



Effect of Dynamic Stability Derivatives Coefficients on the Design of Operational Parameters of the Actuator in an Underwater Robot

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mirzaei M.^{*1} PhD,

Taghvaei H.² MSc

How to cite this article

Mirzaei M, Taghvaei H. Effect of Dynamic Stability Derivatives Coefficients on the Design of Operational Parameters of the Actuator in an Underwater Robot. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1623-1632.

ABSTRACT

Determining a dynamic model for an underwater robot is of great importance in design of guidance and control system. Researchers always need a complete knowledge about hydrodynamic stability derivatives coefficients of vehicle with sufficient accuracy to design a successful control system for underwater vehicles. The selection of proper actuator in control system is important on the global performance of the system and the costs of the project. Usually, the effect of dynamic stability derivative coefficients is not considered in the design of actuators; therefore, in the present study, it is tried to investigate the effect of these coefficients in the design of actuators. For this purpose, firstly, the equations of motion for an underwater robot are presented. Then, hydrodynamic coefficients that contains static and dynamic coefficients are determined, using a rapid computational code and, then, the effect of hydrodynamic stability derivatives coefficients on the operational dynamic parameters of vehicle such as the bandwidth of the system dynamics and its role in the control system are considered. Finally, the selection of appropriate actuator for the underwater robot and the effects of natural frequency of actuators on the system performance are studied.

Keywords Dynamic Stability Derivatives Coefficients; Operational Parameters of Actuator; Underwater Robot

CITATION LINKS

¹"Hydro-Aeronautical Research Center" and "School of Mechanical Engineering", Shiraz University, Shiraz, Iran

²School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Mollasadra Street, Shiraz, Iran. Postal Code: 7145674371

Phone: +98 (71) 36133375

Fax: +98 (71) 36133375

mmirzaei@shirazu.ac.ir

Article History

Received: April 04, 2018

Accepted: December 31, 2018

ePublished: July 01, 2019

- [1] Identification modeling of underwater vehicles' nonlinear dynamics based on support vector machines
- [2] Experimental testing of a cooperative ASV-ROV multi-agent system
- [3] Identification of underwater vehicle hydrodynamic coefficients using free decay tests
- [4] Experimental study on hydrodynamic coefficients for high-incidence-angle maneuver of a submarine
- [5] Hydrodynamic coefficients of yawed cylinders in open-channel flow
- [6] Estimation of the hydrodynamics coefficients of an ROV using free decay pendulum motion
- [7] Evaluation of methods to estimate hydrodynamic force coefficients of underwater vehicle based on CFD
- [8] Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle
- [9] An underwater vehicles dynamics in the presence of noise and Fokker-Planck Equations
- [10] Identification of the equivalent linear dynamics and controller design for an unmanned underwater vehicle
- [11] Robust generalized dynamic inversion control of autonomous underwater vehicles
- [12] Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel
- [13] A novel actuator for underwater robots
- [14] Analysis of actuator rate limit effects on first-order plus time-delay systems under fractional-order proportional-integral control
- [15] Automatic flight control systems
- [16] Guidance and Control of Ocean Vehicles

تأثیر ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی بر طراحی پارامترهای عملکردی عملگر در یک ربات زیر آب

مجتبی میرزائی* PhD

"پژوهشکده علوم و فنون هوادریا" و "دانشکده مهندسی مکانیک"، دانشگاه

شیراز، شیراز، ایران

حسین تقوایی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

تعیین یک مدل دینامیکی مناسب برای یک ربات زیر آب، از نظر طراحی سیستم هدایت و کنترل از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور طراحی یک سیستم کنترلی موفق برای وسایل زیر آب همواره دانستن ضرایب مشتقات پایداری هیدرودینامیکی وسیله به‌طور کامل و با دقت کافی مورد توجه محققان بوده است. انتخاب عملگر مناسب در سیستم کنترل روی عملکرد کلی سیستم و هزینه‌های پروژه موثر است. معمولاً در طراحی عملگرها تأثیر ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است تا میزان اهمیت این ضرایب در طراحی عملگرها بررسی شود. برای این منظور در ابتدا معادلات حرکت یک ربات زیر آب مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، استخراج ضرایب هیدرودینامیکی شامل ضرایب استاتیکی و دینامیکی برای یک ربات زیر آب توسط یک کد محاسباتی سریع انجام و پس از آن اثرات ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی بر پارامترهای عملکردی دینامیکی وسیله مانند پهنای باند دینامیک سیستم و نقش آن در سیستم کنترل بررسی شد. همچنین در پایان به بررسی انتخاب عملگر مناسب برای ربات زیر آب و مطالعه اثرات فرکانس طبیعی عملگر بر عملکرد سیستم پرداخته شد.

کلیدواژه‌ها: ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی، پارامترهای عملکردی عملگر، ربات زیر آب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

*نویسنده مسئول: mmirzaei@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

طراحی موفق ناوبری و سیستم کنترلی یک ربات زیر آب نیازمند یک مدل دینامیکی مناسب برای وسیله است. به‌دست‌آوردن پارامترهای هیدرودینامیکی برای یک ربات زیر آب همواره به‌عنوان یک مساله پیچیده و چالش‌برانگیز شناخته می‌شود و به‌دست‌آوردن یک مدل دینامیکی دقیق و کامل برای یک وسیله زیر آب به‌دلیل وجود پارامترهای دینامیکی کار مشکلی است [1].

مدلسازی حرکت یک ربات زیر آب نیازمند حل عددی شش معادله دیفرانسل غیرخطی و کوپل است. سه عدد از این معادلات مشخص‌کننده حرکت انتقالی وسیله و سه معادله باقی‌مانده نیز مشخص‌کننده حرکت دورانی وسیله نسبت به یک نقطه ثابت روی بدنه هستند. این نقطه ثابت معمولاً مرکز جرم وسیله یا مرکز بویانسی آن در نظر گرفته می‌شود. استخراج و توضیحات مربوط به این معادلات در مراجع مختلف قابل دسترسی است [1]. اما آنچه در این مقاله مورد توجه است این نکته است که تعیین یک مدل دینامیکی مناسب برای یک ربات زیر آب، از نظر طراحی سیستم هدایت و کنترل از اهمیت زیادی برخوردار است.

کوئته [2] بیان کرده است که بزرگترین مساله در طراحی یک کنترلر مناسب برای ربات زیر آب، دانستن مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی با دقت کافی است. روش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی از جمله انجام تست‌های آزمایشگاهی، دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از کدهای محاسباتی سریع نظیر دات‌کام وجود دارد. یکی از روش‌های

آزمایشگاهی مرسوم به‌منظور اندازه‌گیری ضرایب مشتقات پایداری هیدرودینامیکی، تست زوال است که اولین بار توسط موریسون ارائه شده است ولی روش‌های آزمایشگاهی محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، مانند تونل یا کانال آب معمولاً نیاز به هزینه و زمان زیادی دارند [3, 4, 5]. /نگ و همکاران [6] از یک روش آزمایشگاهی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی برای یک ربات زیر آب استفاده کرده‌اند. روش در نظر گرفته‌شده توسط آنها، بر مبنای روش مرسوم تست زوال است اما با این تفاوت که نوسانات فنر با حرکت یک پاندول جایگزین شده است. امروزه روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وسایل زیر آب توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. برای مثال سوزوکی و همکاران [7] به کمک این روش، به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و جرم افزوده برای یک وسیله زیر آب پرداخته‌اند و نتایج حاصل از محاسبات عددی را با نتایج حاصل از آزمایش، مورد اعتبارسنجی قرار داده‌اند. مطالعات صورت‌گرفته توسط آنها حاکی از تطابق قابل قبول نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی بوده است. همچنین پروین و کریشناتکوتی [8] از روش دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایش در کانال آب به بررسی اثرات طول یک وسیله زیر آب بر نیروهای هیدرودینامیکی پرداختند و نشان دادند که ضرایب خطی به‌صورت خطی با طول وسیله، تغییر می‌کنند؛ در حالی که تغییرات ضرایب غیرخطی با تغییر طول وسیله در محدوده در نظر گرفته‌شده غیرخطی است.

