



ایجاد امن ترین مسیر جهت حرکت یک وسیله نقلیه زیر سطحی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات و هدایت آن در مسیر تولید شده به وسیله کنترل کننده فازی

احسان ذاکری¹، سعید فراहत^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* زاهدان، صندوق پستی 98167-44975، farahat@hamoon.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 فروردین 1393
پذیرش: 07 مرداد 1393
ارائه در سایت: 23 مهر 1393
کلید واژگان:
وسیله نقلیه زیرسطحی
تولید مسیر هموار و امن
روش بهینه سازی تجمع ذرات
کنترل کننده فازی

چکیده

در این تحقیق ایجاد مسیر امن و هموار که دارای کمترین میزان تهدید به خطر است برای وسایل نقلیه زیر سطحی در نظر گرفته شده است. برای این منظور توابع هموار و پیوسته سه گانه ای با ماهیت سینوسی تعریف شده اند که نشان دهنده مسیر در فضای سه بعدی هستند و سپس پارامترهای این توابع با استفاده از روش بهینه سازی تجمع ذرات، جهت ایجاد مسیر امن بدست آورده شده است. برای هر نقطه از محیط، مقداری به عنوان خطر در آن نقطه در نظر گرفته شده است. تابع هدف جهت بهینه سازی، انتگرال مقدار خطر بر روی مسیر تولید شده می باشد. مسیر تولید شده با روشی به سیگنال های مطلوب جهت کنترل وسیله تبدیل شده است، همچنین وسیله نقلیه زیر سطحی با آرایش جدیدی از پیشران ها مدل گردیده است. سپس با طراحی کنترل کننده فازی چند ورودی چند خروجی، وسیله نقلیه در مسیر تولید شده کنترل شده است. از آنجایی که برای طراحی این کنترل کننده از پارامترهای سیستم دینامیکی وسیله نقلیه استفاده نشده است، نسبت به نامعنی های سیستم مقاوم است. در آخر سه محیط با پیچیدگی های متفاوت جهت نشان دادن عملکرد فرآیند تولید مسیر در نظر گرفته شده است که نتایج بدست آمده نشان دهنده عملکرد مطلوب این روش جهت ایجاد مسیر امن و هموار برای محیط های دارای خطر و همچنین طراحی کنترل کننده مناسب می باشد.

Safe path planning and control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) using particle swarm optimization and fuzzy logic control method

Ehsan Zakeri¹, Said Farahat^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

* P.O.B. 98167-44975 Zahedan, Iran, farahat@hamoon.usb.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 March 2014
Accepted 29 July 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
Underwater Vehicle
safe and smooth path planning
particle swarm optimization method
fuzzy controller

ABSTRACT

In this study a safe and smooth path planning containing the slightest risk is considered for an Unmanned Underwater Vehicle (UUV). To do so, three smooth and continuous functions resembling the three dimensional path are introduced and then their parameters are optimized using the particle swarm optimization method to find the safest possible path. For each point in space a numeric value is considered as vulnerability and the objective function is the integral of the vulnerability over the path produced. This path forms controlling signals which, through a TSK fuzzy controller, the UUV is guided. The new arrangement of the propulsion vehicle subsurface was modeled. Since for the design of the controller the parameters of the Under Water Vehicle dynamic system is not used, the control system is robust with respect to parameter uncertainties. In the last section three environments with different complexities are considered to illustrate the creating process's performance of the path and it is concluded that this method demonstrates desired performance in the development of a safe and smooth path through a harmful environment and design of an adequate controller.

1- مقدمه

نقطه مقصد است. تولید مسیر مطلوب و یا بهینه سازی مسیر، یکی از مهمترین مسائل مربوط به وسایل نقلیه زیر سطحی خودکار است و تاکنون نظر محققان و دانشمندان بسیاری را به خود جلب کرده است. هدف بهینه سازی و برنامه ریزی مسیر می تواند عبور در شرایط نامساعد اقیانوسی، مانند جریانهای اقیانوسی باشد. در این باره آلبرتو آوارز و همکارانش در سال 2004 [1] برنامه ریزی و بهینه سازی مسیر یک وسیله نقلیه زیر سطحی خودکار در محیطی با وجود

امروزه ربات های زیرسطحی کاربرهای متنوعی در صنایع دریایی، عملیات های نجات و جستجو و شناسایی محیط زیر آب پیدا کرده اند. وسایل نقلیه زیر سطحی (UUVs)¹ اجزاء زیادی دارند که به طور کلی شامل قسمت مکانیکی، کنترل کننده اتوماتیک و تولید مسیر مطلوب جهت نقل مکان از نقطه شروع به

1- Underwater Vehicles

Please cite this article using:

E. Zakeri, S. Farahat, Safe path planning and control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) using particle swarm optimization and fuzzy logic control method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 199-210, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Zakeri, S. Farahat, Safe path planning and control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) using particle swarm optimization and fuzzy logic control method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 199-210, 2015 (In Persian)

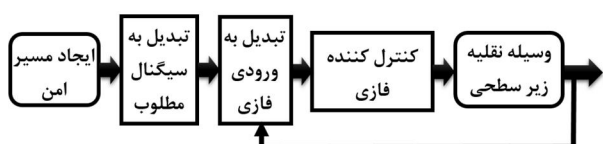
خطری که این گونه وسایل نقلیه را تهدید می‌کند می‌تواند محدوده برد رادارها، مواد مخرب درون آب، حتی برخورد با موانع که قبلاً ذکر شده است و یا هر چیز نامطلوب دیگری باشد که تابه حال به صورت کلی و پیوسته در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق این موضوع به عنوان هدف تولید مسیر در نظر گرفته شده است، همچنین هموار بودن مسیر تولید شده، یکی دیگر از ویژگی‌هایی است که در این روش تولید مسیر رعایت شده است. بنابراین برای ایجاد مسیر از نقطه شروع به نقطه هدف در فضای سه بعدی، ابتدا سه تابع هموار و وابسته که هر یک بیان گر یکی از راساتهای مسیر سه بعدی (x, y, z) می‌باشد، در نظر گرفته شده است. این توابع به صورت تابعی با ماهیتی سینوسی در نظر گرفته شده‌اند تا همواره قدرت تخمین مسیرهای پیچیده و هموار را داشته باشند و همچنین ترمی خطی در آن‌ها اضافه شده تا از نقاط شروع و هدف بگذرند. با تغییر پارامترهای این توابع، مسیرهای مختلف از نقطه شروع به هدف ساخته می‌شود که تعیین مقدار این پارامترها با در نظر گرفتن تابع هدف مناسب و به کارگیری روش بهینه‌سازی مناسب امکان‌پذیر است. با در نظر گرفتن اینکه هر نقطه از محیطی پیرامون وسیله نقلیه دارای میزان مشخصی تهدید به خطر است که وسیله را تهدید می‌کند، تابع هدف به گونه‌ای تعیین شده است که مسیر حاصله کمترین مقدار تهدید خطر و بیشترین امنیت را داشته باشد. جهت بهینه‌سازی از روش تجمع ذرات استفاده شده است چرا که تابع هدف بدست آمده دارای منیسم‌های نسبی فراوان بوده و تنها روش‌های بهینه‌سازی با ماهیت جستجوی تصادفی و دارای جمعیت می‌توانند بر این مسئله غلبه کنند علاوه بر این روش مذکور از سرعت و دقت همگرایی قابل قبولی برخوردار می‌باشد [9].

