:

بهبود یافته فعال برطرف کننده اغتشاش انجام دادند. لازم به ذکر است که در این مطالعه ساختار غیرخطی و منسجم شناور زیردریایی خودگردان به سه زیرسیستم مجزا تقسیم شده و برای این سه زیرسیستم مجزا کنترل‌کننده طراحی شده است [۵]. Cui و همکاران کنترل عمق زیردریایی خودکار را با روش حالت لغزشی تطبیقی و با در نظر گرفتن ورودی غیرخطی مورد بحث قرار دادند. در این مورد نیز معادلات دینامیکی شناور زیردریایی خودگردان در فضای سه بعدی به یک مدل دینامیکی مرتبه دوم ساده‌سازی شده و کنترل‌کننده بر اساس مدل ساده‌سازی شده طراحی شده است [۶]. Liu و همکاران به بررسی کنترل ردیابی سیستم زیردریایی با روش غیرخطی برگشتی حالت لغزشی زمان محدود با رویکرد اغتشاش پرداختند [۳]. با این که کنترل‌کننده حالت لغزشی روش جدید مناسبی برای سیستم‌های غیرخطی می‌باشد ولی می‌تواند باعث بروز پدیده Chattering در عملگرها، از بین رفتن انرژی و ایجاد عیب در پره‌های شناور زیردریایی خودگردان بشود [۷]. Mirzaei و همکاران به بررسی پایدارسازی مجانبی سراسری سیستم زیردریایی خودگردان در محیط سه بعدی پرداختند [۸]. در [۹] پایدارسازی نقطه تعادل نسبی یک شناور زیردریایی خودگردان با در نظر گرفتن سه ورودی حرکت غلطشی، حرکت پیچشی و حرکت چرخشی و با احتساب نوسانات فیزیکی انجام شده است. در [۱۰] نیز یک کنترل‌کننده شبکه عصبی تطبیقی برای کنترل ردیابی شناور زیردریایی خودگردان با ورودی غیرخطی طراحی شده است. اما شبکه‌های عصبی دارای برخی نقاط ضعف از جمله همگرایی به یک مدل دقیق با زمان آموزش طولانی و سرعت آهسته می‌باشند که توسط بسیاری از سیستم‌ها قابل قبول نمی‌باشد. در [۱۱] یک کنترل‌کننده بهینه برای نوع خاصی از شناور زیردریایی خودگردان باشش درجه آزادی بر اساس روش رگولاتور خطی درجه دوم طراحی شده است و اثرات ناشی از غیرخطی‌گری در نظر گرفته نشده است. در [۱۲]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۵] به ترتیب از کنترل‌کننده‌های فازی، تناسبی- مشتقی فازی، شبکه عصبی و زمان تاخیری برای کنترل پارامترهای مختلف شناور زیردریایی خودگردان استفاده شده است که در هیچ یک از مطالعات یاد شده اثرات ناشی از نامعینی، نویز و غیرخطی‌گری به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته نشده است.

در این مطالعه ابتدا پایدارسازی زمان محدود شناور زیر دریایی خودگردان با شش درجه آزادی بدون ورودی غیرخطی ناحیه مرده بررسی شده است. بدین منظور یک کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی طراحی شده و پایداری زمان محدود سیستم با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف، اصل تغییرناپذیری لاسال و روش همگن هندسی تضمین شده است. در ادامه ورودی غیرخطی ناحیه مرده به سیستم اعمال شده و کنترل‌کننده مقاوم در برابر غیرخطی، نامعینی و اثرات ناشی از نویز طراحی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی به منظور ارزیابی عملکرد روش مورد نظر آورده شده است. نکته قابل توجه این است که برخلاف مطالعات قبلی، کنترل‌کننده ارائه شده در این مقاله ابتدا یک کنترل‌کننده خطی می‌باشد که دینامیک غیرخطی شناورهای زیردریایی خودگردان استفاده از کنترل‌کننده‌های خطی را برای آنها دشوار کرده است؛ همچنین در سایر روش‌های کنترلی قبلی پایداری

آزادی می‌باشد. این معادلات در حالت کلی بصورت فرمول (۱۰) بیان می‌شوند.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + \Upsilon(p) + \bar{B}(v)u = 0 \quad (10)$$

$$\dot{P} = J(p)v$$

M یک ماتریس 6×6 شامل اینرسی زیردریایی و اینرسی هیدرودینامیکی می‌باشد. بردارهای شش بعدی

$$V = (u \ v \ w \ p \ q \ r)^T \quad (11)$$

$$P = (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi)^T \quad (12)$$

به ترتیب بردار سرعت و بردار موقعیت شناور زیر دریایی می‌باشد که u و v و w ، سرعت‌های خطی سیستم در جهت‌های X و Y و Z و پارامترهای p و q و r ، سرعت‌های زاویه‌ای سیستم در جهت‌های ϕ (غلطش) و θ (پیچش) و ψ (چرخش) می‌باشند. ماتریس C یک ماتریس 6×6 بوده بنابراین Cv بر اساس نظریه سیال‌های ایده‌آل، بردار شامل نیروهای کوریولیس، گریز از مرکز و هیدرودینامیکی است. ماتریس D یک ماتریس 6×6 است که معرف ضرایب میرایی می‌باشد. $\Upsilon(p)$ بردار ۶ بعدی شامل نیروهای تجدیدپذیر و مومنتوم ناشی از جاذبه زمین و نیروی رانشی می‌باشد. $\bar{B}(v)$ ماتریس ورودی کنترلی است که یک ماتریس 6×6 قطری و معکوس پذیر فرض می‌شود. J نیز ماتریس ژاکوبین تبدیل بین مختصات بدنی و زمینی می‌باشد که در شکل ۲ و روابط ریاضی (۱۵-۱۳) نشان داده شده است [۲۰].

$$J = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} = \begin{pmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\psi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$E = \begin{pmatrix} 1 & s\phi s\theta/c\theta & c\phi s\theta/c\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

که در عبارت های مذکور داریم: $c(.) = \cos(.)$, $s(.) = \sin(.)$. با انتخاب $x_1 = p$ و $x_2 = v$ برای معادله فضای حالت داریم:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u \quad (17)$$

$$f(x) = \begin{pmatrix} J(p)v \\ M^{-1}[-C(v)v - D(v)v - \Upsilon(p)] \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$B(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ -M^{-1}\bar{B}(v) \end{pmatrix}_+ \quad (19)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\hat{f}_i(e^{t_1} x_1, \dots, e^{t_n} x_n)}{e^{d+t_1}} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad \forall x \neq 0 \quad (4)$$

لم [۱۷]: پایداری مجانبی سراسری و پایداری زمان محدود محلی، پایداری زمان محدود سراسری را نتیجه می‌دهد.