در مقاله پیش‌رو هدف بررسی تأثیر ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی بر عملکرد یک ربات زیر آب بوده است که در نهایت در تعیین عملگر مناسب برای ربات در کانال‌های مختلف کنترلی استفاده خواهد شد. در تحقیقات انجام‌شده روی وسایل زیر آب که در مراجع مختلفی ارائه شده است، در اغلب موارد تأثیر ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی در طراحی عملگر برای ربات در نظر گرفته نشده است. گاهی این ضرایب حتی در توابع تبدیل مدل نشده و اثر آنها بررسی نمی‌شود. بنابراین با توجه به این که ضرایب هیدرودینامیکی استاتیکی و دینامیکی هر کدام به‌تنهایی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر دینامیک سیستم داشته باشند، بنابراین مطالعه تأثیر این ضرایب به‌صورت مستقل بر عملکرد یک ربات زیر آب از اهمیت بالایی برخوردار است که در تحقیق پیش‌رو به آن پرداخته خواهد شد. همچنین، در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین عملگرهای مناسب برای یک ربات زیر آب تأثیر ضرایب مشتقات پایداری استاتیکی و دینامیکی به‌صورت جداگانه در طراحی عملگرهای مناسب از نظر فرکانس طبیعی و ضریب میرایی و همچنین پهنای باند در هر حالت تعیین شده است.

در ادامه و در بخش دوم به بررسی معادلات مشخص‌کننده حرکت یک ربات زیر آب پرداخته شده است. در بخش سوم به محاسبه ضرایب مشتقات پایداری هیدرودینامیکی ربات مورد نظر پرداخته می‌شود. در بخش چهارم طراحی سیستم کنترلی برای ربات مورد نظر ارائه شده است و در بخش پنجم نیز نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حرکت یک ربات زیر آب

همواره در تعیین معادلات حرکت یک ربات زیر آب، حرکت دستگاه مختصات بدنی نسبت به یک دستگاه مختصات اینرسی یا لخت سنجیده می‌شود. حرکت عمومی ربات شش درجه آزادی را می‌توان توسط بردارهای زیر بیان نمود [9]:

$$\sum M_{ext} = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] \quad (9)$$

$$\sum N_{ext} = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] \quad (10)$$

لازم به ذکر است که این روابط با فرض کوچک بودن حاصلضربهای اینرسی نوشته شده است، یعنی ماتریس اینرسی به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

در معادلات حرکت وسیله زیر آب، نیروهای خارجی را می‌توان به شکل رابطه (۱۲) نوشت.

$$\sum F_{ext} = F_{hydrostatic} + F_{lift} + F_{drag} + F_{control} \quad (12)$$

که $F_{hydrostatic}$ نشان‌دهنده نیروهای هیدرواستاتیک، F_{lift} نشان‌دهنده نیروهای برای، F_{drag} نیروهای پسا و $F_{control}$ نیز نشان‌دهنده نیروهای مربوط به سطوح کنترلی است. نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیک ناشی از وزن وسیله و نیروی بویانسی، به صورت زیر قابل بیان هستند^[10, 11]:

$$X_{HS} = -(W - B)\sin\theta \quad (13)$$

$$Y_{HS} = (W - B)\cos\theta\sin\phi \quad (14)$$

$$K_{HS} = -(y_g W - y_b B) \cos\theta\cos\phi \quad (15)$$

$$-(z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi \quad (16)$$

$$(17)$$

$$M_{HS} = -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi \quad (18)$$

$$N_{HS} = -(x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta$$

۳- محاسبه ضرایب مشتقات پایداری هیدرودینامیکی

نیروها و همچنین گشتاورهای مربوط به نیروهای پسا، برا و سطوح کنترل را می‌توان به صورت ضریب تعریف نمود و از این طریق ضرایب نیرو و گشتاور در جهات مختلف به شکل زیر قابل تعریف هستند:

$$(19)$$

$$C_X = \frac{X}{0.5\rho V^2 A} = C_{X0} + C_{X\alpha}|\alpha| + C_{X\delta_e}|\delta_e| + C_{X\delta_r}|\delta_r| \quad (20)$$

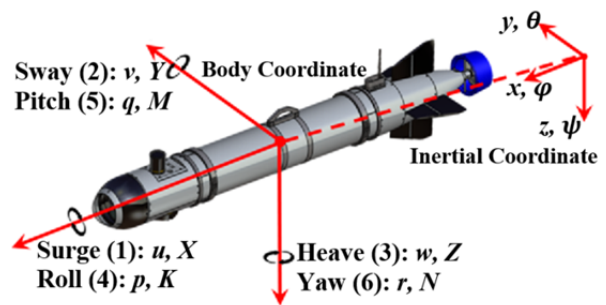
$$C_Y = \frac{Y}{0.5\rho V^2 A} = C_{Y\beta}\beta + C_{Y\delta_r}\delta_r + C_{Yr}r + C_{YB}\dot{B}$$

$$\eta_1 = [x \ y \ z]^T \quad \eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T \quad (1)$$

$$v_1 = [u \ v \ w]^T \quad v_2 = [p \ q \ r]^T \quad (2)$$

$$\tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad \tau_2 = [K \ M \ N]^T \quad (3)$$

که در روابط بالا، η نشان‌دهنده موقعیت وسیله نسبت به دستگاه مختصات اینرسی، U نشان‌دهنده سرعت‌های خطی یا زاویه‌ای وسیله نسبت به دستگاه مختصات بدنی و T نیز نشان‌دهنده برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله در دستگاه مختصات بدنی هستند. در شکل ۱ دستگاه‌های مختصات برای وسیله نشان داده شده است. بردارهای ذکرشده در دستگاه مختصات بدنی توسط تبدیلاتی به بردارهایی در دستگاه مختصات اینرسی تبدیل می‌شوند که در اینجا از ذکر آنها به منظور اختصار صرف نظر شده است.



شکل ۱) محورهای مختصات بدنی و اینرسی برای ربات زیر آب

موقعیت مرکز جرم و مرکز بویانسی وسیله در دستگاه مختصات بدنی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_G = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} \quad r_B = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

در ادامه معادلات حرکت برای یک جسم صلب شش درجه آزادی و در دستگاه مختصات بدنی آورده شده است^[10, 11]:

$$\sum X_{ext} = m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] \quad (5)$$

$$\sum Y_{ext} = m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] \quad (6)$$

$$\sum Z_{ext} = m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] \quad (7)$$

$$\sum K_{ext} = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] \quad (8)$$

(Roll) وسیله بررسی نشده و تمرکز بر بررسی اثرات در کانال سمت است. علاوه بر این، با توجه به این که ربات در نظر گرفته شده حرکات شتاب دار شدیدی را تجربه نمی‌کند، بنابراین از ضرایب مربوط به جرم افزوده در معادلات حرکت صرف نظر شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، به منظور بررسی اثرات ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی روی عملکرد وسیله و همچنین انتخاب عملگرهای مناسب، این ضرایب یک‌بار در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند و یک‌بار نیز تنها ضرایب مشتقات پایداری استاتیکی در نظر گرفته شده است و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و از نتایج به دست آمده برای تعیین عملگر مناسب برای ربات زیر آب استفاده شده است.