جهت حرکت وسیله نقلیه در مسیر امن تولید شده، همواره به کنترل کننده‌ای مناسب نیاز است. یکی از روش‌های مناسب جهت کنترل وسیله زیر سطحی، کنترل کننده منطق فازی است که به علت ماهیت مقاوم و غیرخطی آن کاربرد زیادی در این زمینه دارد. از آنجایی که در طراحی این نوع کنترل کننده از پارامترهای سیستم وسیله نقلیه استفاده نمی‌شود، نسبت به نامعینی‌های پارامتری مقاوم است [10]. علاوه بر کنترل کننده، همواره به روشی نیاز است که با در نظر گرفتن شرایط خاصی برای عبور از مسیر (مثلاً عبور با سرعت ثابت)، سیگنال‌های وضعیت مطلوبی را تولید کند و جهت تعقیب، به ورودی کنترل کننده بدهد. این فرآیند در شکل 1 نشان داده شده است.

در ادامه، پیکره‌بندی این تحقیق شامل بخش مدل‌سازی وسیله نقلیه زیر سطحی، طراحی کنترل کننده فازی TSK، ایجاد و بهینه‌سازی مسیر امن و تبدیل به سیگنال‌های مطلوب جهت ورودی فازی کنترل کننده، شبیه‌سازی و در بخش آخر نتیجه‌گیری می‌باشد.

2- مدل ربات زیر سطحی با 6 درجه آزادی

به منظور شبیه‌سازی، ابتدا روابط سینماتیکی بدست آمده و معادلات دینامیکی ربات زیرسطحی توسط روش شناخته شده اوپلر- لاگرانژ استخراج شده است و با استفاده از روش‌های عددی، در بخش سیمولینک نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی شده است [11,12].



شکل 1 شماتیک روند ایجاد مسیر امن و کنترل وسیله نقلیه در مسیر تولید شده به وسیله کنترل کننده فازی

جریان‌های قوی زیر آب و متغییر با زمان آرایه کردند که در آن جهت بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در تحقیقی دیگر داو کروگر و همکاران در سال 2007 [2] برنامه‌ریزی مسیر برای وسیله نقلیه زیرسطحی خودکار درون دهانه رودخانه با جریانهای سریع و همچنین با وجود موانع مختلف ارائه دادند که هدف آن کاهش مصرف انرژی تا رسیدن به مقصد بوده است. همچنین هدف برنامه‌ریزی و یا بهینه‌سازی مسیر می‌تواند ایجاد کوتاهترین مسیر ممکن برای انجام دادن چندین مأموریت پیاپی و یا عبور از محیطی دارای موانع بدون برخورد با آن‌ها و یا برنامه‌ریزی مسیر جهت عکس برداری از بستر دریا باشد. در این زمینه در پژوهش پوپینگا جی و همکارانش در سال 2011 [3] یک روش خودمختار برنامه‌ریزی مسیر برای وسیله نقلیه زیر سطحی شش درجه آزادی ارائه کردند که بر پایه کاوش سریع درختان تصادفی RRT¹ و نقشه راه احتمالاتی با استفاده از روش اتصالات نقشه به عنوان بخشی از نقشه برداری زیر آب می‌باشد. دافی ژو و همکارانش در سال 2011 [4] برنامه ریزی مسیر برای وسیله نقلیه زیر سطحی خودکار در یک محیط پویا با استفاده از کنترل فازی-PSO² را ارائه کردند که در آن کنترل کننده فازی برای ایجاد مسیر بدون برخورد از نقطه شروع به مقصد توسعه داده شده است و از روش بهینه سازی PSO جهت بدست آوردن پارامترهای کنترل کننده فازی استفاده شده است. در پژوهشی دیگر، شیفی لیو و همکارانش در سال 2012 [5] یک الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر بر پایه منطق فازی برای وسیله نقلیه زیر سطحی خودکار (AUV³) در فضای ناشناخته سه بعدی ارائه کردند که در آن، مسئله برنامه‌ریزی مسیر سه بعدی به دو مسئله برنامه‌ریزی مستقل در صفحات افقی و عمودی تجزیه می‌شود که اجتناب از برخورد به موانع و هدف‌یابی در هر صفحه به صورت جداگانه صورت می‌گیرد.

در تحقیقی دیگر ژانگ گانگ لی و همکارانش در سال 2012 [6] به منظور برنامه‌ریزی مسیر وسیله نقلیه زیرسطحی در صفحه افقی، یک روش جدید بر مبنای درخت چهارگانه و بهینه سازی به روش کلنی مورچگان بهبودیافته را ارائه کردند که در آن صفحه افقی با استفاده از درخت چهارگانه مدل شده و سپس بهینه‌سازی صورت گرفته است. فاضل احمد و کالیانموی دب در سال 2013 [7] برنامه‌ریزی مسیری چند هدفه‌ای را برای وسایل نقلیه ارائه کردند که طول مسیر، ایمنی مسیر و هموار بودن مسیر از جمله اهداف بهینه سازی می‌باشد. همچنین جهت بهینه‌سازی از روش مرتب سازی غیرمسلط الگوریتم ژنتیک نخبه گرا و شبکه بندی محیط استفاده کردند. علاوه بر موارد گفته شده، برنامه‌ریزی مسیر علاوه بر وسایل نقلیه زیر سطحی برای ربات‌ها و بخصوص ربات‌های چرخ دار بررسی می‌شود، از جمله تحقیق محرم حبیب‌زاد کورایم و همکارانش در سال 2012 [8] که به طراحی مسیر بهینه یک ربات متحرک چرخ‌دار با معادلات دینامیکی غیرخطی و قیود غیر هولومونیک پرداختند، مسئله طراحی مسیر بهینه ربات متحرک را، به عنوان یک مسئله کنترل بهینه فرمولاسیون کردند و با استفاده از روش غیرمستقیم کنترل بهینگی مسیر، به صورت یک مجموعه معادلات غیرخطی استخراج کردند. سپس این معادلات را به وسیله روش‌های عددی شبیه‌سازی کردند. تحلیل نتایج تجربی نشان دهنده صحت و کارایی روش پیشنهادی در کاربردهای عملی طراحی مسیر بهینه می‌باشد.

علاوه بر اهداف ذکر شده جهت برنامه‌ریزی مسیر، یکی از مسائل مهمی که هر وسیله نقلیه‌ای باید در گذر مسیر خود از نقطه شروع به نقطه هدف از آن بهره‌مند باشد امنیت مسیر می‌باشد. در این تحقیق این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است و راه حلی مؤثر برای آن پیشنهاد و ارائه گردیده است. به طور کلی

1- Rapidly-exploring Random Trees
2- Particle Swarm Optimization
3- Autonomouse Underwater vehicle

در دستگاه E می باشد. سرعت مبدأ چهار چوب دستگاه متصل به وسیله در راستای دستگاه متصل به زمین با V_E و در راستای خودش با V_B نشان داده شده است (سرعت مطلق). همچنین سرعت مرکز جرم وسیله در راستای دستگاه متصل به زمین با V_G نشان داده می شود. سرعت زاویه ای دستگاه متصل به وسیله در راستای دستگاه متصل به زمین با Ω_E و در راستای خودش با Ω_B نشان داده شده است (سرعت مطلق):

$$V_G = V_E + S_B^E (R_B^E P_G) \quad (3)$$

$$V_E = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T \quad (4)$$

$$\Omega_E = [\Omega_{EX} \quad \Omega_{EY} \quad \Omega_{EZ}]^T \quad (5)$$

$$S_B^E = R_B^E (R_B^E)^T = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{EZ} & \Omega_{EY} \\ \Omega_{EZ} & 0 & -\Omega_{EX} \\ -\Omega_{EY} & \Omega_{EX} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

