

## کنترل عمق شناور زیرسطحی خودکار با استفاده از روش کنترل رخداد-تحریک

یزدان باتمانی<sup>۱\*</sup>، شهاب‌الدین نجفی<sup>۲</sup>

y.batmani@uok.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کردستان، سنندج

shahabedin.najafi@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کردستان، سنندج

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۱۹

### چکیده

در این مقاله، از روشی جدید برای کنترل عمق یک شناور زیرسطحی خودکار استفاده می‌شود. فرض بر این است که مسیر مطلوبی که شناور زیرسطحی باید طی کند توسط یک کاربر بیرون از آب تعیین می‌شود، بنابراین ارتباط بین کنترل‌کننده و شناور زیرسطحی به وسیله یک شبکه ارتباطی بی‌سیم برقرار می‌شود. با توجه به چالش‌ها و محدودیت‌های ارتباط بی‌سیم، از روشی نوین برای کاهش نرخ ارسال داده از کنترل‌کننده به محرک مادامی که کارایی سیستم حفظ شود، استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا با استفاده از روش غیرخطی مبتنی بر معادلات ریکاتی وابسته به حالت (SDRE)، یک کنترل‌کننده ردیاب عمق را برای شناور زیرسطحی خودکار طراحی می‌کنیم. سپس با استفاده از روش کنترل رخداد-تحریک و با حفظ کارایی سیستم، نرخ ارسال داده در شبکه ارتباطی را به حداقل ممکن می‌رسانیم. با توجه به مقدار میانگین مربع خطای ردیابی حاصل از اعمال دو کنترل‌کننده SDRE و رخداد-تحریک برای ردیابی یک خط-سیر سینوسی میرا (در روش SDRE،  $0/00063$  و در روش رخداد-تحریک  $0/00065$ )، همچنین با توجه به میزان کاهش ۶۸ درصدی ارسال داده در روش رخداد-تحریک می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده رخداد-تحریک طراحی شده با حفظ کارایی سیستم در حد یک روش بسیار توانمند مانند SDRE میزان قابل توجهی استفاده از شبکه ارتباطی را کاهش می‌دهد. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان بر بسیاری از محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از شبکه ارتباطی بی‌سیم فائق آمد.

**واژه‌های کلیدی:** شناور زیرسطحی خودکار (AUV)، کنترل‌کننده ردیاب، معادله ریکاتی وابسته به حالت (SDRE)، کنترل رخداد-تحریک

### ۱. مقدمه

امروزه شناورهای زیرسطحی خودکار<sup>۱</sup> (AUV) در پژوهش‌ها، صنعت، کار و صنایع نظامی به ابزاری کاربردی تبدیل شده‌اند و مزایای بسیاری برای فعالیت در دریاها

عمیق دارند. اخیراً تلاش‌هایی برای توسعه شناورهای زیرسطحی خودکار زیست رتیک<sup>۲</sup> (BAUVs) که با الهام از طبیعت ساخته شده‌اند، صورت گرفته که نقش مهم‌تری در تحقیق و جستجوی اقیانوسی ایفا می‌کنند [۱]. با این حال

بازگشت به عقب<sup>۳</sup> یک کنترل کننده مقاوم برای کنترل عمق شناور زیرسطحی خودکار طراحی شده است [۷]. همچنین با استفاده از روش کنترل پیشین، یک کنترل کننده برای ردیابی خط سیر مطلوب در فضای سه بعدی طراحی شده است [۸]. در میان روش های کنترل غیرخطی، روش کنترل مبتنی بر معادله های ریگاتی وابسته به حالت<sup>۴</sup> (SDRE) با توجه به مزایایی که نسبت به روش های دیگر دارد برای استفاده در شناورهای زیرسطحی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۰، ۹، ۱].

روش SDRE ابتدا در سال ۱۹۶۲ برای حل تقریبی مسئله تنظیم در سیستم های غیرخطی ارائه شد [۱۱]. این روش به طور گسترده ای به عنوان یک ابزار منظم، مؤثر و ساده شناخته شده است. ارائه دینامیک های یک سیستم غیرخطی به صورت سیستم خطی وابسته به حالت که شبه خطی سازی<sup>۵</sup> یا خطی سازی توسعه یافته<sup>۶</sup> نامیده می شود، ایده اصلی روش SDRE است [۱۲]. در مقاله های مختلف ویژگی های مفید زیادی برای این روش گفته شده است که از جمله آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد: [۱۳]. الف) طراحی ساده این کنترل کننده ها که به طور مستقیم از روش های خطی الهام گرفته شده اند؛ ب) طراحی به طور مستقیم با نتایج قابل پیش بینی به وسیله تنظیم توابع وزنی مربوط به حالت و سیگنال کنترل که برای شاخص خاص عملکردی فرمول نویسی شده اند. به طور مثال؛ طراح می تواند تابع وزنی مربوط به حالت سیستم را طوری تنظیم کند که سرعت پاسخ سیستم افزایش یابد. اگرچه برای این کار هزینه، به صورت تلاش کنترلی بیشتری متحمل می شود؛ ج) از آنجا که ضرایب وابسته حالت<sup>۷</sup> (SDC) برای ترم های غیرخطی منحصر به فرد نیستند، این روش دارای درجه آزادی بسیاری در طراحی است که می تواند برای بهبود کارایی کلی سیستم استفاده شود؛ د) این روش تمام عوامل غیرخطی ضروری سیستم را حفظ می کند؛ ه) امکان در نظر گرفتن اشباع در سیگنال کنترل در مراحل طراحی کنترل کننده وجود دارد؛ و) روش SDRE دارای مقاومت ذاتی در برابر نامعینی ها و اغتشاشات خارجی است. با توجه به ویژگی های گفته شده و دینامیک های غیرخطی