لم [۱۸]: فرض کنید که تابع پیوسته و مثبت معین $V(t)$ شرایط (۵) را ارضا کند:

$$\dot{V}(t) \leq -pV'(t) \quad \forall t \geq 0, V(0) \geq 0 \quad (5)$$

که $0 < p < 1$ از ثوابت هستند که در نامعادله (۶) صدق می‌کنند:

$$V^{1-s}(t) \leq V^{1-s}(0) - p(1-s)V(t), \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (6)$$

که $t_1 \equiv 0 \quad \forall t \geq t_1$ بصورت رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$t_1 = \frac{V^{1-s}(0)}{p(1-s)} \quad (7)$$

تابع غیرخطی ناحیه مرده:

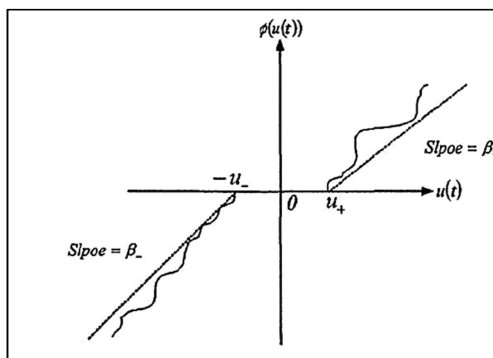
این تابع با توجه به [۱۹] بصورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$\varphi(u_i) = \begin{cases} \varphi(u_i(t) - u_{+i}), & u_i(t) > u_{+i}, \\ 0, & u_{-i} \leq u_i(t) \leq u_{+i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \\ \varphi(u_i(t) + u_{-i}), & u_i(t) < -u_{-i}, \end{cases} \quad (8)$$

ورودی غیرخطی $\varphi(u_i)$ در خارج از ناحیه مرده با تفرانس بهره کاهشی β_{-i} و β_{+i} دارای رابطه (۹) می‌باشد:

$$\begin{cases} (u_i(t) - u_{+i})\varphi(u_i) \geq \beta_{+i} (u_i(t) - u_{+i})^2, \\ u_i(t) > u_{+i}, \\ (u_i(t) + u_{-i})\varphi(u_i) \geq \beta_{-i} (u_i(t) + u_{-i})^2, \\ u_i(t) < -u_{-i}, \end{cases} \quad (9)$$

یک نمونه از تابع غیرخطی $\varphi(u_i)$ که شرایط (۸) و (۹) را ارضا می‌کند در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- تابع غیرخطی ناحیه مرده [۱۹]

۳- معادلات دینامیکی سیستم

معادلات دینامیکی حاکم بر یک شناور زیردریایی خودگردان بر اساس مدل ارائه شده در [۲۰]، با در نظر گرفتن حرکت‌های انتقالی و دورانی و در فضای سه بعدی بدست می‌آید. بنابراین سیستم دارای شش درجه

$$\dot{V} = v^T (-C(v)v - D(v)v - J^T(p)k_1 \text{Sig}^{\alpha_1}(p) - k_2 \text{Sig}^{\alpha_2}(v)) + (J(p)v)^T k_1 \text{Sig}^{\alpha_1}(p) \quad (25)$$

در نهایت با ساده سازی رابطه (25) داریم :

$$\dot{V} = v^T (-C(v)v - D(v)v - k_2 \text{Sig}^{\alpha_2}(v)) \quad (26)$$

از آنجا که طبق [21]، $v^T C(v)v > 0$ و $v^T D(v)v = 0$ ، بنابراین داریم :

$$\dot{V} \leq -k_2 \text{Sig}^{\alpha_2}(v) \quad (27)$$

با توجه به اینکه \dot{V} یک تابع منفی معین می باشد بنابراین طبق اصل لاسال می توان نتیجه گرفت که مبدأ پایدار مجانبی سراسری می باشد.

مرحله دوم: اثبات پایداری زمان محدود محلی

معادله فضای حالت سیستم حلقه بسته با انتخاب $p = x_2$ و $v = x_2$ بصورت زیر می باشد :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= J(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= -M^{-1}[C(x_2)x_2 + D(x_2)x_2 + J^T(x_1)k_1 \text{sig}^{\alpha_1}(x_1) + k_2 \text{sig}^{\alpha_2}(x_2)] \end{aligned} \quad (28)$$

که معادله سیستم (28) در $x = 0$ دارای نقطه تعادل بوده ولی همگن نمی باشد، بنابراین برای استفاده از لم 1 باید بصورت رابطه (29) بازنویسی شود :

$$\dot{x}_1 = J(0)x_2 + \hat{f}_1(x) \quad (29)$$

$$\dot{x}_2 = -M^{-1}[J^T(0)k_1 \text{sig}^{\alpha_1}(x_1) + k_2 \text{sig}^{\alpha_2}(x_2)] + \hat{f}_2(x)$$

که در این رابطه داریم :

$$\begin{cases} \hat{f}_1(x) = \bar{J}(x_1)x_2 \\ \hat{f}_2(x) = -M^{-1}[C(x_2)x_2 + D(x_2)x_2 + \bar{J}^T(x_1)k_1 \text{sig}^{\alpha_1}(x_1)] \end{cases} \quad (30)$$

$$\bar{J}(x_1) = J(x_1) - J(0), \quad \bar{J}(x_1) \in R^{6 \times 6} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = J(0)x_2 \\ \dot{x}_2 = -M^{-1}[J^T(0)k_1 \text{sig}^{\alpha_1}(x_1) + k_2 \text{sig}^{\alpha_2}(x_2)] \end{cases} \quad (32)$$

بنابراین سیستم (32) با درجه $d = \alpha_1 - 1 < 0$ و با توجه به وزن های $r_{1i} = r_1 = 2$ ، $r_{2i} = r_2 = \alpha_1 + 1$ که $(r_{1i}, r_{2i}), (i = 1, \dots, 6)$ همگن می باشد. حال با در نظر گرفتن تابع کاندیدای لیاپانوف برای سیستم (32) بصورت رابطه (33) داریم :

$$V^* = \frac{1}{2} x_2^T M x_2 + \frac{1}{(\alpha_1 + 1)} \sum_{i=1}^6 k_{1i} |x_{2i}|^{\alpha_1 + 1} \quad (33)$$

مشابه مرحله 1 داریم :