جهت بدست آوردن معادلات دینامیکی وسیله از روش انرژی لاگرانژ-هویلر استفاده شده است. انرژی جنبشی کل سیستم با E_k و همچنین انرژی پتانسیل کل سیستم با E_p نشان داده شده است، بنابراین انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم به صورت زیر بدست می آید:

$$E_k = \frac{1}{2} m V_G^T V_G + \frac{1}{2} \Omega_B^T I_{GB} \Omega_B \quad (7)$$

$$E_p = mg H_G \quad (8)$$

$$H_G = \left(T_B^E \times \begin{bmatrix} P_G \\ 1 \end{bmatrix} \right)^T \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

در معادلات بالا g شتاب گرانش زمین، m جرم وسیله و I_G ماتریس ممان اینرسی وسیله حول مرکز جرم آن و در راستای دستگاه متصل به وسیله می باشد. H_G ارتفاع مرکز جرم وسیله را در دستگاه متصل به زمین نشان می دهد. لاگرانژین سیستم مورد نظر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L = E_k - E_p \quad (10)$$

در نتیجه معادله لاگرانژ به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q$$

$$q = [x \quad y \quad z \quad \theta \quad \phi \quad \psi]^T$$

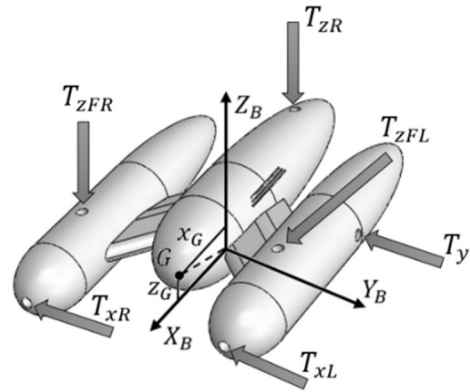
$$Q = [Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad Q_4 \quad Q_5 \quad Q_6]^T \quad (11)$$

در معادله بالا q مختصات تعمیم یافته و Q نیروی تعمیم یافته می باشد که با بدست آوردن کار مجازی حاصل از نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی و پیشرانها قابل محاسبه می باشد.

نیروهای خارجی وارده به وسیله بدون در نظر گرفتن نیروی گرانش شامل موارد زیر می شود:

- نیروی حاصل از رانشگرها (ورودی سیستم).
- نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر وسیله.
- نیروی ارشمیدسی حاصل از وزن سیال جابجا شده.

از آنجایی که پیشرانهای نصب شده در وسیله نسبت به وسیله ثابت هستند لذا جهت نیرویی که ایجاد می کنند نسبت به وسیله ثابت است.



شکل 2 مکان پیشرانها و دستگاه مختصات متصل به وسیله نقلیه B

دستگاه مختصات متصل به زمین E (بر روی سطح سیال (آب) در نظر گرفته شده است) به عنوان دستگاه مختصات مرجع و دستگاه B، دستگاه متصل به وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است که مبدأ آن در مرکز حجم وسیله نقلیه، محور طولی آن در راستای طول وسیله، محور عرضی آن در راستای عرض وسیله و محور عمودی آن عمود بر سطح فوقانی وسیله در نظر گرفته شده است. (شکل 2).

سه دستگاه دیگر با نامهای A_1 ، A_2 و A_3 ، که وضعیت آنها در شکل های 3 الف تا 3 د نشان داده شده است برای بدست آوردن ماتریس انتقال بین دستگاه E و B تعریف شده اند.

راستای دستگاه A_3 در راستای دستگاه E و مبدأ آن در نقطه P_B^E نسبت به دستگاه E قرار دارد. مبدأ دستگاه A_2 بر دستگاه A_3 منطبق است، محور Z هر دو دستگاه برهم منطبق اند و حول محور Z به اندازه زاویه θ نسبت به دستگاه A_3 دوران می کند. مبدأ دستگاه A_1 بر دستگاه A_2 منطبق است، محور Y هر دو دستگاه برهم منطبق اند و حول محور Y به اندازه زاویه ϕ نسبت به دستگاه A_2 دوران می کند. مبدأ دستگاه B بر دستگاه A_1 منطبق است، محور X هر دو دستگاه برهم منطبق اند و حول محور X به اندازه زاویه ψ نسبت به دستگاه A_1 دوران می کند. شکل های (3 الف تا 3 د).

مرکز جرم وسیله در نقطه P_G نسبت به مختصات متصل به وسیله قرار دارد:

$$P_G = [x_G \quad y_G \quad z_G]^T \quad (1)$$

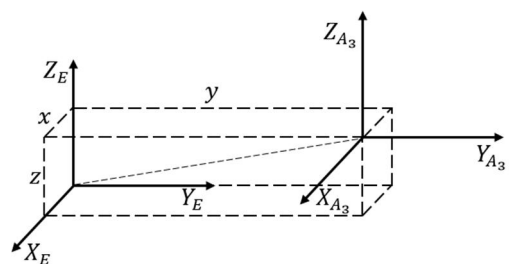
بنابراین ماتریس دوران و به طور کلی ماتریس انتقال دستگاه متصل به وسیله نقلیه نسبت به دستگاه مرجع با توجه θ ، ϕ و ψ که زوایای اولیه بین دستگاه های B و E هستند به صورت زیر بدست می آید:

$$R_B^E = \begin{bmatrix} c\theta c\phi & c\theta s\phi \psi - s\theta c\psi & c\theta s\phi c\psi + s\theta s\psi \\ s\theta c\phi & s\theta s\phi \psi + c\theta c\psi & s\theta s\phi c\psi + c\theta s\psi \\ -s\phi & c\phi \psi & c\phi c\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

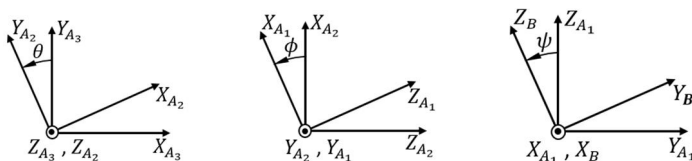
$$T_B^E = \begin{bmatrix} R_B^E & P_B^E \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_B^E = [x \quad y \quad z]^T$$

همان طور که در شکل 3 الف نشان داده شده است P_B^E مکان مبدأ دستگاه B



شکل 3 الف رابطه دستگاه متصل به زمین E و دستگاه A_3



شکل 3 ب رابطه دستگاه A_1 و B شکل 3 ج رابطه دستگاه A_2 و A_1 شکل 3 د رابطه دستگاه A_3 و A_2

$$\delta w = \delta w_{T_{XR}} + \delta w_{T_{XL}} + \delta w_{T_Y} + \delta w_{T_{ZR}} + \delta w_{T_{ZFR}} + \delta w_{T_{ZFL}} + \delta w_H + \delta w_{V_W} \quad (19)$$

و در آخر نیروهای تعمیم یافته به صورت زیر بدست می آیند:

$$Q_1 = (\delta w)_{\delta x}, Q_2 = (\delta w)_{\delta y}, Q_3 = (\delta w)_{\delta z} \quad (20)$$