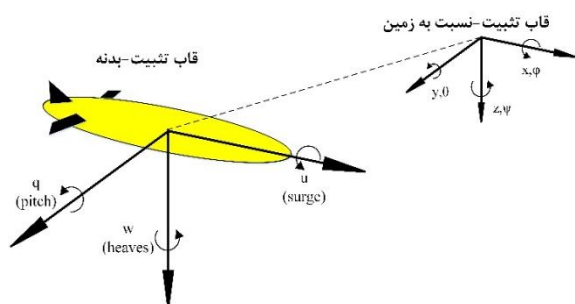
دینامیک شناورهای زیرسطحی خودکار، بسیار غیرخطی بوده و بخش عمده ای از رفتار آن ها با ترم های غیرخطی در مدل ریاضی بیان می شوند. بنابراین در طراحی سیستم کنترل شناورهای زیرسطحی خودکار روش های کنترل خطی کاربرد کمتری دارند. زیرا در این روش ها، قانون کنترل براساس مدل خطی سازی شده سیستم طراحی می شود و با توجه به این که در خطی سازی از ترم های غیرخطی چشم پوشی می شود، قانون کنترل به دست آمده نمی تواند به درستی رفتار سیستم را کنترل کند؛ که حتی ممکن است سبب ناپایداری شناور زیرسطحی شود. در نتیجه، استفاده از روش های کنترل غیرخطی کارآمد در کنترل شناورهای زیرسطحی خودکار مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است که در این بین می توان به موارد زیر اشاره کرد. یک الگوریتم کنترلی برای کنترل مانور شناوری زیرسطحی توسط کریستی و همکاران ارائه شده است. این الگوریتم کنترلی از ترکیب یک الگوریتم تطبیقی مستقیم با روش مقاوم مد لغزشی به دست آمده است [۲]. در پژوهش دیگری با استفاده از روش کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی تطبیقی یک کنترل کننده ردیاب مقاوم برای شناور زیرسطحی خودکار در حضور نامعینی پارامتری و اغتشاشات خارجی طراحی شده است [۳]. با توجه به شناورهای زیرسطحی کنترل از راه دور که مدل ناشناخته ای دارند یک روش کنترل ردیاب تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی مکرر محلی برای شناسایی روی خط سیستم ارائه شده است [۴]. با استفاده از روش کنترل مقاوم انتگرال علامت خطا، یک کنترل کننده مقاوم برای شناور زیرسطحی خودکار در حضور نامعینی پارامتری و اغتشاشات خارجی طراحی شده است [۵]. با توجه به این نکته که اندازه گیری دقیق سرعت شناورهای زیرسطحی خودکار دشوار است و استفاده از پس خور کامل حالت امکان پذیر نیست، یک کنترل کننده ردیاب تطبیقی پس خور خروجی بر اساس شبکه عصبی فازی مکرر پویا ارائه شده است. با توجه به مدل شناورهای زیرسطحی خودکار و المان های قابل کنترل، تحقیقات در حوزه کنترل شناورهای زیرسطحی خودکار را می توان به سه حوزه کنترل عمق، موقعیت و سرعت تقسیم بندی کرد [۶]. برای مثال با استفاده از روش کنترل

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده شناور زیرسطحی خط‌سیر مطلوب تعیین شده توسط کاربر را با دقت دنبال می‌کند و نرخ ارسال داده از کنترل‌کننده به شناور زیرسطحی به مقدار چشم‌گیری کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از این کنترل‌کننده شناور زیرسطحی نه تنها کارایی مطلوبی خواهیم داشت، بلکه نرخ ارسال اطلاعات نیز کاهش می‌یابد. این کاهش ارسال اطلاعات خود می‌تواند سبب کاهش مصرف انرژی و استهلاک شناور زیرسطحی شود. زیرا فرمان کنترلی به باله‌های جانبی شناور زیرسطحی اعمال می‌شود و در صورتی که فرمان کنترلی دائماً ارسال شود، تغییر زاویه باله زیاد است و باعث کاهش عمر عملگر می‌شود. در حالی که با استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده در این مقاله تغییرات زاویه باله مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

سایر قسمت‌های این مقاله به صورت زیرند، در بخش ۲، مدل ریاضی شناور زیرسطحی خودکار در نظر گرفته شده ارائه می‌شود. در بخش ۳، کنترل‌کننده عمق شناور زیرسطحی طراحی می‌شود، در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود و در نهایت در بخش ۵، نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

## ۲. مدل ریاضی شناور زیرسطحی خودکار

یک طرح کلی از شناور زیرسطحی خودکار با سیستم مختصات تثبیت بدنه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: طرح کلی از مدل شناور زیرسطحی

خودکار با مختصات تثبیت بدنه.

قاب تثبیت نسبت به زمین، به عنوان قاب اینرسی مورد بحث است و حرکت شناور زیرسطحی خودکار در یک صفحه عمودی است.  $(x_B, y_B, z_B)$  را مختصات مرکز نیروی

شناورهای زیرسطحی خودکار، در این مقاله از روش SDRE برای کنترل عمق شناورهای زیرسطحی خودکار استفاده می‌شود.