به منظور محاسبه ضرایب استاتیکی و دینامیکی ربات مورد نظر از کد محاسباتی دات‌کام استفاده شده است. لازم به ذکر است که در اینجا از نمایش هندسه و ابعاد وسیله مورد نظر چشم پوشی شده است. نتایج محاسبه ضرایب برای ربات مورد نظر در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱) ضرایب هیدرو دینامیکی محاسبه شده توسط دات‌کام

ضریب	مقدار محاسبه شده توسط دات‌کام
$C_{Z\alpha} = C_{Y\beta}$	-۰/۰۳۱۴
$C_{Z\delta_e} = C_{Y\delta_r}$	-۰/۰۰۸
$C_{Zq} = -C_{Yr}$	۰/۳۱۶
$C_{Z\alpha} = C_{Y\beta}$	-۰/۴۴۱
C_{X0}	-۰/۳۲۱
$C_{X\alpha}$	۰/۰۰۱۵
$C_{X\delta_e}$	-۰/۰۰۰۳۴
$C_{X\delta_a}$	-۰/۰۰۰۷
$C_{K\delta_a}$	-۰/۰۰۰۴
C_{Kp}	-۰/۰۱۳
$C_{M\alpha} = -C_{N\beta}$	-۰/۰۳۴۷
$C_{M\delta_e} = -C_{N\delta_r}$	-۰/۰۴۱
$C_{Mq} = C_{Nr}$	-۰/۹۴۵۵
$C_{M\alpha} = -C_{N\beta}$	-۰/۱۸۹۵

۴- طراحی سیستم کنترل

با مشخص شدن دینامیک سیستم که در بخش‌های پیشین صورت گرفت، حال می‌توان دینامیک سیستم، کنترلر و عملگرها را ترکیب نمود و دیاگرام جعبه‌ای سیستم کنترلی برای کانال سمت را به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داد.

$$C_Z = \frac{Z}{0.5\rho V^2 A} = C_{Z\alpha}\alpha + C_{Z\delta_e}\delta_e + C_{Zq}q + C_{Z\dot{\alpha}}\dot{\alpha} \quad (21)$$

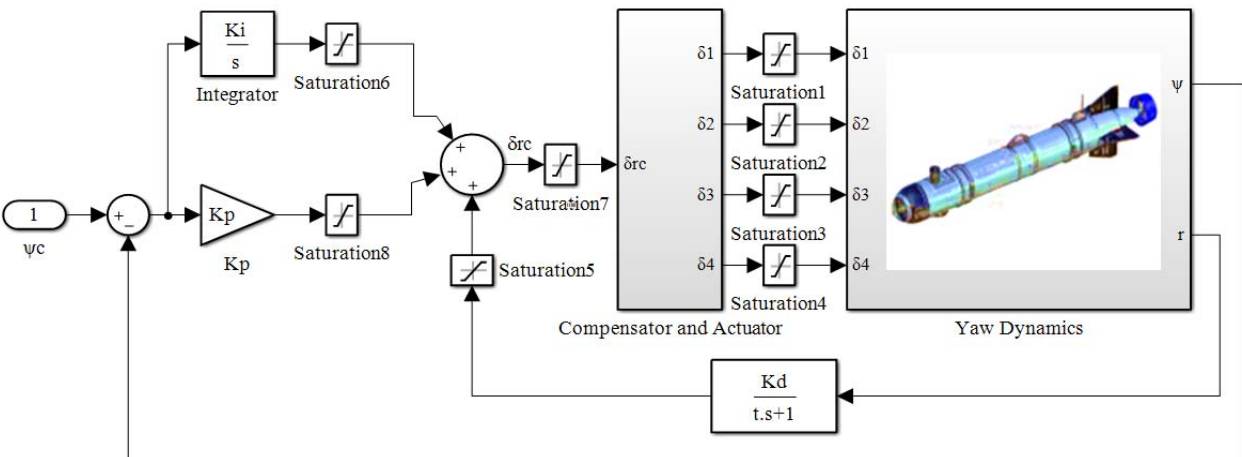
$$C_K = \frac{K}{0.5\rho V^2 AD} = C_{K\delta_a}\delta_a + C_{Kp}p \quad (22)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho V^2 AD} = C_{M\alpha}\alpha + C_{M\delta_e}\delta_e + C_{Mq}q + C_{M\dot{\alpha}}\dot{\alpha} \quad (23)$$

$$C_N = \frac{N}{0.5\rho V^2 AD} = C_{N\beta}\beta + C_{N\delta_r}\delta_r + C_{Nr}r + C_{N\dot{\beta}}\dot{\beta} \quad (24)$$

که در روابط بالا، A نشان‌دهنده سطح مرجع برابر با $\pi D^2/4$ و نیز قطر وسیله هستند. همچنین α و β نشان‌دهنده زوایای حمله و $\dot{\alpha}$ و $\dot{\beta}$ نیز مشتقات زوایای حمله نسبت به زمان است. $\delta_e, \delta_a, \delta_r$ به ترتیب نشان‌دهنده زوایای سطوح کنترلی شهپر (Aileron)، الویتور و سکان هستند. از پارامترهای ذکر شده، هر کدام که در زیرنویس ضرایب به صورت اندیس استفاده شده به این معناست که مشتق نسبت به همان پارامتر انجام شده است. برای مثال ضریب $C_{X\alpha}$ نشان‌دهنده ضریب مشتق پایداری نیرو در جهت X و نسبت به زاویه حمله یعنی α است. همچنین زیرنویس 0 در رابطه (۱۹) نشان‌دهنده زاویه حمله صفر است، یعنی ضریب C_{X0} ضریب نیرو در جهت X و در زاویه حمله صفر است.

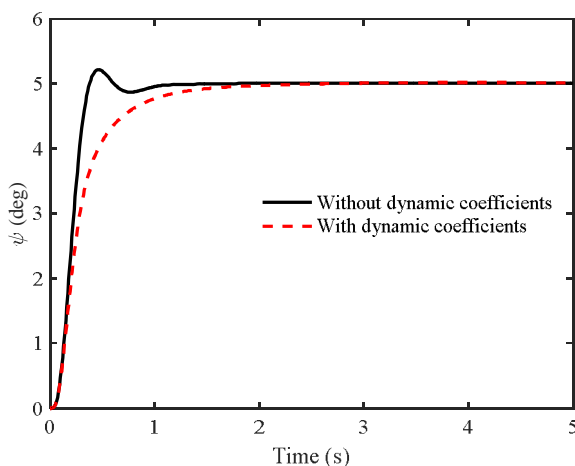
لازم به ذکر است که ضرایب $C_{N\beta}, C_{Y\beta}, C_{Mq}, C_{Zq}, C_{M\alpha}, C_{Z\alpha}$ ضرایب C_{Nr} و C_{Yr} ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی و مابقی ضرایب ضرایب مشتقات پایداری استاتیکی هستند. در واقع در محاسبه ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی، مشتقات نیرو و گشتاور نسبت به نرخ زاویه در هر جهت (q یا r) یا تغییرات زوایای حمله و جانبی نسبت به زمان ($\dot{\alpha}$ یا $\dot{\beta}$)، انجام شده است در حالی که در محاسبه ضرایب مشتقات پایداری استاتیکی، مشتقات نیرو و گشتاور نسبت به زوایای سطوح کنترلی ($\delta_e, \delta_a, \delta_r$) یا نسبت به زوایای حمله (α و β) هستند. از هشت ضریب دینامیکی اشاره شده، چهار ضریب اول مربوط به فراز (Pitch) وسیله و چهار ضریب دوم نیز مربوط به سمت (Yaw) وسیله هستند. همچنین در این تحقیق ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی در جهت چرخ