در معادلات بالا منظور از $(\delta w)_{\delta^*}$ ضریب δ^* در عبارت δw می باشد. با اعمال روش اولر لاگرانژ معادله نهایی دینامیکی به فرم ماتریسی زیر بدست می آید:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = H(q)U \quad (21)$$

در معادله بالا M ماتریس 6×6 در 6 اینرسی، C بردار 6×1 کوریولیس و G بردار 6×1 گرانش است. H ماتریس 6×6 در 6 آرایش ورودی ها و U بردار 6×1 ورودی ها است و به صورت زیر است:

$$U = [F_{T_{XR}} \quad F_{T_{XL}} \quad F_{T_Y} \quad F_{T_{ZR}} \quad F_{T_{ZFR}} \quad F_{T_{ZFL}}]^T \quad (22)$$

3- کنترل کننده فازی

کنترل کننده فازی جزء دسته کنترل کننده هایی است که در طراحی آن نیازی به مدل دینامیکی سیستم نیست و تنها اطلاعات کلی از نحوه رفتار سیستم، نسبت به ورودی های مختلف کفایت می کند. از آنجایی که در طراحی این نوع کنترل کننده از مدل دینامیکی و پارامترهای سیستم استفاده نمی شود، پس نامعینی پارامترهای سیستم بر عملکرد کلی سیستم کنترل و پایداری سیستم تاثیری ندارد و در حقیقت کنترل کننده فازی نسبت به آن ها مقاوم است [14]. در این تحقیق از کنترل کننده فازی TSK استفاده شده است که طراحی آن مراحل زیر را دارد:

- تعیین نوع و تعداد ورودی کنترل کننده: در این مورد، ورودی کنترل کننده خطا و سرعت خطای متغیرهایی است که وضعیت سیستم را نشان می دهند که جمعا 12 ورودی برای کنترل کننده فازی را تشکیل می دهند. سیستم وسیله نقلیه سیستمی 6 درجه آزادی است، که دارای 6 ورودی و 12 (مختصات تعمیم یافته و سرعت آن ها $\dot{q}$, q) خروجی است. این خروجی ها با اعمال تغییرات زیر به ورودی کنترل کننده فازی که با $\dot{O}_T$, $\dot{O}_R$, O_T , O_R نشان داده شده تبدیل می شوند:

$$q = [x \quad y \quad z \quad \theta \quad \phi \quad \psi]^T \quad (23)$$

$$q_d = [x_d \quad y_d \quad z_d \quad \theta_d \quad \phi_d \quad \psi_d]^T$$

$$[O_T \quad 1]^T = T_G^B \times [x_d \quad y_d \quad z_d \quad 1]^T = [O_{Tx} \quad O_{Ty} \quad O_{Tz} \quad 1]^T$$

$$O_T = [\dot{O}_{Tx} \quad \dot{O}_{Ty} \quad \dot{O}_{Tz}]^T \quad (24)$$

$$O_R = R_d^B(\beta, \bar{R}) = [\beta \hat{k}_x \quad \beta \hat{k}_y \quad \beta \hat{k}_z]^T = [O_{Rx} \quad O_{Ry} \quad O_{Rz}]^T \quad (25)$$

$$\dot{O}_R = [\dot{O}_{Rx} \quad \dot{O}_{Ry} \quad \dot{O}_{Rz}]^T$$

$$\beta = \text{Acos}\left(\frac{r_{d11}^B + r_{d22}^B + r_{d33}^B - 1}{2}\right) \quad (26)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{2 \sin(\beta)} \begin{bmatrix} r_{d32}^B - r_{d23}^B \\ r_{d13}^B - r_{d31}^B \\ r_{d21}^B - r_{d12}^B \end{bmatrix} \quad (27)$$

با استفاده از 23 و روابط سینماتیکی [10] بدست آورده شده است. در معادله بالا q_d مقادیر مطلوب، $\bar{R}$ بردار یکای است که اگر به اندازه زاویه β حول آن دوران انجام شود، دستگاه جسم بر دستگاه مطلوب منطبق می شود.

- تعیین نوع و تعداد خروجی کنترل کننده: در سیستم مورد نظر خروجی کنترل کننده نیروی های حاصله از پیشران ها می باشد که جمعا 6 خروجی را تشکیل می دهند.

- تعیین تعداد، نوع و پارامترهای توابع عضویت در قسمت ورودی سیستم کنترل کننده فازی: در سیستم مورد نظر برای هر ورودی وضعیت، 7 تابع عضویت از نوع گوسی و سیگموید در نظر شده است که به ترتیب برای ورودی های خیلی خیلی کوچک تا خیلی خیلی بزرگ به صورت زیر نام گذاری شده اند:

مکان و جهت نیروهای حاصله از رانشگرها در دستگاه متصل به وسیله که در واقع همان ورودی سیستم جهت کنترل می باشد در زیر آورده شده است. از آنجایی که پیشران ها به صورت واتر جت در نظر گرفته شده اند دیگر گشتاوری ایجاد نمی کنند چرا که چرخش پروانه موجب ایجاد گشتاور می شود. نام گذاری و مکان پیشران ها در شکل 2 نشان داده شده است.

- $P_{T_{XR}} = (0, y_{T_{XR}}, 0)$ مختصات پیشران T_{XR} در راستای مثبت x
 - $P_{T_{XL}} = (0, y_{T_{XL}}, 0)$ مختصات پیشران T_{XL} در راستای مثبت x
 - $P_{T_Y} = (x_{T_Y}, 0, 0)$ مختصات پیشران T_Y در راستای مثبت y
 - $P_{T_{ZR}} = (x_{T_{ZR}}, 0, 0)$ مختصات پیشران T_{ZR} در راستای مثبت z
 - $P_{T_{FR}} = (x_{T_{ZFR}}, y_{T_{ZFR}}, 0)$ مختصات پیشران T_{FR} در راستای مثبت z
 - $P_{T_{ZFL}} = (x_{T_{ZFL}}, y_{T_{ZFL}}, 0)$ مختصات پیشران T_{ZFL} در راستای مثبت z
- می باشد که تمامی این مختصات ها در دستگاه B تعریف شده اند.

به دلیل تقارن وسیله $x_{T_{ZFL}}$ با $x_{T_{ZFR}}$ برابر در نظر گرفته شده اند. در بالا مختصات محل پیشران ها با P_T در دستگاه B نشان داده شده است. کار مجازی حاصل از نیروهای رانشگرها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\delta w_{T(\cdot)} = F_{T(\cdot)} \left(\left((R_B^E)^T \times (\delta P_B^E + \delta A_B^E \times (R_B^E \times P_{T(\cdot)})) \right) \right) \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در روابط بالا $T(\cdot)$ نام هر یک از پیشران ها، δP_B^E و δA_B^E به ترتیب تغییرات مکان مبدأ و زاویه دستگاه متصل به وسیله نسبت به دستگاه متصل به زمین را نشان می دهند. δw نشان دهنده کار مجازی حاصله است.