در این مقاله فرض می‌شود که فرمان کنترل با توجه به موانع و مسیر مد نظر، از طریق یک شبکه بی‌سیم به شناور زیرسطحی ارسال می‌شود و در عمل سیستم کنترلی یک سیستم کنترل تحت شبکه است. در اجرای این سیستم کنترل تحت شبکه، یک سری چالش‌ها و محدودیت‌ها وجود دارد که می‌توان به تأخیر زمانی، از دست رفتن اطلاعات، وجود نویز، محدودیت پهنای باند شبکه، محدودیت انرژی و ... اشاره کرد [۱۴]. در این میان، محدودیت پهنای باند شبکه ارتباطی که خود دلیل بعضی از محدودیت‌های دیگر از جمله از دست دادن اطلاعات، تأخیر زمانی و ... است، اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از رویکردهای کنترلی اخیر برای مقابله با این محدودیت‌ها، روش‌های کنترل رخداد-تحریک<sup>۸</sup> است. برخلاف روش‌های سنتی که ارسال اطلاعات در زمان‌های ثابتی صورت می‌گرفت، در روش‌های کنترل رخداد-تحریک تنها زمانی که لازم باشد، ارسال اطلاعات صورت می‌گیرد. با توجه به افزایش روبه‌رشد سیستم‌های کنترل تحت شبکه در سال‌های اخیر و کارایی بالای روش‌های کنترل-رخداد تحریک در سیستم‌های تحت شبکه اخیراً این روش‌های کنترلی مورد توجه بسیاری از محققان در حوزه‌های مختلف قرار گرفته است. برای مثال پژوهش‌های دوو و پنگ، دو نمونه استفاده از روش‌های کنترل رخداد-تحریک در حوزه کنترل ریزشبکه‌ها هستند [۱۵، ۱۶]. در پژوهش تانگ و همکاران یک روش کنترل ردیاب رخداد-تحریک بیان شده است [۱۷]. به عنوان یک نمونه از کاربرد روش کنترل رخداد-تحریک در سیستم‌های کنترل تحت شبکه با هدر رفت اطلاعات، می‌توان به پژوهش پرسترو اشاره کرد [۱۸].

در این مقاله ابتدا با استفاده از روش SDRE یک کنترل‌کننده عمق برای ردیابی خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان طراحی می‌کنیم. سپس بر اساس روش کنترل رخداد-تحریک آن را به یک کنترل‌کننده عمق رخداد-تحریک تبدیل می‌کنیم.

معادله های دیفرانسیل غیر خطی (۱) توصیف می شوند. در این معادله ها  $\theta(t)$  زاویه بالا و پایین رفتن شناور زیرسطحی در صفحه عمودی،  $W(t)$  سرعت جابه جایی،  $\delta_s(t)$  کنترل زاویه باله،  $I_{yy}$  ممان اینرسی وسیله حول محور بالا و پایین رفتن،  $u(t)$  سرعت پیشروی،  $W$  وزن وسیله و  $B_o$  نیروی ارشمیدسی وسیله را نشان می دهند.

$$\begin{aligned} m[\dot{w}(t) - u(t)q(t) - x_G \dot{q}(t) - z_G q^2(t)] &= Z_q \dot{q}(t) \\ &+ Z_w \dot{w}(t) + Z_{uq} u(t)q(t) + Z_{uw} u(t)w(t) \\ &+ Z_{w|w|} w(t)|w(t)| + Z_{q|q|} q(t)|q(t)| \\ &+ (W - B_o) \cos(\theta(t)) + u^2(t)Z_{um} \delta_s(t) \\ I_{yy} \dot{q}(t) + m[x_G(u(t)q(t) - \dot{w}(t)) + z_G w(t)q(t)] \\ &= M_q \dot{q}(t) + M_w \dot{w}(t) + M_{uq} u(t)q(t) + M_{uw} u(t)w(t) + M_{w|w|} w(t)|w(t)| + M_{q|q|} q(t)|q(t)| \\ &\quad - (x_G W - x_B B_o) \cos(\theta(t)) - (z_G W - z_B B_o) \sin(\theta(t)) + M_{uu} u^2(t) \delta_s(t) \\ \dot{z}(t) &= w(t) \cos(\theta(t)) - u(t) \sin(\theta(t)) \\ \theta(t) &= q(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= M^{-1} \begin{bmatrix} Z_{uw} + Z_{w|w|}|w| & Z_{uq} + Z_{q|q|}|q| + m z_G q + m u \\ M_{uw} + M_{w|w|}|w| & M_{uq} + M_{q|q|}|q| - m(x_G u + z_G w) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} \\ &+ M^{-1} \begin{bmatrix} 0 & (W - B_o)(\cos \theta - 1)\theta^{-1} \\ (x_B B_o - x_G W)(\cos \theta - 1)\theta^{-1} - (z_G W - z_B B_o)\theta^{-1} \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} \\ &+ M^{-1} \begin{bmatrix} Z_{uw} \\ M_{uw} \end{bmatrix} u^2 \delta_s + M^{-1} \begin{bmatrix} (W - B_o) \\ (x_B B_o - x_G W) \end{bmatrix} \triangleq A_1(x) \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + A_2(x) \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} + B_1 \delta_s + d_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\theta^{-1} \sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} \triangleq A_3(x) \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + A_4(x) \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$.M = \begin{bmatrix} m - Z_w & -m x_G - Z_q \\ -m x_G - M_w & I_{yy} - M_q \end{bmatrix}, d_1 = M^{-1}[(W - B_o) (x_B B_o - x_G W)]^T, B_1 = M^{-1}[Z_{uu} \ M_{uu}]^T u^2$$