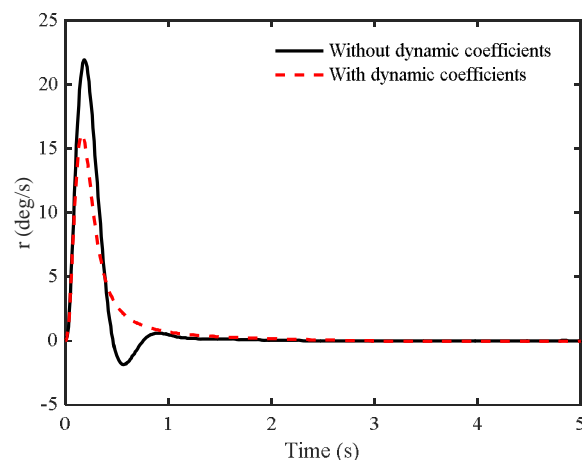
شکل ۲) شماتیک سیستم کنترلی به همراه کنترلر PID برای کانال سمت ربات

۵- یافته‌ها

در این بخش، ابتدا به مقایسه رفتار ربات زیر آب در دو حالت در نظر گرفتن ضرایب دینامیکی و بدون در نظر گرفتن آنها با عملگر یکسان پرداخته شده است. برای این منظور از یک شبیه‌سازی شش درجه آزادی کامل در محیط C استفاده شده است. با توجه به تداخلات کانال‌های کنترلی مختلف بر یکدیگر سعی شده است تا تحلیل‌ها در محیط غیرخطی انجام شود و در صورت امکان از توابع تبدیل در محیط خطی هم بهره برده شود. عملگر در شبیه‌سازی به صورت یک عملگر مرتبه دوم با فرکانس زاویه‌ای طبیعی ۵۰ رادیان بر ثانیه و ضریب میرایی ۰/۷ هرتز مدل شده است. یک دستور ۵ درجه‌ای سمت در ابتدای حرکت به ربات داده شده است و نتایج مربوط به این مقایسه در نمودارهای ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که نمودار ۱ نشان می‌دهد، در حالتی که ضرایب دینامیکی در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشوند، زاویه سمت در اثر دستور داده شده با یک فراجش ۴/۳٪ همراه بوده است. این در حالی است که با اعمال ضرایب دینامیکی در شبیه‌سازی، این فراجش به‌طور کامل از بین رفته است و زاویه سمت به آرامی به دستور داده شده میل کرده است. در واقع در این حالت رفتار حلقه بسته سیستم با در نظر گرفتن ضرایب دینامیکی به رفتار یک سیستم زیرمیرا نزدیک شده است.



نمودار ۱) تغییرات زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه در دو حالت اعمال ضرایب دینامیکی و چشم‌پوشی از ضرایب دینامیکی



نمودار ۲) تغییرات نرخ زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه در دو حالت اعمال ضرایب دینامیکی و چشم‌پوشی از ضرایب دینامیکی

با توجه به شکل ۲، ψ_c نشان‌دهنده دستور ورودی سمت و e_1 مقادیر خطای سمت است که به کنترلر که از نوع تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر یا PID انتخاب شده است، وارد می‌شود و خروجی کنترلر دستور مربوط به سکان است که با δ_{rc} نشان داده شده است. این دستور پس از این در پردازنده به دستور مربوط به چهار عملگر که با $\delta_{1c}, \delta_{2c}, \delta_{3c}, \delta_{4c}$ نشان داده شده‌اند، تبدیل شده و وارد بخش عملگرها می‌شود که در نهایت در این بخش دستورات مربوط به چهار بالک وسیله ساخته می‌شوند. دستورات مربوط به چهار بالک وسیله نیز ورودی دینامیک سیستم هستند که در نهایت زاویه سمت به‌عنوان خروجی دینامیک سیستم خواهد بود. در شکل ۲، K_i و K_d, K_p به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب تناسبی و مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر کنترلر هستند و خروجی کنترلر کانال سمت δ_{rc} است که قانون کنترلی برای آن به شکل رابطه (۲۵) نوشته می‌شود^[12]. لازم به ذکر است که در رابطه (۲۵)، $e_1(t)$ نشان‌دهنده خطای مربوط به زاویه سمت است.

(۲۵)

$$\delta_{rc} = \text{sat}(K_p \times e_1(t)) + \text{sat}(K_d \times \text{lowpassed}(\frac{d\psi(t)}{dt})) + \text{sat}(\int [K_i \times e_1(t)] dt)$$

همان‌طور که گفته شد، کنترلر در دو کانال دیگر یعنی کانال‌های چرخ و فراز نیز از نوع تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر بوده و سیستم کنترلی در این دو کانال نیز مشابه با کانال سمت است. پس از این باید دستورات خروجی از کنترلرها وارد عملگرها شده تا دستورات چهار بالک ساخته شوند. در ربات‌های زیر آب معمولاً از موتورهای فرمان‌یار یا سیلندرهای هیدرولیکی به‌عنوان عملگر استفاده می‌شود^[13]. دو مدل ساده برای عملگرهای خطی مدل‌های مرتبه اول و مرتبه دوم هستند. در مدل خطی مرتبه اول، دینامیک یک عملگر به‌صورت رابطه (۲۶) بیان می‌شود^[14].

$$G(s) = \frac{\delta}{\delta_c} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (۲۶)$$

در رابطه (۲۶)، δ خروجی عملگر و δ_c ورودی یا دستور است. همچنین در رابطه (۲۷) نیز مدل خطی مرتبه دوم برای یک عملگر ارائه شده است که در آن، ζ ضریب میرایی و ω_n فرکانس طبیعی عملگر است^[15].

$$G(s) = \frac{\delta}{\delta_c} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۲۷)$$

لازم به ذکر است که در عملگر مرتبه دوم ممکن است فراجش ببینیم اما اگر این فراجش زیاد نباشد که اثر نامطلوب بر سیستم ایجاد نماید می‌توانیم افزایش سرعت پاسخ را داشته باشیم.

در نهایت، خروجی عملگرها دستورات مربوط به چهار بالک یعنی $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ هستند که به دینامیک سیستم وارد می‌شوند.

در ادامه به بررسی اثرات ضرایب دینامیکی محاسبه‌شده روی رفتار ربات زیر آب و همچنین روی روند طراحی عملگرها پرداخته خواهد شد.

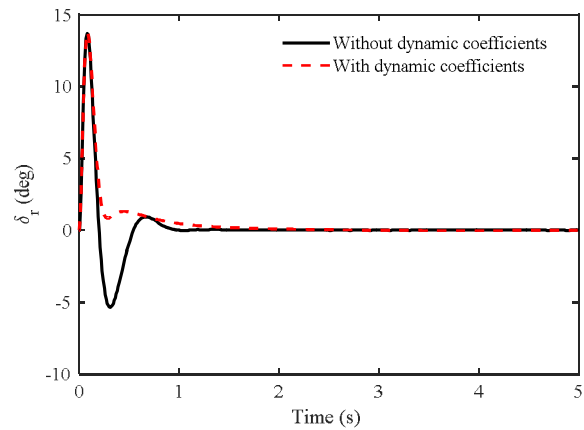
حرکت همانند یک میراگر از حرکات سریع‌تر وسیله جلوگیری می‌کنند.