مکان و راستای نیروها و گشتاورهای هیدرو دینامیکی، مبدأ و مختصات دستگاه متصل به جسم در نظر گرفته شده است. نیروهای هیدرو دینامیکی از اجزا زیادی تشکیل شده که دو جزء مهم آن نیروی حاصل از جرم اضافه، نیروی نگهدارنده (شامل نیرو و گشتاور درگ و اصطکاک بدنه و سیال) و نیروی ارشمیدسی حاصل از وزن سیال جابه جا شده می باشد:

$$T_H = T_R + T_D \quad (13)$$

در رابطه بالا T_H نیروی هیدرو دینامیکی کل، T_R نیروی هیدرو دینامیکی حاصل از جرم اضافه (نیروی وارده به جسم صلب، بر اثر شتاب جسم، درون سیال) و T_D نیروی هیدرو دینامیکی نگهدارنده می باشد. نیروهای هیدرو دینامیکی حاصل از جرم اضافه به صورت زیر است:

$$T_R = -M_a \ddot{u}_B - C_a(u_B)u_B \quad (14)$$

با متقارن در نظر گرفتن شکل ظاهری وسیله نقلیه زیر سطحی M_a به صورت ماتریس 6×6 در 6 قطری و C_a به صورت ماتریس 6×6 پادمتقارن بدست می آیند [13]. نیروی هیدرو دینامیکی حاصل از اصطکاک بدنه- سیال و درگ به صورت زیر است:

$$T_D = -D(u_B)u_B \quad (15)$$

همچنین D ماتریس 6×6 در 6 قطری در نظر گرفته می شود که مؤلفه های آن وابسته به ضرایب اصطکاک و درگ می باشند و به جنس و شکل بدنه بستگی دارد [13]. کار مجازی حاصل از نیروی هیدرو دینامیکی به صورت زیر است:

$$\delta w_H = (T_H)^T \left(\begin{bmatrix} (R_B^E)^T & 0 \\ 0 & (R_B^E)^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta P_B^E \\ \delta A_B^E \end{bmatrix} \right) \quad (16)$$

نیروی ارشمیدسی وارده به وسیله به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_{V_W} = \rho_w g V_W \quad (17)$$

ρ_w چگالی آب و V_W حجم وسیله نقلیه می باشد. کار مجازی حاصله به صورت زیر است:

$$\delta w_{V_W} = F_{V_W} \delta z \quad (18)$$

که δz تغییرات در راستای Z می باشد. در نتیجه کار مجازی کل به صورت زیر می شود:

در مجموعه های بالا به علت تقارن $T1 = T2$ و $T5 = T6$ و همچنین رابطه زیر برقرار است:

$$0 < Ti_1 < Ti_2 < Ti_3 < Ti_4 < Ti_5 < Ti_6 \quad i = 1:6 \quad (29)$$

جهت بدست آوردن قوانین فازی به تحلیل و بررسی رابطه پیشران ها و حرکت وسیله پرداخته و به کمک آن ها قوانین نوشته شده است.

برای حرکت وسیله در راستای طولی، پیشران های F_{XL} و F_{XR} باید به طور برابر و هم جهت اعمال نیرو کنند (اعمال نیروی مثبت باعث ایجاد شتاب در راستای مثبت طولی و اعمال نیروی منفی باعث ایجاد شتاب در راستای منفی طولی می شود) (شکل 5).

قوانین فازی در راستای طول به صورت زیر فرمول بندی شده اند:

$$Rx_{7(j-1)+i} \quad \text{بنابراین} \quad \begin{pmatrix} o_{Tx} \text{ is } MFx_i \text{ and } \dot{o}_{Tx} \text{ is } MF\dot{x}_j \\ (F_1 = T1_{i+j} \text{ and } F_2 = T2_{i+j} \text{ and } F_3 = 0) \\ \text{and } F_4 = 0 \text{ and } F_5 = 0 \text{ and } F_6 = 0 \end{pmatrix} \quad i = -3:3, j = -3:3 \quad (30)$$

برای حرکت در راستای عرضی، پیشران F_y با اعمال نیرو در این جهت باعث حرکت در این راستا می شود (اعمال نیروی مثبت باعث ایجاد شتاب در راستای مثبت عرضی و اعمال نیروی منفی باعث ایجاد شتاب در راستای منفی عرضی می شود) (شکل 6).

قوانین فازی در راستای عرض به صورت زیر فرمول بندی می شوند:

$$Ry_{7(j-1)+i} \quad \text{بنابراین} \quad \begin{pmatrix} o_{Ty} \text{ is } MFy_i \text{ and } \dot{o}_{Ty} \text{ is } MF\dot{y}_j \\ (F_1 = 0 \text{ and } F_2 = 0 \text{ and } F_3 = T3_{i+j}) \\ \text{and } F_4 = 0 \text{ and } F_5 = 0 \text{ and } F_6 = 0 \end{pmatrix} \quad i = -3:3, j = -3:3 \quad (31)$$

برای حرکت در راستای عمودی، پیشران های F_{ZR} و F_{ZL} با اعمال نیرو در این جهت باعث حرکت در این راستا می شود البته اعمال نیرو باید به گونه ای باشد که باعث ایجاد گشتاور حول مرکز جرم وسیله ایجاد نشود که به فاصله پیشران ها از مرکز جرم دستگاه بستگی دارد (اعمال نیروی مثبت باعث ایجاد شتاب در راستای مثبت ارتفاعی و اعمال نیروی منفی باعث ایجاد شتاب در راستای منفی ارتفاعی می شود) (شکل 7).

قوانین فازی در راستای ارتفاعی به صورت زیر فرمول بندی می شوند:

$$Rz_{7(j-1)+i} \quad \text{بنابراین} \quad \begin{pmatrix} o_{Tz} \text{ is } MFz_i \text{ and } \dot{o}_{Tz} \text{ is } MF\dot{z}_j \\ (F_1 = 0 \text{ and } F_2 = 0 \text{ and } F_3 = 0 \text{ and } F_4 = T4_{i+j} \text{ and } F_5 \\ = Mr \times T5_{i+j} \text{ and } F_6 = Mr \times T6_{i+j}) \end{pmatrix} \quad i = -3:3, j = -3:3 \quad (32)$$

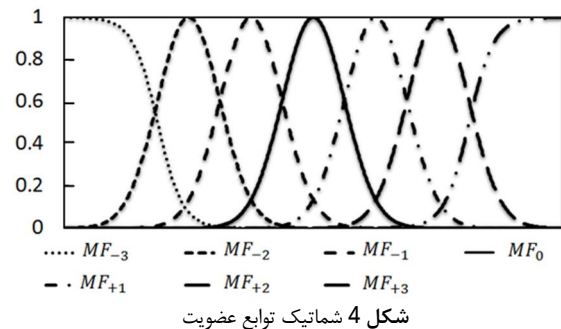
در معادله 32، Mr که جهت جلوگیری از ایجاد گشتاور حول مرکز جرم اعمال شده برابر است با:

$$Mr = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{TZR}}{x_{TZFR}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{TZR}}{x_{TZFL}} \right) \quad (33)$$

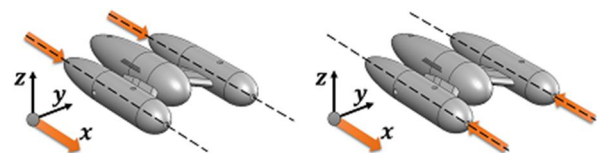
برای چرخش حول محور طولی، پیشران های F_{ZFL} و F_{ZFR} باید به طور برابر و هم خلاف جهت اعمال نیرو کنند که باعث ایجاد کوپل می شود (اعمال کوپل مثبت باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای مثبت طولی و اعمال کوپل منفی باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای منفی طولی می شود) (شکل 8).