ضرایب وابسته حالت است، فاکتور گرفت. حال معادله (۱) به صورت فرم مشابه خطی (۲) در نظر گرفته می شود. باید یادآور شود که ارائه سیستم معادله (۱) به فرم مشابه خطی، واحد نیست. در واقع با فاکتور گرفتن متفاوت از عوامل غیرخطی می توان ارائه شبه خطی دیگری به دست آورد. البته قانون کنترل به دست آمده نیز متفاوت خواهد بود. با توجه به معادله (۲) ارائه جدیدی از معادله (۱) به شکل مطلوب به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} A_1(x) & A_2(x(t)) \\ A_3(x) & A_4(x(t)) \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s(t) + \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &\triangleq A(x(t))x(t) + B \delta_s(t) + d_1 \\ y(t) &= [0 \ 01 \ 0]x(t) \end{aligned}$$

ارشمیدسی قرار می دهیم. اصل سیستم مختصات تثبیت بدنه، ثابت نگه داشتن مرکز نیروی ارشمیدسی است؛ یعنی  $(x_B \ y_B \ z_B) = 0$ . مختصات مرکز ثقل وسیله را با رابطه ای نسبت به مرکز نیروی ارشمیدسی با  $(x_G \ y_G \ z_G)$  نشان می دهیم [۱]. معادله های جابه جایی و بالا و پایین رفتن وسیله در این صفحه عمودی با رابطه تثبیت حرکت قاب بدنه با مجموعه

اگرچه، در اینجا  $(x_B \ y_B \ z_B) = 0$  است، اما این پارامترها را برای عمومیت معادله (۱) نگه داشته ایم. در اینجا فرض می شود که سرعت پیشروی  $u$  به وسیله یک مکانیزم کنترلی ثابت نگه داشته شده و سرعت جانبی صفر است.

### ۳. طراحی کنترل کننده عمق شناور زیرسطحی خودکار

#### ۳-۱. طراحی کنترل کننده ردیاب SDRE

برای شبه خطی سازی معادله (۱) دینامیک های غیرخطی باید با ساختار خطی دارای ماتریس های ضرایب وابسته حالت نشان داده شوند. برای این هدف از هر تابع برداری غیرخطی فرم  $F(x)$ ، باید به صورت  $F(x) = N(x)x$  که یک ماتریس

که  $\gamma > 0$  فاکتور تخفیف،  $\bar{Q}$  و  $R$  به ترتیب ماتریس‌های وزنی مثبت نیمه معین و معین حالت و ورودی هستند. حال می‌توان با تغییر متغیر زیر مسئله ردیابی را به یک مسئله تنظیم تبدیل کنیم:

$$X(t) \triangleq e^{-\gamma t} [x^T(t) \quad x_d^T(t)]^T, X(0) = X_0 \quad (6)$$

بنابراین ماتریس‌های حالت و ورودی در سیستم جدید به صورت زیر قابل تعریف هستند:

$$A(e^{\gamma t} X(t)) = \left( -\gamma I + \begin{bmatrix} A(x(t)) & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

از این رو تابع هزینه (۵) در مسئله جدید به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$J(X_0, U(t)) = \int_0^\infty X^T(t) Q(e^{\gamma t} X(t)) X(t) + U^T(t) R U(t)$$

$$Q(e^{\gamma t} X(t)) = H^T \bar{Q} H$$

$$H = [0 \quad 0 \quad 10 \quad -10 \quad 0]$$

$$U(t) = e^{-\gamma t} \delta_s(t) \quad (8)$$

سیگنال کنترلی در شناور زیرسطحی به باله‌های جانبی شناور زیرسطحی اعمال می‌شود. بنابراین سیگنال کنترلی محدود است و نمی‌تواند از حد خاصی تجاوز کند؛ زیرا تغییر زاویه باله‌های جانبی محدود است. ما در این مقاله محدوده کاری باله‌های شناور زیرسطحی را  $[-45^\circ, +45^\circ]$  در نظر می‌گیریم. بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن سیستم زیر به جای سیستم اصلی این محدودیت را در طراحی لحاظ کرد:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(e^{\gamma t} X) & \hat{B} S(U) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ U \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tilde{u}(t)$$

$$S(U(t)) = \frac{\text{sat}(U(t), 45^\circ)}{U(t)} \quad (9)$$

که  $\text{sat}(U(t), 45^\circ)$  تابع اشباع مربوط به سیگنال کنترلی  $\tilde{u}(t)$ ، سیگنال ورودی مجازی و 0 نشان دهنده ماتریس صفر با مرتبه مناسب است.

### ۲-۳. طراحی نسخه رخداد-تحریک کنترل کننده ردیاب

رویه‌های نمونه‌گیری سنتی برای کنترل پس‌خور، شامل یک زمان نمونه‌برداری تناوبی هستند، درحالی‌که این ممکن است

$$x(t) = [w(t) \quad q(t) \quad z(t) \quad \theta(t)]^T$$

$$x(0) = [0.5 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \quad (3)$$

0 نشان دهنده ماتریس صفر با مرتبه مناسب و  $d_1$  نشان دهنده اغتشاش است که در اینجا صفر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر عددی پارامترهای مدل شناور زیرسطحی در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است [۱۹].