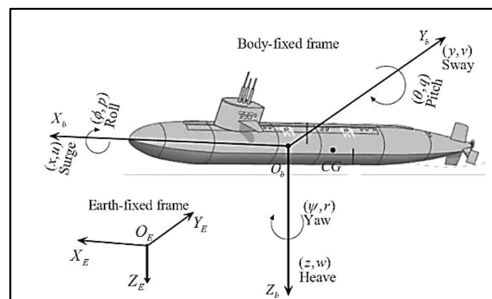
$$(\dot{V}^*) \leq -k_2 \text{Sig}^{\alpha_2}(x_2) \quad (34)$$

بنابراین معادله سیستم (32) پایدار مجانبی سراسری می باشد. حال با استفاده از لم 1 و با در نظر گرفتن رابطه (35) داریم.

$$\bar{J}(\mathcal{E}^\eta x_1) \equiv J(\mathcal{E}^\eta x_1) - J(0) \equiv 0(\mathcal{E}^\eta) \quad (35)$$

برای هر نقطه ثابت $x = (x_1^T \ x_2^T)^T \in R^{12}$ می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \lim_{\mathcal{E} \rightarrow 0} \frac{\hat{f}_1(\mathcal{E}^\eta x_1, \mathcal{E}^{\alpha_2} x_2)}{\mathcal{E}^{d+\eta}} &= \\ \lim_{\mathcal{E} \rightarrow 0} \frac{\bar{J}(\mathcal{E}^\eta x_1)(\mathcal{E}^{\alpha_2} x_2)}{\mathcal{E}^{d+\eta}} &= \\ \lim_{\mathcal{E} \rightarrow 0} (\mathcal{E}^{-d}) \mathcal{E}^{\alpha_2} x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (36)$$



شکل ۲- مختصات زمینی و بدنی سیستم AUV [8]

۴- طراحی کنترل کننده

در این بخش ابتدا کنترل کننده تناسبی-مشتقی با ورودی خطی برای معادلات سیستم شناور زیردریایی خودگردان با بهره گیری از مقدمات ریاضی بیان شده، طراحی می شود. سپس با اعمال ورودی غیرخطی ناحیه مرده پایداری سیستم بررسی می شود.

۴-۱- طراحی کنترل کننده تناسبی-مشتقی با ورودی خطی

قضیه 1:

با اعمال کنترل کننده خطی (20) معادلات سیستم حلقه بسته شناور زیردریایی خودگردان (10) حول مبدأ به پایداری زمان محدود سراسری می رسند.

$$U = \bar{B}(v)^{-1} (J^T(p)k_1 \text{Sig}^{\alpha_1}(p) + k_2 \text{Sig}^{\alpha_2}(v) - \Upsilon(p)) \quad (20)$$

که در عبارت کنترلی بالا k_1 و k_2 ماتریس های کنترلی قطری و مثبت معین می باشند و بردار $\text{Sig}^\alpha(a)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Sig}^\alpha(a) = [|a_1|^\alpha \text{sgn}(a_1), |a_2|^\alpha \text{sgn}(a_2), |a_3|^\alpha \text{sgn}(a_3), \dots, |a_6|^\alpha \text{sgn}(a_6)]^T, \quad a \in R^6 \quad (21)$$

اثبات:

اثبات شامل دو مرحله می باشد: مرحله اول اثبات پایدار مجانبی سراسری با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف و مرحله دوم اثبات پایداری زمان محدود محلی با استفاده از لم 1 و 2 می باشد.

مرحله اول: اثبات پایدار مجانبی سراسری

تابع کاندیدای لیاپانوف بصورت رابطه (22) در نظر گرفته میشود :

$$V = \frac{1}{2} v^T M v + \frac{1}{\alpha_1 + 1} \sum_{i=1}^6 k_{1i} |p_i|^{\alpha_1 + 1} \quad (22)$$

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف داریم :

$$\dot{V} = v^T M \dot{v} + \dot{p}^T k_1 \text{Sig}^{\alpha_1}(p) \quad (23)$$

با جایگذاری ورودی کنترلی (20) در (23) داریم :

$$\dot{V} = v^T M (M^{-1} (-C(v)v - D(v)v - \Upsilon(p) - \bar{B}(v)u) + (J(p)v)^T k_1 \text{Sig}^{\alpha_1}(p)) \quad (24)$$

با در نظر گرفتن روابط (17) تا (20) برای رابطه (24) داریم :

$$k_i = \frac{1}{|b_i|} (|\Upsilon_i(p)| + \delta_1 + \delta_2) + \frac{|\eta_i| |k_{ii} \text{sig}^{\alpha_1}(p)|}{|\zeta_i|} + \frac{\sqrt{\frac{1}{2} x_{2i}^T M x_{2i} + \frac{1}{\alpha_1 + 1} k_{ii} |x_{2i}|^{\alpha_1 + 1}}}{|\zeta_i|} \quad (44)$$

در کنترل کننده طراحی شده زمانی که $v_i = 0$ آنگاه $k_i = 0$ می-شود. اثبات: تابع کاندیدای لیپانوف به فرم (45) در نظر گرفته می-شود.

$$V = \frac{1}{2} v^T M v + \frac{1}{\alpha_1 + 1} \sum_{i=1}^6 k_{ii} |p_i|^{\alpha_1 + 1} \quad (45)$$

با مشتق گیری از تابع لیپانوف داریم:

$$\dot{V} = v^T M \dot{v} + \dot{p}^T k_i \text{Sig}^{\alpha_1}(p) \quad (46)$$

$$\dot{V} = v^T M (M^{-1}(-C(v)v - D(v)v - \Upsilon(p) - \tilde{B}(v)u) + (J(p)v)^T k_i \text{Sig}^{\alpha_1}(p)) \quad (47)$$

از آنجا که طبق [21]، $v^T C(v)v = 0$ و $v^T D(v)v > 0$ پس داریم: $\dot{V} \leq \|v^T \Upsilon(p)\| - v^T \tilde{B}(v) \varphi(u_i) + \|(J(p)v)^T k_i \text{Sig}^{\alpha_1}(p)\|$ (48) با تبدیل عبارت (48) به صورت اسکالر داریم:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^6 |v_i| |\Upsilon_i(p)| + |\eta_i| |k_{ii} \text{sig}^{\alpha_1}(p)| - \zeta_i \varphi_i \quad (49)$$

با توجه به روابط (41) و (49) برای $\zeta_i > 0$ و $u_i(t) > u_{+i}$ داریم:

$$(u_i(t) - u_{+i}) \varphi(u_i) = \rho_i k_i \varphi(u_i) \geq \beta_{+i} (\rho_i k_i)^2 \geq \beta_i (\rho_i k_i)^2 = \rho_i k_i^2 \quad (50)$$