قوانین فازی حول محور طولی به صورت زیر فرمول بندی می شوند:

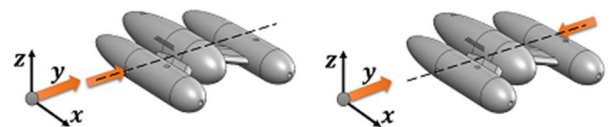
$$R\beta x_{7(j-1)+i} \quad \text{بنابراین} \quad \begin{pmatrix} o_{Rx} \text{ is } MF\beta x_i \text{ and } \dot{o}_{Rx} \text{ is } MF\dot{\beta} x_j \\ (F_1 = 0 \text{ and } F_2 = 0 \text{ and } F_3 = 0 \\ \text{and } F_4 = 0 \text{ and } F_5 = T5_{i-j} \text{ and } F_6 = T6_{i+j}) \end{pmatrix} \quad i = -3:3, j = -3:3 \quad (34)$$



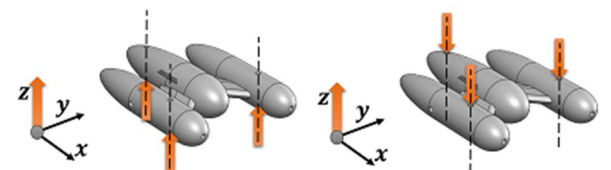
شکل 4 شماتیک توابع عضویت



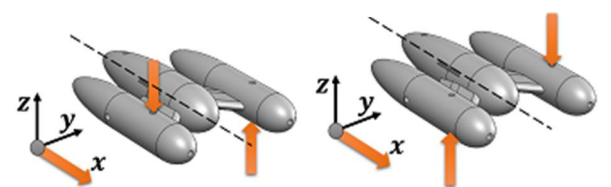
شکل 5 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله در راستای طولی، جهت نوشتن قوانین فازی



شکل 6 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله در راستای عرضی، جهت نوشتن قوانین فازی



شکل 7 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله در راستای عمودی، جهت نوشتن قوانین فازی



شکل 8 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله حول محور طولی، جهت نوشتن قوانین فازی

$MF_{-3}, MF_{-2}, MF_{-1}, MF_0, MF_{+1}, MF_{+2}, MF_{+3}$ و MF_{+3} از نوع تابع سیگموئید و MF_{-2} تا MF_{+2} از نوع تابع گوسی در نظر گرفته شده است که شماتیک این توابع عضویت برای ورودی ها در شکل 4 نشان داده شده است.

• تعیین قوانین فازی: در این تحقیق از روش فازی TSK استفاده شده است. قوانین فازی با توجه به رفتار سیستم نوشته می شوند. از آنجایی که قسمت نتیجه در روش TSK عدد فازی نیست و بلکه حقیقی و همچنین در این مورد عدد ثابت است، خروجی شبکه از میانگین وزنی قسمت نتایج قوانین فازی (وزن ها در واقع اندازه درستی یا به عبارتی مقدار عضویت هر قانون است) بدست می آید.

مجموعه های زیر جهت قسمت خروجی شبکه فازی تعریف شده اند:

$$T = \{-Ti_6 - Ti_5 - Ti_4 - Ti_3 - Ti_2 - Ti_1 \ 0 \ Ti_1 \ Ti_2 \ Ti_3 \ Ti_4 \ Ti_5 \ Ti_6\}, i = 1:6 \quad (28)$$

که مسیر خاصی را از نقطه شروع به نقطه هدف در فضای سه بعدی تشکیل می دهند. همچنین تغییر پارامترهای این توابع باعث ایجاد مسیرهای مختلف از نقطه شروع به هدف می شود. دلیل انتخاب توابعی با ماهیت سینوسی، تخمین تمامی مسیرهای ممکن از نقطه شروع به هدف می باشد، چرا که با استفاده از سری فوریه که ماهیتی کاملاً سینوسی دارد می توان بیشتر توابع را تخمین زد. توابع پیشنهادی به صورت زیر آورده شده اند:

$$f_x(k) = a_{x_1} \sin(b_{x_1}k + c_{x_1}) + \dots + a_{x_n} \sin(b_{x_n}k + c_{x_n}) + d_x k + e_x \quad (38)$$

$$f_y(k) = a_{y_1} \sin(b_{y_1}k + c_{y_1}) + \dots + a_{y_n} \sin(b_{y_n}k + c_{y_n}) + d_y k + e_y \quad (39)$$

$$f_z(k) = a_{z_1} \sin(b_{z_1}k + c_{z_1}) + \dots + a_{z_n} \sin(b_{z_n}k + c_{z_n}) + d_z k + e_z \quad (40)$$

$$k = [k_s \ k_g] \quad (41)$$

$(f_x(k), f_y(k), f_z(k))$ نقاط مسیر هستند که با تغییر k از k_s تا k_g ، از نقطه شروع تا هدف تغییر و مسیر را تولید می کنند. همچنین تعداد مؤلفه های سینوسی موجود در توابع است که هرچه بیشتر باشد باعث ایجاد مسیرهای احتمالی بیشتر می شود. برای اینکه مسیر تولید شده از نقطه ابتدا و انتها بگذرد، شش معادله زیر که نشان دهنده ی ابتدا و انتهای مسیر در نقاط شروع و هدف هستند، باید حل شود تا مقادیر d و e را بدست آید.

$$f_x(k_s) = a_{x_1} \sin(b_{x_1}k_s + c_{x_1}) + \dots + a_{x_n} \sin(b_{x_n}k_s + c_{x_n}) + d_x k_s + e_x = Hx(k_s) + d_x k_s + e_x = P_{s_x} \quad (42)$$

$$f_y(k_s) = a_{y_1} \sin(b_{y_1}k_s + c_{y_1}) + \dots + a_{y_n} \sin(b_{y_n}k_s + c_{y_n}) + d_y k_s + e_y = Hy(k_s) + d_y k_s + e_y = P_{s_y} \quad (43)$$

$$f_z(k_s) = a_{z_1} \sin(b_{z_1}k_s + c_{z_1}) + \dots + a_{z_n} \sin(b_{z_n}k_s + c_{z_n}) + d_z k_s + e_z = Hz(k_s) + d_z k_s + e_z = P_{s_z} \quad (44)$$

$$f_x(k_g) = a_{x_1} \sin(b_{x_1}k_g + c_{x_1}) + \dots + a_{x_n} \sin(b_{x_n}k_g + c_{x_n}) + d_x k_g + e_x = Hx(k_g) + d_x k_g + e_x = P_{g_x} \quad (45)$$

$$f_y(k_g) = a_{y_1} \sin(b_{y_1}k_g + c_{y_1}) + \dots + a_{y_n} \sin(b_{y_n}k_g + c_{y_n}) + d_y k_g + e_y = Hy(k_g) + d_y k_g + e_y = P_{g_y} \quad (46)$$

$$f_z(k_g) = a_{z_1} \sin(b_{z_1}k_g + c_{z_1}) + \dots + a_{z_n} \sin(b_{z_n}k_g + c_{z_n}) + d_z k_g + e_z = Hz(k_g) + d_z k_g + e_z = P_{g_z} \quad (47)$$