جدول ۱: پارامترهای هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی خودکار.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$M_{\dot{q}}$	$-4/88 \text{ kg m}^2 / \text{rad}$	$M_w$	$-1/93 \text{ kg m}$
$M_{q q }$	$-1/88 \text{ kg m}^2 / \text{rad}$	$M_{w w }$	$3/18 \text{ kg}$
$M_{uq}$	$-2 \text{ kg m} / \text{rad}$	$M_{uw}$	$24 \text{ kg}$
$Z_{\dot{q}}$	$-1/93 \text{ kg m} / \text{rad}$	$Z_w$	$-25/5 \text{ kg}$
$Z_{q q }$	$-0/632 \text{ kg m} / \text{rad}^2$	$Z_{w w }$	$-131 \text{ kg} / \text{m}$
$Z_{uq}$	$-5/22 \text{ kg} / \text{rad}$	$Z_{uw}$	$-28/6 \text{ kg} / \text{m}$
$M_{uu}$	$-6/15 \text{ kg} / \text{rad}$	$Z_{uu}$	$-6/15 \text{ kg} / (\text{m rad})$

جدول ۲: پارامترهای فیزیکی شناور زیرسطحی خودکار.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$x_G$	۰	$z_G$	$0/0196 \text{ m}$
$x_B$	۰	$z_B$	۰
$W$	$299 \text{ N}$	$B_0$	$306 \text{ N}$
$m$	$30/48 \text{ kg}$	$I_{yy}$	$3/45 \text{ kg} / \text{m}^2$

فرض می‌شود هدف رسیدن از عمق یک متری به عمق ۲/۵ متری آب است که البته با توجه به وجود موانع در آب خط سیر مطلوب توسط کاربر به صورت زیر که یک خط سیر سینوسی میرا است در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_d(t) &= A_d x_d(t) \\ y_d(t) &= [1 \quad 0 \quad 0] x_d(t) \\ x_d(0) &= [1 \quad -0.5 \quad 1] \\ A_d &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

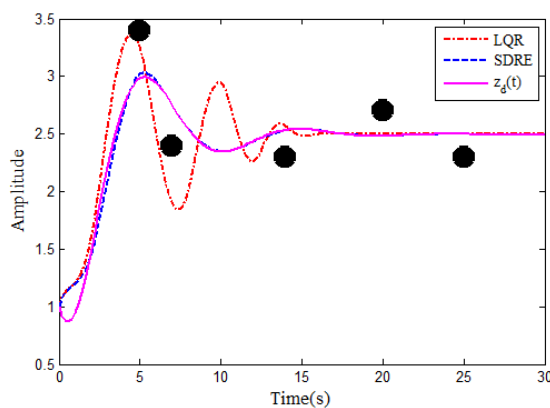
در این مسئله ردیابی هدف کمینه کردن تابع هزینه زیر است [۲۰]:

$$\begin{aligned} J(x_0, \delta_s(t), y_d(t)) \\ = \int_0^\infty e^{-2\gamma t} ((y(t) - y_d(t))^T \bar{Q} ((y(t) - y_d(t)) \\ + \delta_s^T(t) R \delta_s(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

##### ۴-۱. روش SDRE

در این بخش با فرض این که ارتباط بین کنترل‌کننده و شناور زیرسطحی بدون محدودیت است، با استفاده از روش SDRE بیان شده در بخش ۳ یک کنترل‌کننده ردیاب عمق برای شناور زیرسطحی خودکار به گونه‌ای طراحی می‌کنیم که خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان (۴) را دنبال کند. برای ارزیابی نتایج به دست آمده، نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از روش LQR<sup>۱۰</sup> مقایسه شده است. نمودار عمق شناور زیرسطحی و خط‌سیر مطلوب در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲: نمودار عمق شناور زیرسطحی و خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است برای رفتن شناور زیرسطحی از عمق یک متر به عمق ۲/۵ متری در روش LQR امکان برخورد با موانع هست اما در روش SDRE توجه به خط‌سیری که کاربر برای شناور زیرسطحی تعیین می‌کند، شناور زیرسطحی با موانع برخورد نخواهد کرد.

نمودار سیگنال کنترلی در ردیابی خط‌سیر متغیر با زمان در شکل ۳ رسم شده است. با توجه به اینکه فرمان کنترلی در شناور زیرسطحی خودکار مقید است، در طراحی کنترل‌کننده این قید در نظر گرفته شده است. این محدودیت در شکل ۳ قابل مشاهده است.

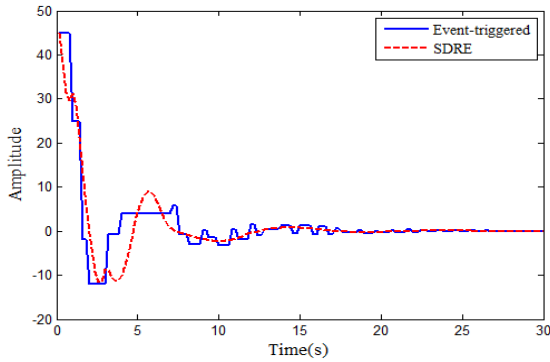
##### ۴-۲. کنترل رخداد-تحریک

در این بخش بر خلاف بخش قبل محدودیت‌های مربوط به کانال ارتباطی بین کنترل‌کننده و شناور زیرسطحی را در نظر