در نمودار ۳ نیز تغییرات زاویه سطح کنترلی سکان بر حسب زمان در دو حالت ذکر شده نشان داده شده است. تغییرات زاویه سطح کنترلی سکان نیز همانند نرخ زاویه سمت است و با اعمال ضرایب دینامیکی مشاهده می‌شود که زاویه سطح کنترلی سکان نیز تنها مقادیر مثبت را شامل می‌شود.

به منظور بررسی اثرات فرکانس طبیعی عملگر بر عملکرد ربات زیر آب در حالت چشم‌پوشی از ضرایب دینامیکی، یک عملگر مرتبه دوم با ضریب میرایی ۰/۷ و چهار فرکانس طبیعی ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ رادیان بر ثانیه، انتخاب شده است.

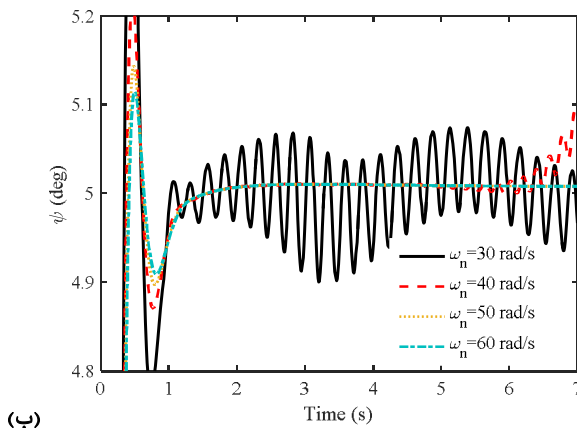
نتایج مربوط به بررسی اثرات فرکانس طبیعی عملگر در نمودارهای ۴ تا ۶ نشان داده شده است. در نمودار ۴، تغییرات زاویه سمت بر حسب زمان و برای فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر قابل مشاهده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش فرکانس طبیعی عملگر، بیشینه درصد فراجش و نوسانات زاویه سمت حول مقدار نهایی کاهش می‌یابد تا این که در فرکانس طبیعی ۵۰ رادیان بر ثانیه این نوسانات به‌طور کامل از بین رفته است و پس از آن با افزایش فرکانس طبیعی به ۶۰ رادیان بر ثانیه تغییرات قابل توجهی در زاویه سمت دیده نمی‌شود.

بیشینه درصد فراجش نیز در فرکانس‌های طبیعی عملگر ۳۰ و ۶۰ رادیان بر ثانیه به ترتیب برابر با ۹/۵٪ و ۲/۳٪ بوده است که کاهش درصد فراجش را در اثر افزایش فرکانس طبیعی عملگر نشان می‌دهد. تغییرات نرخ زاویه سمت و همچنین زاویه سطح کنترلی سکان در نمودارهای ۵ و ۶ نشان داده شده است.

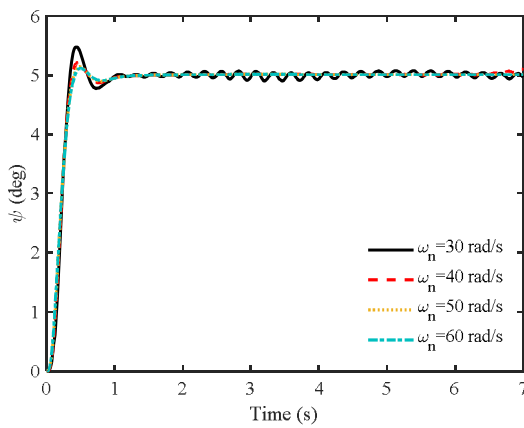


نمودار ۳) زاویه سطح کنترلی سکان در اثر دستور اعمالی ۵ درجه در دو حالت اعمال ضرایب دینامیکی و چشم‌پوشی از ضرایب دینامیکی

در نمودار ۲ تغییرات نرخ زاویه سمت بر حسب زمان در اثر دستور اعمالی و در دو حالت ذکر شده نشان داده شده است. همان‌طور که نمودار ۲ نشان می‌دهد مقدار بیشینه نرخ زاویه سمت در دو حالت در نظر نگرفتن ضرایب دینامیکی و در نظر گرفتن این ضرایب، به ترتیب برابر با ۲۱/۹ و ۱۶/۱ درجه بر ثانیه بوده است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که در حالت بدون اعمال ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی، نرخ زاویه سمت مقادیر منفی را هم شامل می‌شود، در حالی که با اعمال ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی نرخ زاویه سمت تنها مقادیر مثبت را شامل می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان گفت که جملات شامل ضرایب دینامیکی در معادلات

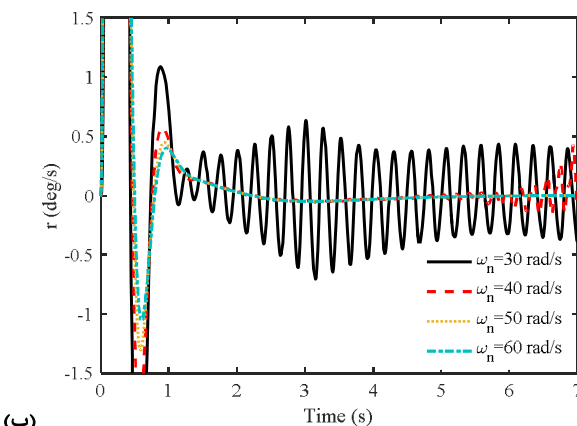


(ب)

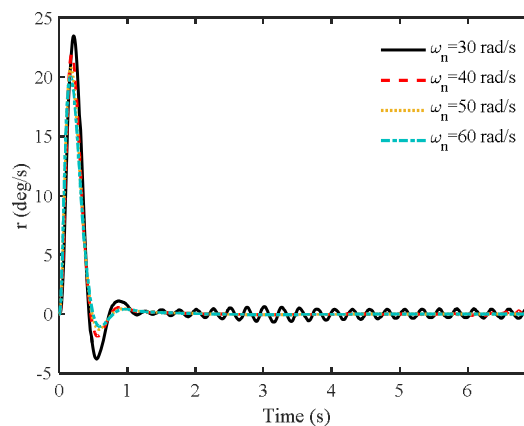


(الف)

نمودار ۴) (الف) زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه بدون اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر، (ب) نمودار بزرگ‌نمایی شده

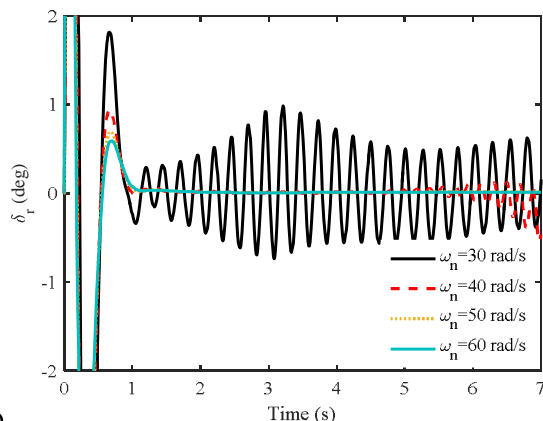


(ب)

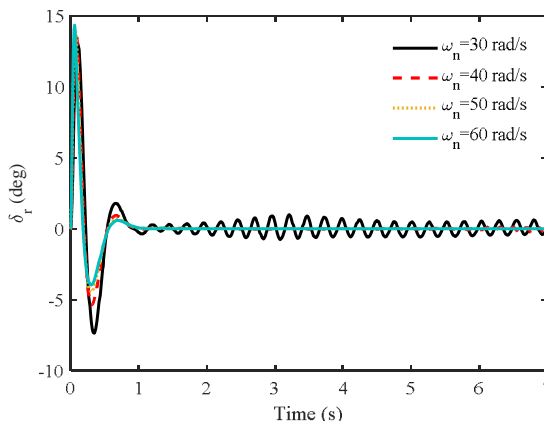


(الف)