در نتیجه:

$$d_x = \frac{Hx(k_g) - Hx(k_s) - P_{g_x} + P_{s_x}}{k_s - k_g} \quad (48)$$

$$d_y = \frac{Hy(k_g) - Hy(k_s) - P_{g_y} + P_{s_y}}{k_s - k_g} \quad (49)$$

$$d_z = \frac{Hz(k_g) - Hz(k_s) - P_{g_z} + P_{s_z}}{k_s - k_g} \quad (50)$$

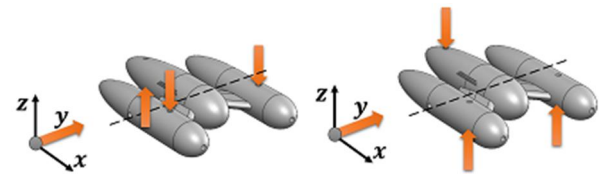
$$e_x = -\frac{(P_{s_x} k_g - Hx(k_s) k_{nop} + k_s (Hx(k_g) - P_{g_x}))}{k_s - k_g} \quad (51)$$

$$e_y = -\frac{(P_{s_y} k_g - Hy(k_s) k_g + k_s (Hy(k_g) - P_{g_y}))}{k_s - k_g} \quad (52)$$

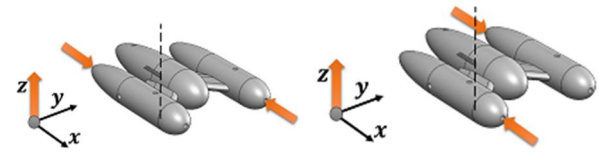
$$e_z = -\frac{(P_{s_z} k_g - Hz(k_s) k_g + k_s (Hz(k_g) - P_{g_z}))}{k_s - k_g} \quad (53)$$

H^* ها جملات با ماهیت سینوسی در درون توابع تولید کننده مسیر هستند. همواره برای بهینه سازی هر مسئله ای باید تابع هدف و متغیرهای بهینه سازی مشخص شوند. در این مسئله متغیرهای بهینه سازی بردارهای n بعدی $a_{x_1}, a_{y_1}, a_{z_1}, b_{x_1}, b_{y_1}, b_{z_1}, c_{x_1}, c_{y_1}, c_{z_1}$ هستند که مقادیر متفاوت آن ها باعث شکل گیری مسیرهای مختلف از نقطه شروع به هدف می شود. بنابراین این پارامترها باید به گونه ای انتخاب شوند که ایمن ترین مسیر را حاصل شوند.

تابع هدف در این مسئله طوری مشخص شده است که کاهش آن به معنای کاهش خطر و یا افزایش امنیت مسیر تولید شده باشد. در نتیجه تابعی با نام DF تعریف شده است که نمایانگر خطر در هر نقطه از فضای پیرامون



شکل 9 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله حول محور عرضی، جهت نوشتن قوانین فازی



شکل 10 رابطه اعمال نیرو و جهت حرکت وسیله حول محور عمودی، جهت نوشتن قوانین فازی

برای چرخش حول محور عرضی، پیشران های F_{zFL} و F_{zFR} باید به طور برابر و هم جهت اعمال نیرو کنند، همچنین پیشران F_{zR} باید مقدار معادل با آن دو پیشران و همچنین خلاف جهت آن ها داشته باشد که باعث ایجاد کوپل می شود (اعمال کوپل مثبت باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای مثبت عرضی و اعمال کوپل منفی باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای منفی عرضی می شود) (شکل 9).

قوانین فازی حول محور عرضی به صورت زیر فرمول بندی می شوند:

$$R\beta y_{7(j-1)+i};$$

بنابراین $(o_{Ry} \text{ is } MF\beta y_i \text{ and } \dot{o}_{Ry} \text{ is } MF\beta y_j)$ اگر

$$(F_1 = 0 \text{ and } F_2 = 0 \text{ and } F_3 = 0 \text{ and } F_4 = u_{4i+j} \text{ and } F_5 = \frac{1}{2}u_{5-i-j} \text{ and } F_6 = \frac{1}{2}u_{6-i-j})$$

$$i = -3: 3, j = -3: 3 \quad (35)$$

برای چرخش حول محور عمودی، پیشران های F_{xL} و F_{xR} باید به طور برابر و خلاف جهت هم اعمال نیرو کنند که باعث ایجاد کوپل می شود (اعمال کوپل مثبت باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای مثبت محور عمودی و اعمال کوپل منفی باعث ایجاد شتاب زاویه ای در راستای منفی محور عمودی می شود) (شکل 10).

قوانین فازی حول محور طولی به صورت زیر فرمول بندی می شوند:

$$R\beta z_{7(j-1)+i};$$

بنابراین $(o_{Rz} \text{ is } MF\beta z_i \text{ and } \dot{o}_{Rz} \text{ is } MF\beta z_j)$ اگر

$$(F_1 = T_{1i+j} \text{ and } F_2 = T_{2-i-j} \text{ and } F_3 = 0 \text{ and } F_4 = 0 \text{ and } F_5 = 0 \text{ and } F_6 = 0)$$

$$i = -3: 3, j = -3: 3 \quad (36)$$

در منطق فازی بالا برای عملگر منطقی and از عملگر ضرب استفاده شده است. مقدار درستی هر قانون با v نشان داده می شود. بنابراین خروجی شبکه فازی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U_i = \frac{\sum v F_i}{\sum v} \text{ for } i = 1: 6 \quad (37)$$

4- ایجاد مسیر ایمن

برای حرکت ایمن از نقطه شروع $P_s = (P_{s_x}, P_{s_y}, P_{s_z})$ به نقطه هدف $P_g = (P_{g_x}, P_{g_y}, P_{g_z})$ در مسیر سه بعدی، انتخاب امن ترین مسیر، همواره یکی از چالش های تولید مسیر بوده است. به عنوان مثال دوری و یا گریز از برد رادارها، دوری از مکان هایی که باعث تخریب و یا آسیب به وسیله زیر سطحی می شود از مزایای تولید چنین مسیری است. جهت تحقق چنین هدفی، توابع پیوسته ای با ماهیت سینوسی برای هر راستای فضای سه بعدی برگزیده شده

- سرعت آن ها V در ابتدا صفر در نظر گرفته می شود.
- مکان بهترین نقطه محاسبه و ذخیره می شود
- مکان بهترین نقطه که هر ذره تاکنون یافته محاسبه و ذخیره می شود (بهترین جواب یافته شده محلی). (بهترین نقطه در ابتدا خود نقاط هستند).
- بهترین نقطه یافته شده توسط تمامی ذره ها ذخیره می شود (بهترین جواب یافته شده جهانی).
- برای مرحله بعد کل جمعیت با استفاده از معادلات 60 و 61 حرکت می کنند و بدین صورت به نقطه بهینه همگرا می گردند.