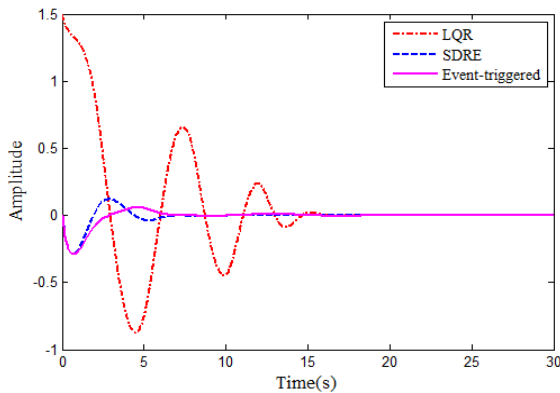
یک انتخاب محافظه‌کارانه باشد. در برخی موارد، استفاده از نمونه‌برداری با فاصله یکسان، از رسیدن به بعضی از اهداف خاص جلوگیری می‌کند. برای نمونه، مسئله مربوط به منابع محدود و ناکافی بودن پهنای باند ارتباطی در کنترل غیرمتمرکز برای سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ یا حتی قدرت پردازش ناکافی برای سیستم‌های سریع، مشکلاتی هستند که اغلب با آن‌ها مواجه می‌شویم. یک رویه جدید این است، تنها زمانی نمونه‌برداری شود که احتیاج است. همچنان که احتیاج به یک فاصله زمانی برای محاسبه قانون کنترل است، نیاز به حفظ ویژگی‌های لازم از سیستم همچون پایداری و همگرایی نیز هست. بنابراین علاقه زیادی به ایجاد سازوکاری برای نمونه‌برداری که به دوره تناوب یا زمان تحریک تکیه نمی‌کند، داریم. در نتیجه در سال‌های اخیر موضوع پس‌خور و نمونه‌برداری رخداد-تحریک توسعه داده شده است. ویژگی اصلی این روش‌ها این است که تصمیم برای اعمال وظیفه کنترل برای این منظور خاص ساخته نمی‌شود، بلکه براساس شرایط خاصی از حالت سیستم به دست می‌آید [۲۱]. سیستم‌های کنترل رخداد-تحریک شامل دو المان هستند، کنترل‌کننده پس‌خور که ورودی کنترل را محاسبه می‌کند، سازوکار فعال‌سازی، که زمان به‌روزرسانی دوباره ورودی کنترل را تعیین می‌کند. در کنترل رخداد-تحریک، شرط تحریک براساس اندازه‌گیری‌های در حال انجام به صورت پیوسته نظاره می‌شود و به محض تجاوز از مقدار معین، یک رویداد فعال می‌شود. شرط تحریک برای مسئله ردیابی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$[X^T(t) \quad E^T(t)] \begin{bmatrix} (\sigma - 1)(Q + K^T R K) & P B K \\ K^T B^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ E \end{bmatrix} \leq 0 \quad (10)$$

که در آن  $E(t)$  خطای بین حالت سیستم در لحظه جاری و آخرین رخداد،  $P$  ماتریسی که متقارن مثبت معینی است که در معادله لیاپانوف سیستم صدق می‌کند،  $K$  بهره پس‌خور پایدارساز و  $\sigma$  فاکتور تحریک است.



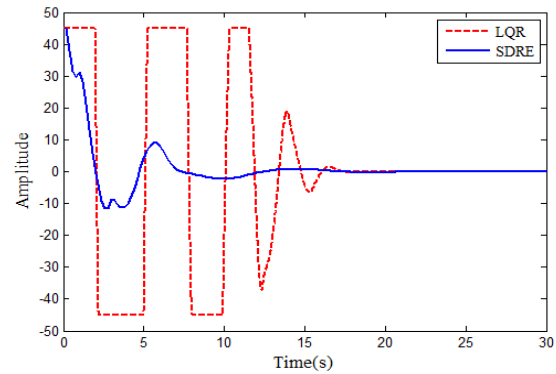
شکل ۵: نمودار سیگنال کنترلی در روش کنترل رخداد-تحریک و SDRE



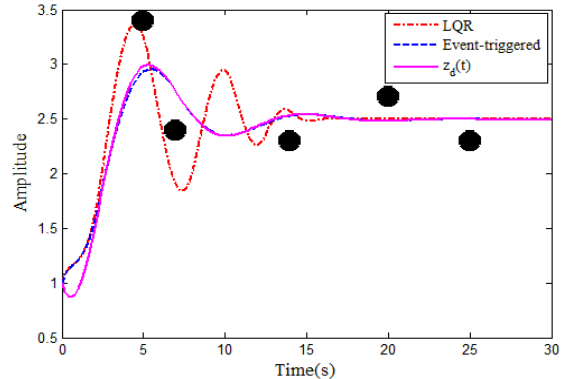
شکل ۶: نمودار خطای ردیابی

در شکل ۶ نمودار مربوط به خطای ردیابی در هر سه روش SDRE، LQR و رخداد-تحریک آمده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، خطای حالت گذرا در روش LQR در ابتدا مقدار قابل توجهی است که بعد از گذشت تقریباً ۱۷ ثانیه صفر می‌شود. خطای حالت گذرا در دو روش SDRE و رخداد-تحریک کوچک است که با گذشت چند ثانیه صفر می‌شود و شناور زیرسطحی دقیقاً خط‌سیر مطلوب را دنبال می‌کند. دلیل مقدار بالای خطای حالت گذرا در روش LQR خطی بودن این روش است. همان‌طور که در مقدمه نیز بیان شد، شناور زیرسطحی خودکار دارای رفتار غیرخطی است و یک کنترل‌کننده خطی نمی‌تواند به درستی رفتار شناور زیرسطحی خودکار را کنترل کند. در روش SDRE با توجه به غیرخطی بودن روش کنترلی خطای ردیابی در همان چند ثانیه ابتدایی صفر شده است. در روش رخداد-تحریک با توجه به اینکه روش کنترلی بر مبنای همان روش SDRE است، خطای ردیابی در همان چند ثانیه

می‌گیریم. با توجه به محدودیت پهنای باند و توان مصرفی در شبکه ارتباطی با استفاده از روش کنترل رخداد-تحریک یک کنترل‌کننده دیجیتال را طوری طراحی می‌کنیم که نرخ انتقال داده در شبکه با حفظ پایداری و کارایی سیستم تا حد ممکن کاهش یابد. در این کنترل‌کننده دیجیتال دوره نمونه برداری را  $0.2$  ثانیه در نظر می‌گیریم. بنابراین اطلاعات مربوط به حالت شناور زیرسطحی هر  $0.2$  ثانیه یک بار به کنترل‌کننده ارسال می‌شود و فرمان کنترلی تنها زمانی ارسال می‌شود که نیاز باشد و تا ارسال بعدی فرمان کنترلی، این فرمان به سیستم اعمال می‌شود. نمودار مربوط به عمق شناور زیرسطحی و خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان در شکل ۴ رسم شده است.