نمودار ۵) (الف) نرخ زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه بدون اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر، (ب) نمودار بزرگ‌نمایی شده

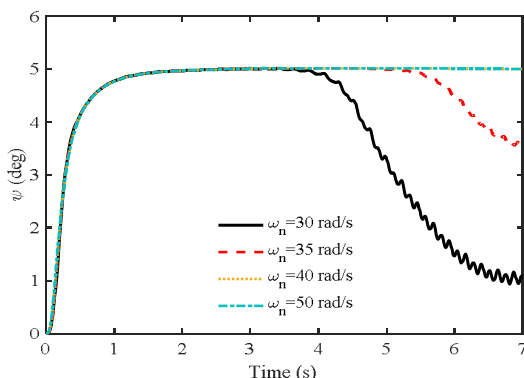


(ب)

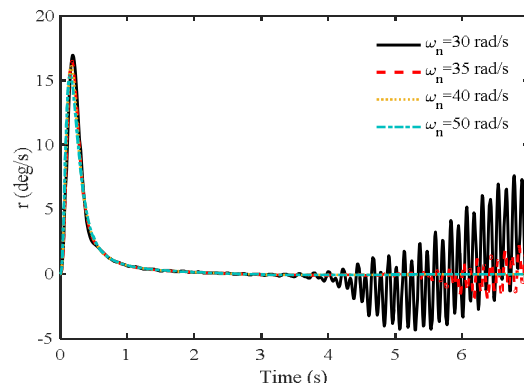


(الف)

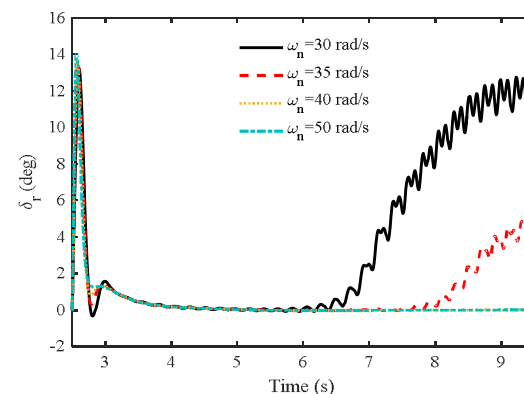
نمودار (۶) (الف) زاویه سطح کنترلی سکان در اثر دستور اعمالی ۵ درجه بدون اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر، (ب) نمودار بزرگ‌نمایی



نمودار (۷) زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه با اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر



نمودار (۸) تغییرات نرخ زاویه سمت در اثر دستور اعمالی ۵ درجه با اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر



نمودار (۹) تغییرات زاویه سطح کنترلی سکان در اثر دستور اعمالی ۵ درجه با اعمال ضرایب دینامیکی و در فرکانس‌های طبیعی مختلف عملگر

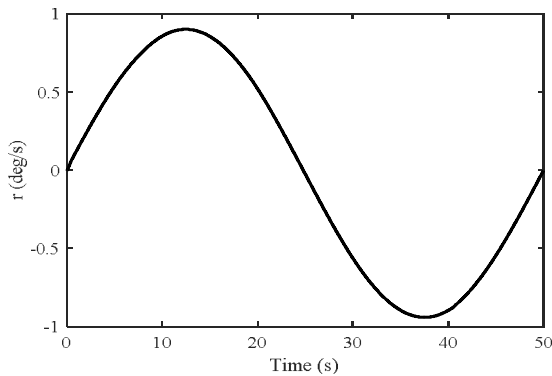
این نتایج نیز نشان می‌دهند که با افزایش فرکانس طبیعی عملگر، نوسانات نرخ زاویه سمت و زاویه سطح کنترلی سکان حول مقدار نهایی کاهش می‌یابند و پس از رسیدن به فرکانس طبیعی ۵۰ رادیان بر ثانیه این نوسانات به‌طور کامل از بین رفته‌اند. بنابراین می‌توان گفت عملگر با فرکانس طبیعی ۵۰ رادیان بر ثانیه و ضریب میرایی ۰/۷ برای کانال سمت زیر آب مناسب است.

البته این بررسی در حالتی است که ضرایب دینامیکی در شبیه‌سازی چشم‌پوشی شده است و برای مطالعه تاثیر این ضرایب می‌بایست مقایسه صورت‌گرفته در قسمت قبل با اعمال این ضرایب در شبیه‌سازی وسیله مورد بررسی قرار گیرد؛ که این کار در ادامه صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در نمودارهای ۴ تا ۶ به‌منظور مشاهده بهتر نتایج، در قسمت انتهایی نمودارها بزرگ‌نمایی انجام شده است و نمودار بزرگ‌نمایی‌شده در قسمت (ب) هر نمودار نمایش داده شده است.

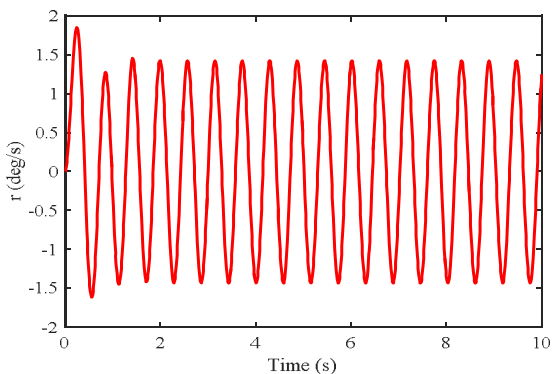
همان‌طور که گفته شد، به‌منظور بررسی عملگر مناسب لازم است تا ضرایب دینامیکی نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شوند. در این حالت نیز با اعمال ضرایب دینامیکی و در نظر گرفتن یک عملگر با ضریب میرایی ۰/۷ و فرکانس طبیعی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۵۰ رادیان بر ثانیه، مقایسه انجام شده است. نتایج مربوط به بررسی اثر فرکانس طبیعی عملگر بر عملکرد وسیله با اعمال ضرایب دینامیکی در نمودارهای ۷ تا ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار ۷ نشان داده شده است، زاویه سمت در فرکانس‌های پایین عملگر (۳۰ و ۳۵ رادیان بر ثانیه) برخلاف حالت قبل، یعنی بدون اعمال ضرایب دینامیکی با فراجاهش همراه نیست، اما سیستم در این حالات ناپایدار است. این در حالی است که با افزایش فرکانس طبیعی عملگر به ۴۰ رادیان بر ثانیه سیستم پایدار شده است. پس از آن نیز با افزایش فرکانس طبیعی عملگر به ۵۰ رادیان بر ثانیه، تغییرات زیادی در زاویه سمت مشاهده نمی‌شود.

در نمودارهای ۸ و ۹ که به ترتیب تغییرات نرخ زاویه سمت و همچنین زاویه سطح کنترلی سکان را نشان می‌دهند نیز رسیدن به پایداری با افزایش فرکانس طبیعی عملگر به ۴۰ رادیان بر ثانیه، مشخص است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی، می‌توان عملگری با فرکانس طبیعی کوچکتر (۴۰ رادیان بر ثانیه) انتخاب نمود، در حالی که در حالت چشم‌پوشی از ضرایب دینامیکی فرکانس طبیعی عملگر ۵۰ رادیان بر ثانیه است. این موضوع نشان می‌دهد که اعمال ضرایب دینامیکی می‌تواند روی پهنای باند وسیله تاثیرگذار باشد.