با ضرب طرفین رابطه (50) در $\zeta_i > 0$ داریم:

$$-\zeta_i \varphi_i \leq -k_i |\zeta_i| \quad (51)$$

با توجه به روابط (41) و (49) برای $\zeta_i < 0$ و $u_i(t) < -u_{-i}$ داریم:

$$(u_i(t) + u_{-i}) \varphi(u_i) = -\rho_i k_i \varphi(u_i) \geq \beta_{-i} (\rho_i k_i)^2 \geq \beta_i (\rho_i k_i)^2 = \rho_i k_i^2 \quad (52)$$

با ضرب طرفین رابطه (52) در $\zeta_i < 0$ داریم:

$$-\zeta_i \varphi_i \leq -k_i |\zeta_i| \quad (53)$$

با توجه به روابط (50) و (52) برای مشتق تابع لیپانوف داریم:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^6 |\zeta_i| + \sqrt{\frac{1}{2} x_{2i}^T M_i x_{2i} + \frac{1}{\alpha_1 + 1} k_{ii} |x_{2i}|^{\alpha_1 + 1}} \quad (54)$$

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^6 \sqrt{\frac{1}{2} x_{2i}^T M_i x_{2i} + \frac{1}{\alpha_1 + 1} k_{ii} |x_{2i}|^{\alpha_1 + 1}} \quad (55)$$

$$\dot{V} \leq -V^{\frac{1}{2}} \quad (56)$$

در نتیجه با استفاده از لم 3 پایداری زمان محدود سیستم شناور زیردریایی خودگردان با ورودی کنترلی ناحیه مرده تضمین می-شود.

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\hat{f}_1(\varepsilon^{\tau_1} x_1, \varepsilon^{\tau_2} x_2)}{\varepsilon^{d+\tau_1}} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{-M^{-1}(C(\varepsilon^{\tau_2} x_2)(\varepsilon^{\tau_2} x_2))}{\varepsilon^{d+\tau_2}} + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{D(\varepsilon^{\tau_2} x_2)(\varepsilon^{\tau_2} x_2) + \tilde{J}^T(\varepsilon^{\tau_1} x_1) k_i \text{sig}^{\alpha_1}(\varepsilon^{\tau_1} x_1)}{\varepsilon^{d+\tau_2}} = \quad (37)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} -\varepsilon^{-d} M^{-1}(C(\varepsilon^{\tau_2} x_2)(x_2) + D(\varepsilon^{\tau_2} x_2)(x_2)) -$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} M^{-1} 0(\varepsilon^{\tau_1 - d - \tau_2}) k_i \text{sig}^{\alpha_1}(\varepsilon^{\tau_1} x_1) = 0$$

حال با توجه به روابط (36) و (37) و $0 < \alpha_1 < 1$ ، $-d - \tau_2 = 2(1 - \alpha_1) > 0$ ، $r_2 = \alpha_1 + 1 > 0$ ، $-d - \tau_2 = 2(1 - \alpha_1) > 0$ برای $0 < \alpha_1 < 1$ پایداری زمان محدود محلی فراهم می-شود و با توجه به لم 2 و اثبات های مرحله 1 و 2 پایداری زمان محدود سراسری فراهم می-شود.

4-2- طراحی کنترل کننده با ورودی غیرخطی ناحیه مرده، نامعینی و اثرات ناشی از نویز

معمولاً یک ورودی خطی ناحیه مرده در محرک های سیستم های فیزیکی وجود دارد. در یک شناور زیردریایی خودگردان نیز سکان شناور در معرض غیرخطی گری ناحیه مرده قرار دارد که می-تواند منجر به ایجاد مشکل در عملکرد سیستم شده و دقت کنترل را کاهش دهد و حتی موجب ناپایداری شود؛ لذا در بیشتر اجزای فیزیکی سیستم های کنترلی در نظر گرفتن این ورودی غیرخطی و طراحی کنترل کننده مقاوم در برابر آن یک امر ضروری می-باشد. برای طراحی کنترل کننده مقاوم در برابر غیرخطی، نامعینی و اثرات ناشی از نویز از قضیه زیر بهره می-گیریم.

با در نظر گرفتن اثرات ناشی از نامعینی و نویز معادله فضای حالت (18) بصورت (38) بازنویسی می-شود:

$$\dot{f}(x) = \begin{bmatrix} J(p)v \\ M^{-1}[-C(v)v + D(v)v + \Upsilon(p) + \Delta f + n(t)] \end{bmatrix} \quad (38)$$

که در این معادله Δf و $n(t)$ بترتیب بردارهای نامعینی و نویز بوده و بصورت (39) و (40) می-باشند:

$$\Delta f = [\Delta f_1 \Delta f_2 \dots \Delta f_6]^T, \quad \|\Delta f\| \leq \delta_1 \quad (39)$$

$$n(t) = [n_1(t) n_2(t) \dots n_6(t)]^T, \quad \|n(t)\| \leq \delta_2 \quad (40)$$

که δ_1 و δ_2 کران های ثابت و مثبت معلوم می-باشند.

قضیه 2:

حالات سیستم (10) با در نظر گرفتن قوانین کنترلی (41) و ورودی غیرخطی ناحیه مرده در مدت زمان محدود $t_1 = 2(V(0))^{1/2}$ به پایداری می-رسند.

$$U_i = \begin{cases} -\rho_i k_i - u_{-i}, & \zeta_i < 0 \\ 0, & \zeta_i = 0 \\ \rho_i k_i + u_{+i}, & \zeta_i > 0 \end{cases} \quad (41)$$

که در ورودی کنترلی داریم:

$$\beta_i = \min\{\beta_{+i}, \beta_{-i}\}, \rho_i = \frac{1}{\beta_i}, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (42)$$

که برای k_i و ζ_i داریم:

$$\zeta_i = v^T \tilde{B}(v) = [\zeta_1, \dots, \zeta_6] = [b_1 v_1, \dots, b_6 v_6] \quad (43)$$

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش کنترل کننده های ارائه شده در دو مثال جداگانه ، در محیط Matlab و Simulink شبیه سازی شده و نتایج بررسی می شوند. مثال ۱: در این مثال رفتار شناور زیر دریایی خودگردان با ورودی کنترلی خطی (۲۰) بررسی می شود.