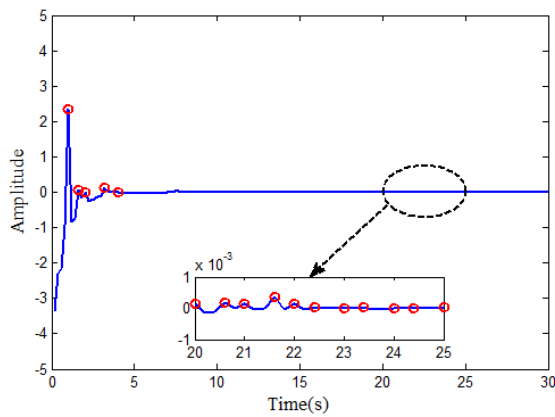
شکل ۳: نمودار سیگنال کنترلی در ردیابی خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان



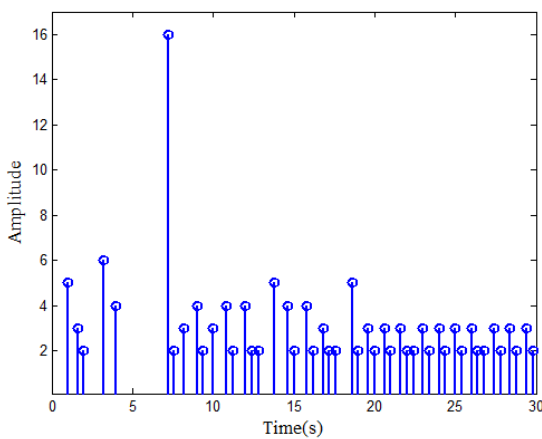
شکل ۴: نمودار عمق شناور زیرسطحی و خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان

نمودار مربوط به سیگنال کنترلی در این روش و روش SDRE در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، سیگنال کنترلی در محدوده مجاز مربوط به زاویه باله‌های شناور زیرسطحی تغییر کرده است.





شکل ۷: نمودار شرط تحریک



شکل ۸: نمودار فواصل بین وقوع رخداد

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به کاربردهای مختلف و روزافزون شناورهای زیرسطحی خودکار در صنایع مختلف یک کنترل کننده ردیاب عمق برای شناورهای زیرسطحی خودکار به منظور ردیابی خط سیر مطلوب متغیر با زمان بر مبنای روش SDRE طراحی شده است. خط سیر مطلوب توسط یک کاربر خارج از آب تعیین و ارتباط بین کاربر و شناور با یک شبکه ارتباطی بی سیم برقرار می شود. به دلیل وجود چالش ها و محدودیت ها استفاده از شبکه ارتباطی بی سیم همانند محدودیت پهنای باند، محدودیت انرژی، تأخیر زمانی، از دست دادن اطلاعات و ... به دلیل عدم دسترسی به یک شبکه ارتباطی بی سیم ایده آل با پهنای باند بالا در زیر آب از روش کنترل رخداد-تحریک برای کاهش نرخ ارسال اطلاعات استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که به دو هدف اصلی در طراحی کنترل کننده یعنی

اول با اختلاف ۲ ثانیه از روش SDRE صفر شده است. این اختلاف ناشی از این است که فرمان کنترلی در این روش برخلاف روش SDRE که به صورت پیوسته ارسال می شود، تنها در لحظات تحریک رخداد که خود بر مبنای خطای حالت شناور زیرسطحی است، ارسال می شود.

لازم به یادآوری است در روش LQR خطای ردیابی نسبت به خط سیر مطلوب ثابت ۲/۵ متر و در روش های SDRE و رخداد-تحریک نسبت به خط سیر مطلوب متغیر با زمان (۳) محاسبه شده است. به منظور ارزیابی کنترل کننده رخداد-تحریک طراحی شده در این مقاله مقادیر مربوط به تابع هزینه، میانگین مربع خطای ردیابی و درصد استفاده از شبکه ارتباطی برای دو روش رخداد-تحریک و SDRE در جدول ۳ آمده است. با توجه به توضیحات گفته شده در خصوص روش کنترل رخداد-تحریک انتظار می رود که با استفاده از این روش مادامی که کارایی سیستم حفظ می شود، نرخ انتقال داده کاهش یابد. بر اساس مقادیر مربوط به معیارهای جدول ۳ در روش کنترل رخداد-تحریک با حفظ کارایی سیستم میزان استفاده از شبکه ارتباطی به میزان قابل توجهی (۶۸٪) کاهش یافته است. بنابراین می توان گفت که کنترل کننده رخداد-تحریک طراحی شده دو هدف اصلی رسیدن به کارایی مطلوب سیستم و کاهش نرخ انتقال داده را به طور هم زمان تضمین کرده است. از این رو کنترل کننده رخداد-تحریک می تواند یک کنترل کننده بسیار مفید و کاربردی در این حوزه باشد.