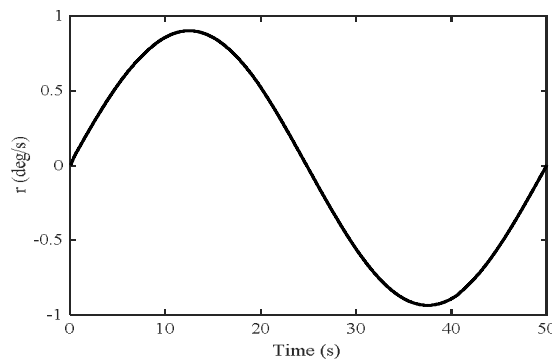
دینامیکی C_{Nr} ، C_{Yr} اعمال شده بودند، ندارد. در واقع به نظر می‌رسد تاثیر دو ضریب دینامیکی $C_{N\beta}$ و $C_{Y\beta}$ روی دینامیک سیستم و همچنین پهنای باند دینامیک سیستم ناچیز است.



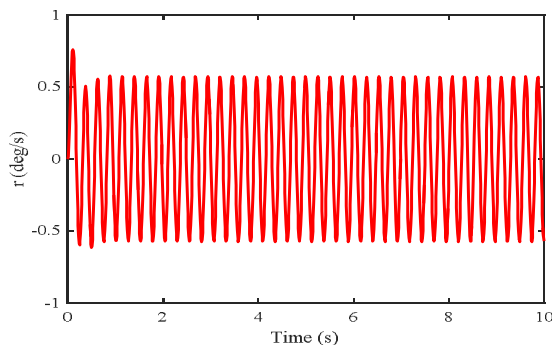
نمودار (۱۰) نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۰/۰۲ هرتز به دینامیک سیستم بدون اعمال ضرایب دینامیکی



نمودار (۱۱) نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۱/۷ هرتز به دینامیک سیستم بدون اعمال ضرایب دینامیکی



نمودار (۱۲) نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۰/۰۲ هرتز به دینامیک سیستم با اعمال ضرایب دینامیکی C_{Nr} و C_{Yr}



نمودار (۱۳) تغییرات نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۳/۹ هرتز به دینامیک سیستم با اعمال ضرایب دینامیکی C_{Nr} و C_{Yr}

به منظور بررسی پهنای باند دینامیک سیستم (حلقه باز)، سه حالت مختلف در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول هیچ یک از ضرایب دینامیکی در نظر گرفته نشد. در حالت دوم تنها دو ضریب مربوط به مشتقات نسبت به نرخ زاویه سمت یعنی C_{Yr} و C_{Nr} در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه این حالت با مدل خطی تابع تبدیل وسیله در کانال سمت که این دو ضریب را شامل می‌شود، وجود داشته باشد. در حالت سوم نیز هر چهار ضریب دینامیکی در نظر گرفته شد. به منظور تخمین پهنای باند دینامیک سیستم، زاویه سطح کنترلی سکان به صورت یک ورودی سینوسی با فرکانس متغیر به دینامیک سیستم وارد شد و خروجی دینامیک سیستم که همان نرخ زاویه سمت است مورد بررسی قرار گرفت. پهنای باند به صورت فرکانسی که در آن دامنه نوسانات خروجی (نرخ زاویه سمت) به اندازه ۳/۰ دسی‌بل کاهش یابد یا تقریباً به ۷۰٪ دامنه اولیه نوسانات خروجی برسد، در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که گفته شد در حالت اول هیچ‌یک از ضرایب دینامیکی در نظر گرفته نشد. در این حالت با توجه به نمودار ۱۰ که نرخ زاویه سمت را در فرکانس ورودی ۰/۰۲ هرتز نشان می‌دهد، دامنه اولیه نوسانات تقریباً برابر با ۲/۲ درجه بر ثانیه است. بنابراین پهنای باند سیستم فرکانسی است که در آن دامنه نوسانات خروجی به ۷۰٪ این مقدار اولیه یعنی حدود ۱/۵ درجه بر ثانیه می‌رسد. پس با افزایش فرکانس ورودی به ۱/۷ هرتز همان‌طور که در نمودار ۱۱ نشان داده شده است، به این دامنه مورد نظر رسیده‌ایم که این فرکانس (۱/۷ هرتز) تقریباً معادل پهنای باند دینامیک سیستم بدون در نظر گرفتن ضرایب دینامیکی است.

در حالت دوم همان‌طور که گفته شد، تنها دو ضریب C_{Nr} و C_{Yr} در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه این حالت با مدل خطی تابع تبدیل ربات زیر آب در کانال سمت وجود داشته باشد. نتایج این حالت در نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

در این حالت نیز مشابه حالت اول با افزایش فرکانس ورودی به دینامیک سیستم مشاهده می‌شود که پهنای باند سیستم تقریباً برابر با ۳/۹ هرتز بوده است. پس با اعمال این دو ضریب دینامیکی مشاهده می‌شود که پهنای باند سیستم از ۱/۷ هرتز به ۳/۹ هرتز افزایش پیدا کرده است. در صورت خطی‌سازی روابط و محاسبه تابع تبدیل ربات زیر آب از زاویه سطح کنترلی سکان به نرخ زاویه سمت، تابع تبدیل به صورت آمده در رابطه (۲۸) خواهد بود که در محاسبه تابع تبدیل تنها دو ضریب دینامیکی C_{Nr} و C_{Yr} در نظر گرفته شده است [5, 16]:

(۲۸)

$$\frac{r}{\delta_r} = \frac{1.2488 \times 10^5 s + 4.2904 \times 10^5}{0.06 \times 10^5 s^2 + 0.5327 \times 10^5 s + 2.6866 \times 10^5}$$

با در نظر گرفتن این تابع تبدیل و اعمال یک ورودی سینوسی مشابه آنچه در مورد قبل انجام شد، پهنای باند دینامیک سیستم تقریباً برابر با ۳/۰ هرتز خواهد بود که مقداری با پهنای باند محاسبه شده در حالت معادلات غیرخطی یعنی مقدار ۳/۹ هرتز متفاوت است.

در حالت سوم نیز همان‌طور که گفته شد، هر چهار ضریب دینامیکی یعنی ضرایب C_{Nr} ، C_{Yr} ، $C_{N\beta}$ و $C_{Y\beta}$ در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به محاسبه پهنای باند در این حالت در نمودارهای ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است.