مثال ۲: در این مثال رفتار شناور سیستم به ازای ورودی غیر خطی ناحیه مردهو با استفاده از کنترل کننده (۴۱) بررسی شده است. بدین منظور ورودی غیر خطی بصورت رابطه (۵۷) در نظر گرفته شده است :

$$\varphi(u_i) = \begin{cases} 0.01 \sin(u_i)(u_i+0.5), & u_i(t) < -0.5 \\ 0, & -0.5 \leq u_i(t) \leq 0.5 \\ (1-\cos(u_i))(u_i-0.5), & u_i(t) > 0.5 \end{cases} \quad (57)$$

$i=1,2,\dots,6$

ماتریس اینرسی بصورت قطری فرض شده است:

$$M = \text{diag} [m - X_u, m - Y_v, m - Z_w, I_x - K_p, I_y - M_q, I_z - M_r] \quad (58)$$

که $X_u = -30 \text{kg}$ ، $I_y = 29 \text{kgm}^2$ ، $I_x = 25 \text{kgm}^2$ ، $m = 185 \text{kg}$ و $M_q = -20 \text{kgm}^2$ ، $K_p = -15 \text{kgm}^2$ ، $Y_v = -110 \text{kg}$ می باشد. $N_r = -1 \text{kgm}^2$

ماتریس D قطری فرض شده و به صورت رابطه (۵۹) تعریف می شود :

$$D(v) = \text{diag} [80+120|u|, 110+200|v|, 100+150|w|, 30+50|p|, 40+40|q|, 10+15|r|] \quad (59)$$

ماتریس C نیز صفر فرض می شود.

بردار $Y(p)$ بصورت رابطه (۶۰) تعریف می شود :

$$Y(p) = [0 \ 0 \ 0 \ z_B Bc \theta s \phi \ z_B B s \theta \ 0]^T \quad (60)$$

که در آن $B = 1800 \text{N}$ و $z_B = 0.04 \text{m}$ می باشد.

ماتریس ورودی کنترلی B بصورت قطری زیر در نظر گرفته می شود :

$$B = \text{diag} [0.04, 0.04, 0.21, 0.02, 0.43, 0.43] \quad (61)$$

ماتریس های ثابت در کنترل کننده با استفاده از سعی و خطا بگونه ای به دست می آیند که کمترین نوسان ممکن حول مبدأ را داشته باشیم :

$$k_1 = \text{diag} [0.05, 0.04, 0.025, 0.01, 0.05, 0.01] \quad (62)$$

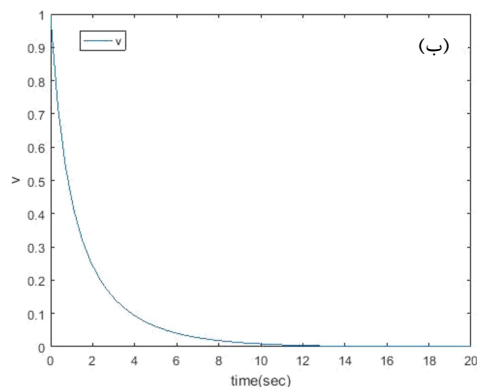
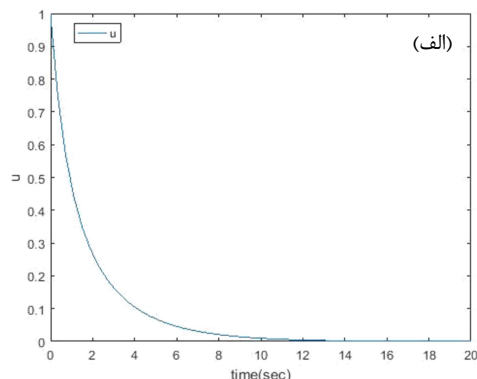
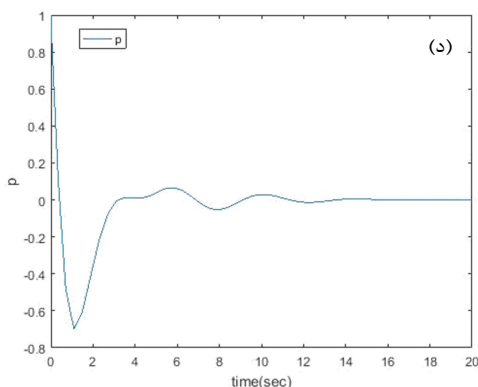
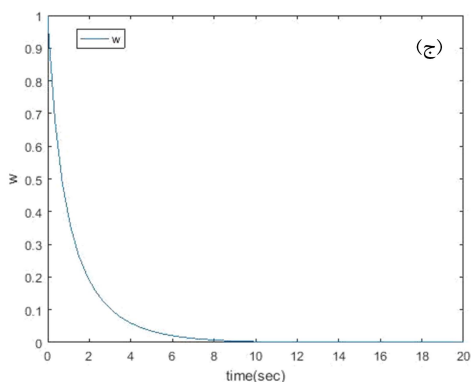
$$k_2 = \text{diag} [0.04, 0.05, 0.025, 0.02, 0.1, 0.3]$$

بردارهای نامعینی و نویز نیز بصورت رابطه (۶۳) تعریف می شوند:

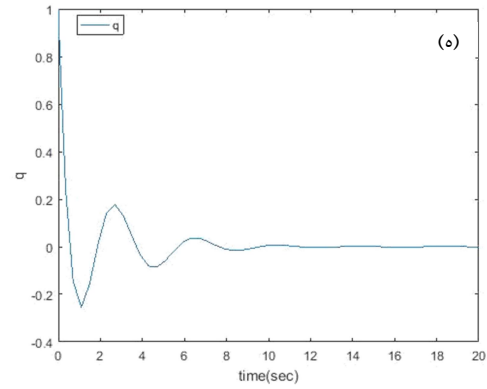
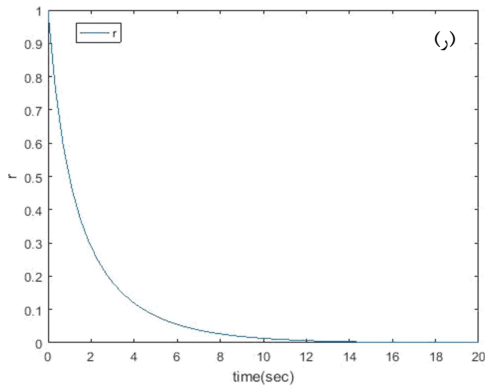
$$\Delta f_i = 0.1 \sin(2x_{2i}) \quad i=1,2,\dots,6$$