جدول ۳: مقایسه دو روش SDRE و رخداد-تحریک استفاده شده

روش کنترلی	تابع هزینه	میانگین مربع خطای ردیابی	درصد استفاده از شبکه ارتباطی
SDRE	۶/۶۶	۰/۰۰۰۶۳۸	۱۰۰٪
رخداد-تحریک	۸/۵۹	۰/۰۰۰۶۵۶	۳۲٪

در شکل ۷ نمودار شرط تحریک که لحظات تحریک در آن مشخص شده و در شکل ۸ نمودار فواصل بین رخداد رسم شده است.



- [9] Geranmehr B, Nekoo SR. The state-dependent set-point regulation and tracking control of horizontal motion of AUV. 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM); 2014 Oct 15; Tehran. IEEE; 2014. p. 007-012.
- [10] Yan ZP, Deng C, Zhou JJ, Zhao YF. Research on dive plane trajectory tracking control method of AUV under current disturbance. Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation; 2012 Jul 6; Beijing. IEEE; 2012. p. 3887-91. doi: 10.1109/WCICA.2012.6359121.
- [11] Pearson JD. Approximation methods in optimal control I. Sub-optimal control. International Journal of Electronics. 1962 Nov 1;13(5):453-69.
- [12] Cimen T. Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2012 Jul;35(4):1025-47.
- [13] Liang YW, Lin LG. Analysis of SDC matrices for successfully implementing the SDRE scheme. Automatica. 2013 Oct 1;49(10):3120-4.
- [14] Gupta RA, Chow MY. Networked control system: Overview and research trends. IEEE transactions on industrial electronics. 2009 Nov 6;57(7):2527-35.
- [15] Wan P, Lemmon MD. Optimal power flow in microgrids using event-triggered optimization. Proceedings of the 2010 American Control Conference; 2010 Jun 30; Baltimore. IEEE; 2010. p. 2521-26. doi: 10.1109/ACC.2010.5530582
- [16] Dou CX, Liu B, Guerrero JM. MAS based event-triggered hybrid control for smart microgrids. IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; 2013 Nov 10; Vienna. IEEE; 2013. p. 1712-17. doi: 10.1109/IECON.2013.6699390
- [17] Peng P, Hao F. Model-based event-triggered tracking control of linear systems. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC); 2016 Jul 27; Chengdu. IEEE; 2016. p. 7468-73. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554541.
- [18] Tang Y, Gao H, Kurths J. Robust  $H_\infty$  self-triggered Control of Networked Systems Under Packet Dropouts. IEEE Transactions on cybernetics. 2015 Dec 7;46(12):3294-305.
- [19] Presterro TT. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle [dissertation]. Massachusetts institute of technology; 2001.
- ردیابی خط‌سیر مطلوب و کاهش نرخ ارسال داده به طور هم‌زمان رسیده‌ایم. در واقع، در عین حال که کارایی سیستم به نحوه احسن حفظ شده و شناور زیرسطحی خط‌سیر مطلوب متغیر با زمان را به خوبی دنبال کرده است. نرخ ارسال اطلاعات از کنترل‌کننده به شناور زیرسطحی به میزان قابل توجهی (۶۸٪) کاهش یافته است. بنابراین با استفاده از این کاهش نرخ ارسال اطلاعات می‌توان بر بسیاری از مشکلات از جمله محدودیت پهنای باند شبکه ارتباطی، تأخیر زمانی، محدودیت انرژی و ... فائق آمد.

## مراجع

- [1] Naik MS, Singh SN. State-dependent Riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints. Ocean Engineering. 2007 Aug 1;34(11-12):1711-23.
- [2] Cristi R, Papoulias FA, Healey AJ. Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane. IEEE journal of Oceanic Engineering. 1990 Jul;15(3):152-60.
- [3] Qiao L, Zhang W. Adaptive non-singular integral terminal sliding mode tracking control for autonomous underwater vehicles. IET Control Theory & Applications. 2017 Feb 16;11(8):1293-306.
- [4] Chu Z, Zhu D, Yang SX. Observer-based adaptive neural network trajectory tracking control for remotely operated vehicle. IEEE Transactions on Neural networks and learning systems. 2016 Apr 12;28(7):1633-45.
- [5] Fischer N, Hughes D, Walters P, Schwartz EM, Dixon WE. Nonlinear RISE-based control of an autonomous underwater vehicle. IEEE Transactions on Robotics. 2014 Mar 14;30(4):845-52.
- [6] Zhang LJ, Qi X, Pang YJ. Adaptive output feedback control based on DRFNN for AUV. Ocean Engineering. 2009 Jul 1;36(9-10):716-22.
- [7] Lapierre L. Robust diving control of an AUV. Ocean Engineering. 2009 Jan 1;36(1):92-104.
- [8] Shen C, Shi Y, Buckham B. Nonlinear model predictive control for trajectory tracking of an AUV: A distributed implementation. IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC); 2016 Dec 12; Las Vegas. IEEE; 2016. p. 5998-6003.

- [20] Batmani Y, Davoodi M, Meskin N. Nonlinear suboptimal tracking controller design using state-dependent Riccati equation technique. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2016 Oct 31;25(5):1833-9.
- [21] Heemels WP, Johansson KH, Tabuada P. An introduction to event-triggered and self-triggered control. 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC); 2012 Dec 10; Maui, HI. IEEE;2012. p.3270-85. doi: 10.1109/CDC.2012.6425820.

### پی نوشت

1. Autonomous Underwater Vehicle
2. Biorobotic Autonomous Underwater Vehicles
3. Back-stepping
4. State-Dependent Riccati Equation
5. Pseudo linearization
6. Extended linearization
7. State-Dependent Coefficient
8. Event-triggered
9. Discount factor
10. Linear Quadratic Regulator