در این حالت با توجه به نتایج مشخص است که پهنای باند دینامیک سیستم در حالت حلقه باز برابر با ۳/۹ هرتز است که تفاوتی با نتایج در حالت دوم یعنی حالتی که تنها دو ضریب

تأثیر ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی بر طراحی پارامترهای عملگرهای عملگر در یک ربات زیر آب ۱۶۳۱

دینامیکی با افزایش فرکانس طبیعی عملگر از ۳۰ به ۶۰ رادیان بر ثانیه، بیشینه درصد فراجش زاویه سمت از ۹/۵٪ به ۲/۳٪ کاهش پیدا کرده و سیستم به سمت پایداری بیشتر می‌رود و در حالت اعمال ضرایب دینامیکی نیز با افزایش فرکانس طبیعی عملگر از ۳۰ به ۵۰ رادیان بر ثانیه، سیستم از ناپایداری به پایداری کامل می‌رسد. علاوه بر این، مشاهده شد که پهنای باند دینامیک سیستم نیز با اعمال ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی افزایش پیدا می‌کند و از ۱/۷ هرتز در حالت صرف نظر از این ضرایب به مقدار ۳/۹ هرتز در حالت اعمال ضرایب دینامیکی می‌رسد و با افزایشی ۱۳۰٪ همراه خواهد بود. بنابراین در این مقاله نشان داده شد که در نظر گرفتن ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی می‌تواند در تعیین عملگرهای مناسب برای سیستم کنترل یک ربات زیر آب موثر باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از پژوهشکده علوم و فنون هوادریا

بابت ایجاد تسهیلات در انجام این پروژه تشکر می‌نمایند. **تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

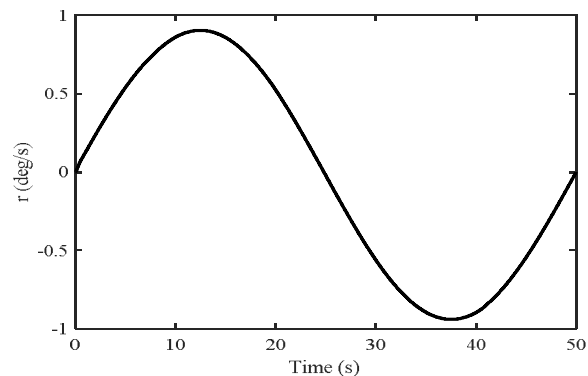
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منفعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مجتبی میرزائی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ حسین تقوایی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)

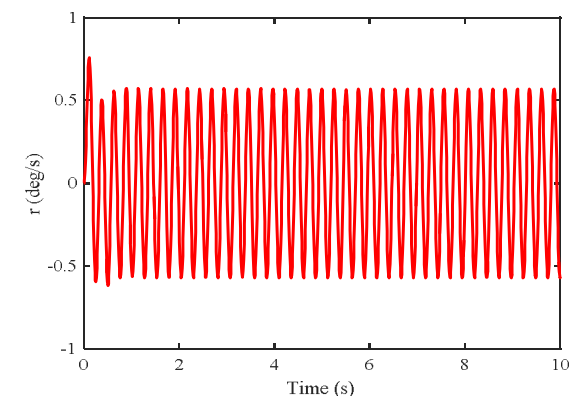
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Xu F, Zou ZJ, Yin JC, Cao J. Identification modeling of underwater vehicles' nonlinear dynamics based on support vector machines. *Ocean Engineering*. 2013;67:68-76.
- 2- Conte G, Scaradozzi D, Mannocchi D, Raspa P, Panebianco L, Screpanti L. Experimental testing of a cooperative ASV-ROV multi-agent system. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(23):347-354.
- 3- Ross A, Fossen TI, Johansen TA. Identification of underwater vehicle hydrodynamic coefficients using free decay tests. *IFAC Proceedings Volumes*. 2004;37(10):363-368.
- 4- Park JY, Kim N, Shin YK. Experimental study on hydrodynamic coefficients for high-incidence-angle maneuver of a submarine. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2017;9(1):100-113.
- 5- Persi E, Petaccia G, Fenocchi A, Manenti S, Ghilardi P, Sibilla S. Hydrodynamic coefficients of yawed cylinders in open-channel flow. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019;65:288-296.
- 6- Eng YH, Lau WS, Low E, Seet GGL, Chin CS. Estimation of the hydrodynamics coefficients of an ROV using free decay pendulum motion. *Engineering Letter*. 2008;16(3):329-342.
- 7- Suzuki H, Sakaguchi J, Inoue T, Watanabe Y, Yoshida H. Evaluation of methods to estimate hydrodynamic force coefficients of underwater vehicle based on CFD. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(33):197-202.
- 8- Praveen PC, Krishnakutty P. Study on the effect of



نمودار ۱۴) تغییرات نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۰/۲ هرتز به دینامیک سیستم با اعمال ضرایب دینامیکی $C_{N\dot{\beta}}$ و $C_{Y\dot{\beta}}$, $C_{Y\dot{r}}$, $C_{N\dot{r}}$



نمودار ۱۵) تغییرات نرخ زاویه سمت در اثر اعمال ورودی سینوسی با فرکانس ۳/۹ هرتز به دینامیک سیستم با اعمال ضرایب دینامیکی $C_{N\dot{\beta}}$ و $C_{Y\dot{\beta}}$, $C_{Y\dot{r}}$, $C_{N\dot{r}}$

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر ابتدا معادلات حرکت برای یک ربات زیر آب بیان شد و سپس به منظور بررسی اثرات در نظر گرفتن ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی بر عملکرد وسیله و انتخاب عملگرهای مناسب برای ربات زیر آب، این ضرایب به همراه ضرایب مشتقات پایداری استاتیکی که هر دو از کد محاسباتی دات‌کام استخراج شده بودند، در معادلات مدل شدند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی که همانند یک میراگر جلو حرکات سریع وسیله را می‌گیرند، ربات زیر آب در مقابل دستورات اعمالی در کانال مربوطه کندتر عمل خواهد کرد و دستور داده شده را نسبت به حالتی که این ضرایب در نظر گرفته نشوند، دیرتر دنبال خواهد کرد. با توجه به نتایج به دست آمده، در حالتی که ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی در محاسبات در نظر گرفته نشوند پاسخ زاویه سمت در اثر اعمال دستور ۵ درجه‌ای با یک فراجش ۴/۳٪ همراه خواهد بود، در حالی که با اعمال ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی، این فراجش به طور کامل از بین خواهد رفت. علاوه بر این، نشان داده شد که با اعمال ضرایب مشتقات پایداری دینامیکی در معادلات حرکت ربات زیر آب، عملگری با فرکانس طبیعی کمتر نسبت به حالتی که ضرایب دینامیکی در نظر گرفته نشوند، می‌تواند انتخاب نمود، به طوری که عملگر پیشنهاد شده در حالت اعمال ضرایب دینامیکی عملگری مرتبه دوم با فرکانس طبیعی ۵۰ رادیان بر ثانیه است و در حالت صرف نظر از ضرایب دینامیکی فرکانس طبیعی عملگر برابر با ۴۰ رادیان بر ثانیه پیشنهاد شده است. همچنین اثرات فرکانس طبیعی عملگر بر عملکرد ربات زیر آب مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که در حالت صرف نظر از ضرایب

- 12- Larrazabal JM, Peñas SM. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert Systems with Applications*. 2016;55:106-117.
- 13- Kenneth KK, Robin SB, Katherine KYL, Lam FY, Robin CWL. A novel actuator for underwater robots. *IEEE Journal of Ocean Engineering*. 2009;34(3):331-342.
- 14- Yuan J, Chen YQ, Fei S. Analysis of actuator rate limit effects on first-order plus time-delay systems under fractional-order proportional-integral control. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(4):37-42.
- 15- McLean D. *Automatic flight control systems*. New Jersey: Prentice Hall; 1990. pp. 54-60.
- 16- Fossen TI. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Hoboken: Wiley. 1994; pp. 231-238.
- body length on the hydrodynamic performance of an axisymmetric underwater vehicle. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2013;42(8):1013-1022.
- 9- Sharma SN, Hirpara RH. An underwater vehicles dynamics in the presence of noise and Fokker-Planck Equations. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014;47(3):8805-8811.
- 10- Banazadeh A, Seif MS, Khodaei MJ, Rezaie M. Identification of the equivalent linear dynamics and controller design for an unmanned underwater vehicle. *Ocean Engineering*. 2017;139:152-168.
- 11- Ansari U, Bajodah AH. Robust generalized dynamic inversion control of autonomous underwater vehicles. *IFAC PapersOnLine*. 2017;50(1):10658-65.