$$n_i(t) = 0.1 \sin(2t) \quad (63)$$

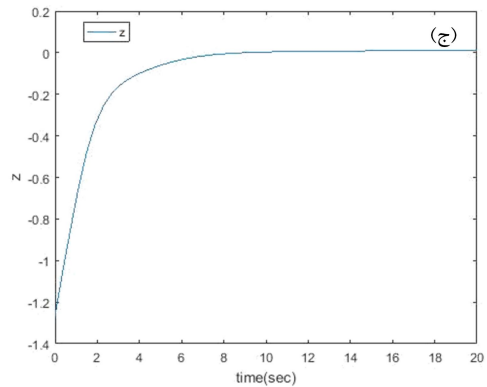
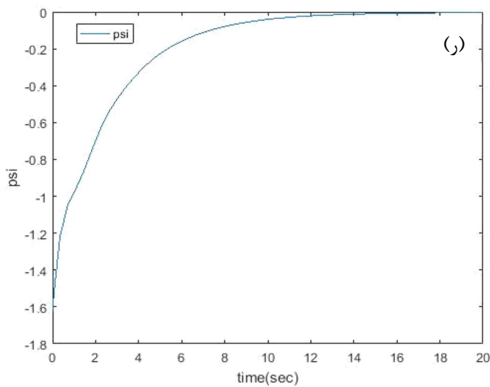
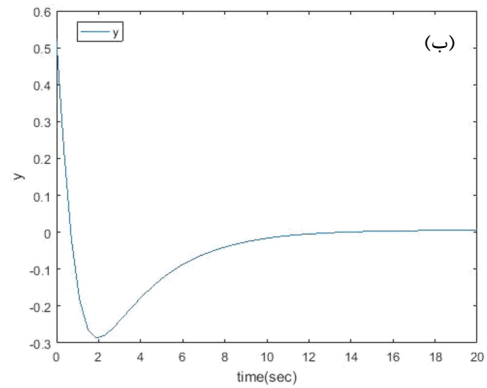
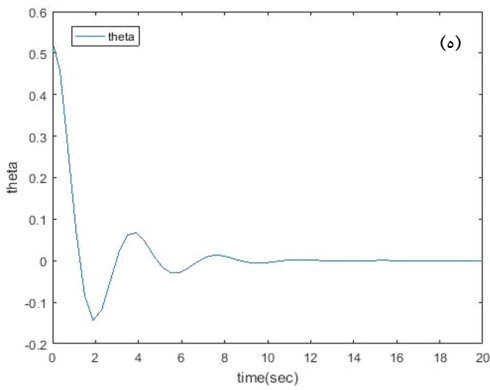
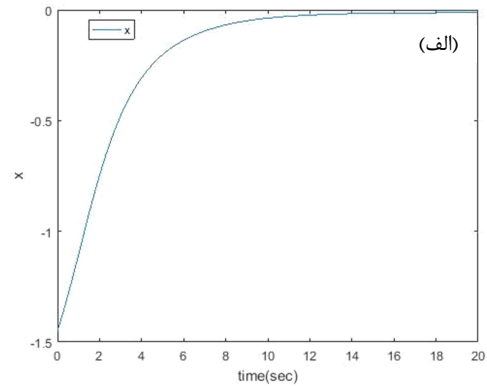
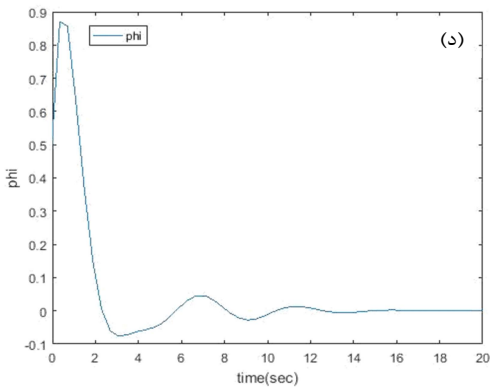
با استفاده از مقادیر ارائه شده در این بخش برای کنترل کننده (۲۰) و سیستم (۱۰) نتایج شبیه سازی در شکل های ۳، ۴، ۵ و ۶ آمده است.



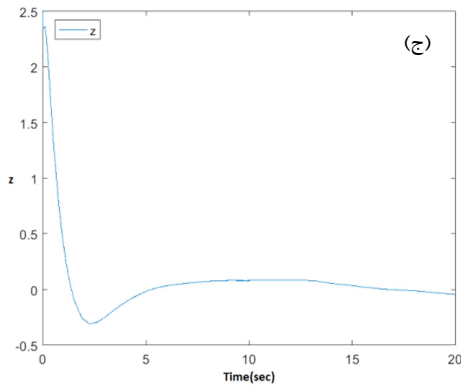
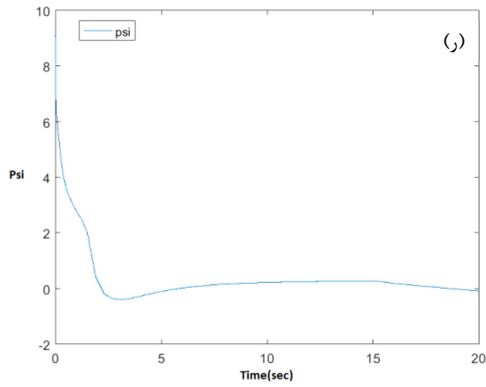
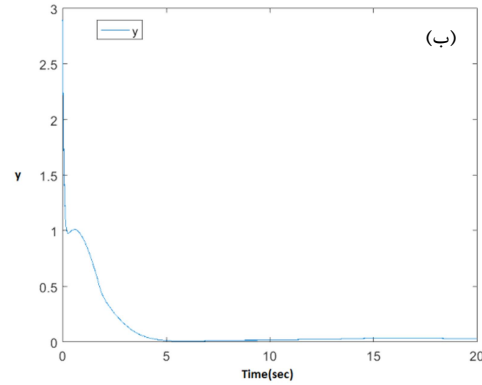
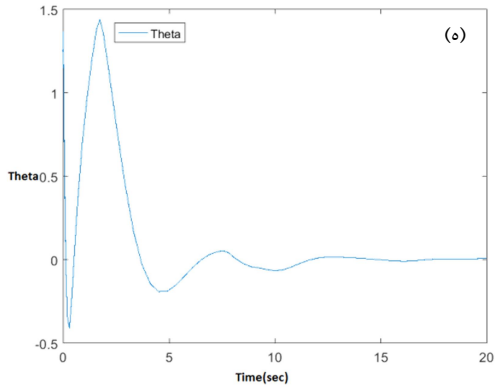
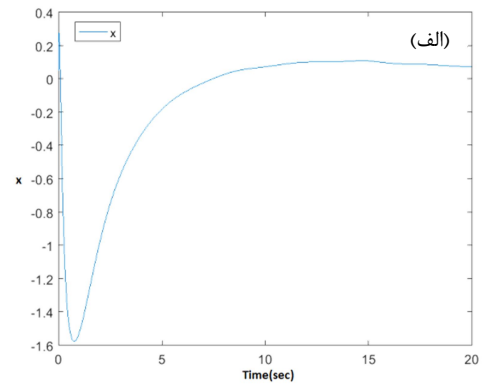
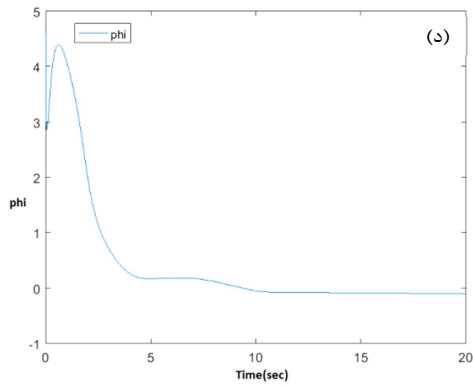
(د)



شکل ۳- پایداری زمان محدود پارامترهای بردار v در مبدأ به ازای کنترل کننده خطی
 (الف) پارامتر u (ب) پارامتر v (ج) پارامتر w (د) پارامتر p (ه) پارامتر q (ر) پارامتر r

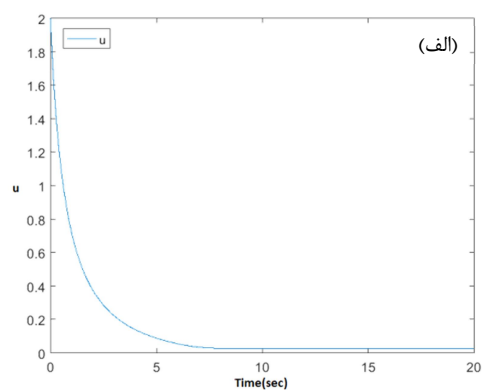
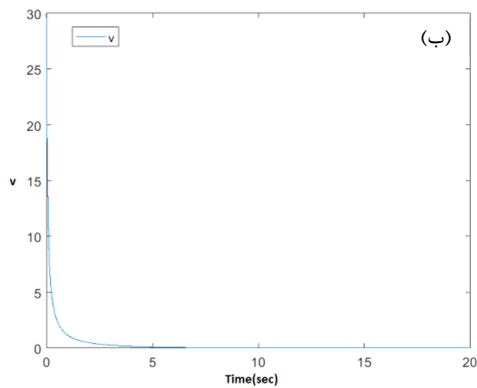


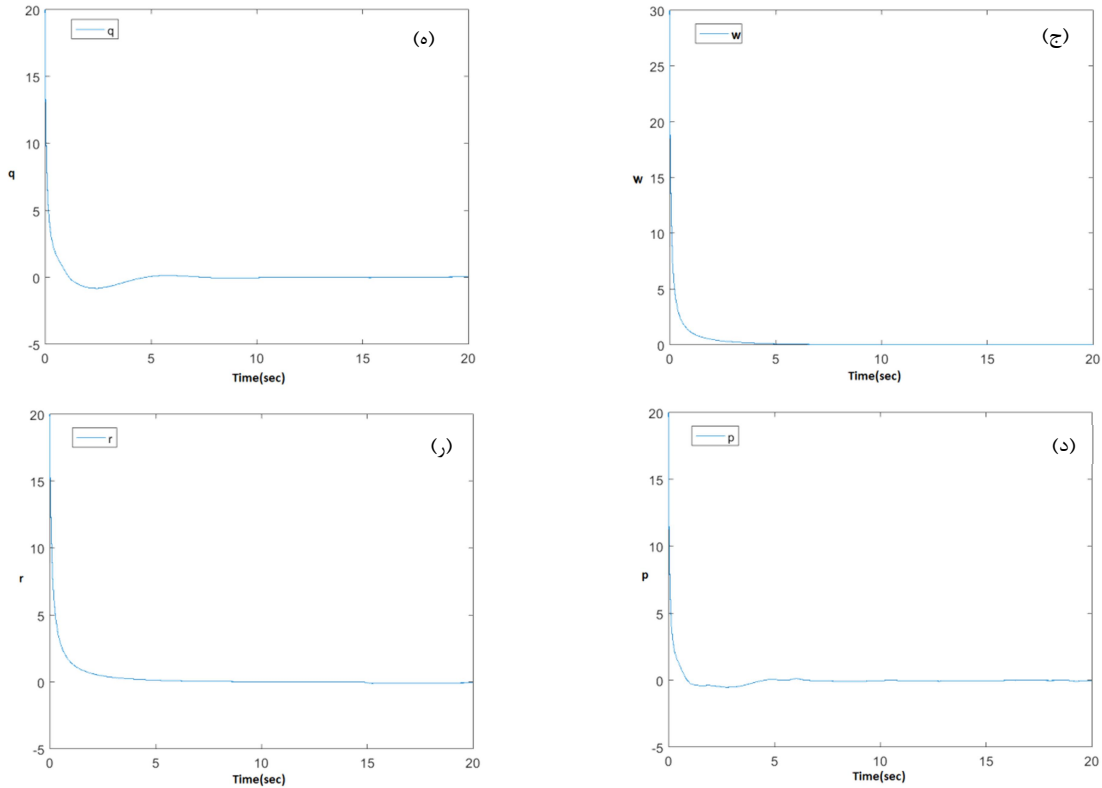
شکل ۴- پایداری زمان محدود پارامترهای بردار p حول مبدأ به ازای کنترل کننده خطی
 (الف) پارامتر x (ب) پارامتر y (ج) پارامتر z (د) پارامتر ϕ (ه) پارامتر θ (ر) پارامتر ψ



شکل ۵- پایداری زمان محدود پارامترهای بردار p حول مبدأ به ازای کنترل کننده غیرخطی ناحیه مرده، نامعینی و اغتشاش

(الف) پارامتر x (ب) پارامتر y (ج) پارامتر z (د) پارامتر ϕ (ه) پارامتر θ (ز) پارامتر ψ





شکل ۶- پایداری زمان محدود پارامترهای بردار V در مبدأ به ازای کنترل کننده غیر خطی ناحیه مرده، نامعینی و اغتشاش
الف) پارامتر u (ب) پارامتر v (ج) پارامتر w (د) پارامتر p (ه) پارامتر q (ر) پارامتر r

اعمال می‌باشد. آنالیز پایداری و نتایج شبیه‌سازی، کارایی روش ارائه شده را نشان می‌دهد. مسئله طراحی کنترل کننده برای شناور زیر دریایی خودگردان به علت اغتشاشات بالا، نامعینی‌ها و غیرخطی‌گری‌های محیط دریا مسئله چالش برانگیزی است که در مطالعات آینده پیاده سازی کنترل کننده طراحی شده توسط ادوات الکترونیکی و اعمال کنترل کننده پیشنهادی روی سایر سیستم‌های مکانیکی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پایداری پارامترهای بردارهای p و v را در مدت زمان محدود کمتر از ۱۰ ثانیه، به ازای کنترل کننده تناسبی-مشتقی خطی را نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودارها قابل مشاهده می‌باشد تمامی حالات سیستم شناور زیر دریایی خودگردان حول مبدأ به پایداری سراسری رسیده‌اند. در شکل‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب پایداری پارامترهای بردارهای p و v در مدت زمان محدود کمتر از ۱۰ ثانیه، به ازای کنترل کننده غیرخطی ناحیه مرده قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت نیز تمامی حالات سیستم در مبدأ پایدار سراسری شده‌اند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا یک کنترل کننده تناسبی-مشتقی خطی برای پایدارسازی زمان محدود سیستم شناور زیر دریایی خودگردان ارائه شد؛ سپس با اعمال ورودی غیرخطی ناحیه مرده کنترل کننده مقاوم در مقابل غیرخطی ارائه شد. در هر دو کنترل کننده تمام حالت‌های سیستم شناور زیر دریایی خودگردان در کمتر از ۱۰ ثانیه، حول مبدأ به پایداری رسیدند. مزیت کنترل کننده ارائه شده در این مقاله این است که ساده بوده و به تغییر پارامترهای مدلسازی حساس نبوده و به راحتی قابل

۷- نمادها

m	جرم (kg)
I_x	مومنوم اینرسی در جهت X (kgm^2)
I_y	مومنوم اینرسی در جهت y (kgm^2)
I_z	مومنوم اینرسی در جهت Z (kgm^2)
X_{ii}	اینرسی اضافی هیدرودینامیکی U (kgm^2)
Y_{ii}	اینرسی اضافی هیدرودینامیکی V (kgm^2)
Z_{ii}	اینرسی اضافی هیدرودینامیکی W (kgm^2)

[15] Kim, J., et al., *Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016. 63(2): p.p 1052-1061.

[16] Su, Y. and C. Zheng, *Simple nonlinear proportional-derivative control for global finite-time stabilization of spacecraft*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014. 38(1): p.p 173-178.

[17] Hong, Y., Y. Xu, and J. Huang, *Finite-time control for robot manipulators*. Systems & control letters, 2002. 46(4): p.p 243-253.

[18] Wang, S., et al. *Nonlinear path following of autonomous underwater vehicle considering uncertainty*. in *Underwater Technology (UT), 2017 IEEE*. 2017. IEEE.

[19] Aghababa, M.P., *Adaptive control for electromechanical systems considering dead-zone phenomenon*. Nonlinear Dynamics, 2014. 75(1-2): p.p 157-174.

[20] Spangelo, I. and O. Egeland. *Generation of energy-optimal trajectories for an autonomous underwater vehicle*. in *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*. 1992. IEEE.

[21] Fossen, T.I., *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*: John Wiley & Sons. 2011.

$(kgm^2) p$	اینرسی اضافی هیدرودینامیکی	K_p
$(kgm^2) q$	اینرسی اضافی هیدرودینامیکی	M_q
	طول مرکز ثقل (m)	Z_B
X و Y و Z	بردار سرعت‌های خطی در جهت‌های X و Y و Z	(u, v, w)
φ و θ و ψ	بردار سرعت‌های زاویه‌ای در جهت‌های φ و θ و ψ	(p, q, r)
	بردار نیروهای کوریولیس و هیدرودینامیکی	Cv
	ماتریس معرف ضرایب میرایی	D
	ماتریس ژاکوبین تبدیل مختصات بدنی به زمینی	J
	بردار نیروهای تجدیدپذیر و ممنوتوم جاذبه زمین	$\gamma(p)$
	ماتریس کنترلی ورودی	$\tilde{B}(v)$
	ماتریس اینرسی زیردریایی و اینرسی هیدرودینامیکی	M

طراحی کنترل کننده تانسی- مشتی برای پایدارسازی ..

۸- مراجع

[1] Rezaadegan, F., et al., *A novel approach to 6-DOF adaptive trajectory tracking control of an AUV in the presence of parameter uncertainties*. Ocean Engineering, 2015. 107: p.p 246-258.

[2] Tang, S.C., *Modeling and simulation of the autonomous underwater vehicle*. Autolycus, 1999, Massachusetts Institute of Technology.

[3] Liu, S., Y. Liu, and N. Wang, *Nonlinear disturbance observer-based backstepping finite-time sliding mode tracking control of underwater vehicles with system uncertainties and external disturbances*. Nonlinear Dynamics: p.p 1-12.

[4] Ge, Z., et al. *Modeling and diving control of a vector propulsion AUV*. in *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2016 IEEE International Conference on*. 2016. IEEE.

[5] Shen, Y., et al., *Diving control of Autonomous Underwater Vehicle based on improved active disturbance rejection control approach*. Neurocomputing, 2016. 173: p.p 1377-1385.

[6] Cui, R., X. Zhang, and D. Cui, *Adaptive sliding-mode attitude control for autonomous underwater vehicles with input nonlinearities*. Ocean Engineering, 2016. 123: p.p 45-54.

[7] Khodayari, M.H. and S. Balochian, *Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller*. Journal of Marine Science and Technology, 2015. 20(3): p.p 559-578.

[8] Mirzaei, M., F. Abdollahi, and N. Meskin. *Global stabilization of autonomous underactuated underwater vehicles in 3D space*. in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016 IEEE International Conference on*. 2016. IEEE.

[9] Niu, H. and Z. Geng. *Stabilization of an underactuated AUV with physical damping on SE (3) via SIDA method*. in *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*. 2016. IEEE.

[10] Cui, R., et al., *Adaptive neural network control of AUVs with control input nonlinearities using reinforcement learning*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017.

[11] Yao, X., G. Yang, and Y. Peng, *Nonlinear Reduced-Order Observer-Based Predictive Control for Diving of an Autonomous Underwater Vehicle*. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2017.

[12] Yu, C., et al., *Nonlinear guidance and fuzzy control for three-dimensional path following of an underactuated autonomous underwater vehicle*. Ocean Engineering, 2017. 146: p.p 457-467.

[13] Londhe, P., et al., *Robust task-space control of an autonomous underwater vehicle-manipulator system by PID-like fuzzy control scheme with disturbance estimator*. Ocean Engineering, 2017. 139: p.p 1-13.

[14] Shojaei, K., *Neural network formation control of underactuated autonomous underwater vehicles with saturating actuators*. Neurocomputing, 2016. 194: p.p 372-384.