6- ایجاد سیگنال مطلوب از مسیر امن تولید شده جهت پیمودن مسیر توسط وسیله نقلیه

پس از اینکه مسیر بهینه ساخته شد و پارامترهای مربوطه بدست آمد، نوبت به ایجاد سیگنال های مطلوب جهت کنترل وسیله جهت پیمودن مسیر تولید شده می رسد. منظور از سیگنال های مطلوب سیگنال های $x_d, y_d, z_d, \theta_d, \phi_d, \psi_d$ می باشد که در صورت تعقیب این سیگنال ها به کمک اعمال کنترل کننده، وسیله نقلیه زیرسطحی با شرایط مورد نظر خواسته شده از نقطه شروع حرکت کرده و پس از عبور از مسیر تولید شده به نقطه هدف می رسد. برای این منظور فرض شده است که وسیله با سرعت خطی ثابت V_d مسیر تولید شده را طی کند، همچنین سطح فوقانی وسیله موازی سطح آب و طول وسیله بر تصویر مسیر در صفحه X, Y دستگاه متصل به زمین مماس باشد. بنابراین با در نظر گرفتن سرعت ثابت در مسیر تولید شده معادله زیر بدست می آید:

$$\left(\left(\frac{\partial f_x(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_y(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 \right) \left(\frac{\partial k(t)}{\partial t} \right)^2 = V_d^2 \quad (62)$$

در نتیجه $k(t)$ به صورت زیر بدست می آید:

$$k(t) = \int_{t_s}^t \left(V_d^2 \left(\left(\frac{\partial f_x(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_y(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (63)$$

$k(t_s) = k_s$ در روابط بالا t زمان t_s زمان شروع حرکت از نقطه هدف می باشد. در نتیجه، سیگنال های مطلوب های موقعیت وسیله به صورت زیر می شود:

$$x_d = f_x(k(t)) \quad (64)$$

$$y_d = f_y(k(t)) \quad (65)$$

$$z_d = f_z(k(t)) \quad (66)$$

$$\theta_d = \text{atan2} \left(\frac{\partial f_y(k(t))}{\partial k(t)}, \frac{\partial f_x(k(t))}{\partial k(t)} \right)_t \quad (67)$$

$$\phi_d = 0 \quad (68)$$

$$\psi_d = 0 \quad (69)$$

با تغییر k از k_s تا $k(t_g) = k_g$ ، نسبت به گذشت زمان و اعمال آن در روابط 64 تا 69، سیگنال های مطلوب جهت حرکت وسیله نقلیه در در مسیر ایمن، تولید می شوند.

7- شبیه سازی

جهت شبیه سازی و بهینه سازی مسیر ایمن و هموار و همچنین کنترل وسیله نقلیه زیر سطحی در مسیر به وجود آمده، سه محیط با شرایط خطر متفاوت در نظر گرفته شده است که به ترتیب شرایط پیچیده تری دارند. پارامترهای فیزیکی در نظر گرفته شده برای زیردریایی در جدول 1 نشان داده شده است.

وسيله است و برای هر نقطه از فضای پیرامون وسیله، مقداری مثبت، به میزان خطر در آن نقطه از محیط را به خود می گیرد.

$$DF(x, y, z) \in +\mathbb{R} \quad (54)$$

با توجه به هدف تحقیق، یعنی ایجاد مسیر ایمن، انتگرال میزان خطر بر روی طول مسیر تولید شده می تواند به عنوان هدف بهینه سازی در نظر گرفته شود که در حقیقت کاهش آن به معنای افزایش امنیت مسیر می باشد. PD مشخص کننده میزان خطر مسیر و یا همان انتگرال میزان خطر بر روی طول مسیر می باشد. برای محاسبه PD از روش عددی استفاده شده که با گسسته سازی طول مسیر امکان پذیر است. مسیر تولید شده از نقطه شروع تا پایان به تعداد nop نقطه گسسته سازی و در نتیجه به مجموعه ای از نقاط تبدیل می شود. در نتیجه مقدار PD ، از مجموع میانگین میزان خطر هر دو نقطه متوالی مسیر، ضرب در فاصله ای دو نقطه مذکور بدست می آید که در روابط 55 تا 58 نشان داده شده است. مشخص است که هر چه تعداد نقاط مسیر بیشتر باشد (nop) خطای حاصل از عمل انتگرال گیری کاهش می یابد.

$$Lnt_x(k_i) = f_x(k_i) - f_x(k_{i-1}) \text{ for } k_i, i = 2:nop \quad (55)$$

$$Lnt_y(k_i) = f_y(k_i) - f_y(k_{i-1}) \text{ for } k_i, i = 2:nop \quad (56)$$

$$Lnt_z(k_i) = f_z(k_i) - f_z(k_{i-1}) \text{ for } k_i, i = 2:nop \quad (57)$$

$$PD = \sum_{i=2}^{nop} \left(0.5(Lnt_x^2(k_i) + Lnt_y^2(k_i) + Lnt_z^2(k_i))^{\frac{1}{2}} (DF(f_x(k_i), f_x(k_i), f_x(k_i)) - DF(f_x(k_{i-1}), f_x(k_{i-1}), f_x(k_{i-1}))) \right) \quad (58)$$

از آنجایی که هدف، کاهش میزان خطر (PD) می باشد و بیشتر روش های بهینه سازی برپایه جمعیت، نقطه بیشینه را جستجو می کنند و همچنین علاوه بر آن بعضی از این روش ها مانند الگوریتم ژنتیک و زنبور عسل در محدوده مقدار مثبت تابع هدف (به دلیل اینکه از این مقدار به عنوان میزان احتمال جواب استفاده می کنند) کار می کنند تابع هدف به صورت زیر تعریف شده است:

$$GF = \frac{1}{1 + PD} \quad (59)$$

بنابراین یافتن مقدار بیشینه GF ، منجر به پیدایش کمینه PD که هدف بهینه سازی است می شود، علاوه بر این به دلیل اینکه PD همواره مقداری مثبت است، در نتیجه GF نیز همواره مثبت خواهد بود.

5- بهینه سازی به روش تجمع ذرات (PSO)

روش بهینه سازی تجمع ذرات یکی از الگوریتم های برپایه جمعیت و الهام گرفته از هوش جمعی پرندگان می باشد که همانند الگوریتم هایی نظیر الگوریتم ژنتیک، کلنی مورچگان و... برای بهینه سازی مسائل مختلف به کار می رود. در این الگوریتم، ابتدا، جمعیتی اولیه به صورت تصادفی در محیط جستجو پراکنده شده و مقدار جواب هر ذره محاسبه می شود. سپس هر نقطه به سمت بهترین جواب پیدا شده به وسیله خود ذره و بهترین نقطه پیدا شده توسط کل ذرات با ضرایبی تصادفی حرکت می کند. این روند تا هنگامی که تمامی ذره ها به جوابی معین همگرا شوند ادامه می یابد. با استفاده از فرمول های زیر در هر مرحله به طرف نقطه بهینه حرکت می کنند [9].

$$V_{i+1} = C_1 V_i + C_2 R_2 (G_b - X_i) + C_3 R_3 (L_b - X_i) \quad (60)$$

$$X_{i+1} = X_i + V_{i+1} \quad (61)$$

در معادلات بالا i شماره ی چرخه، X بردار متغیرهای بهینه سازی (ذرات)، C_1, C_2 و C_3 ضرایبی ثابت، R_2 و R_3 اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت بین 0 و 1، G_b مکان بهترین نقطه یافت شده توسط کل ذرات، و L_b بهترین نقطه ای که هر ذره تاکنون یافته است می باشد. روند اجرای الگوریتم بهینه سازی به صورت زیر است:

ابتدا تعدادی جمعیت مشخص در محیط جستجو به صورت تصادفی پراکنده می شود.

واضح است که کم خطرترین مسیر، در محیطی که میزان خطر در همه جای آن برابر است، کوتاه ترین مسیر ممکن می‌باشد که قاعدتا باید خط واصل نقطه شروع و هدف باشد و همان طور که در شکل 12 نشان داده شده است، مسیر امن ساخته شده، تقریباً خط واسط نقطه شروع و هدف است. علاوه بر مسیر تولید شده مسیری که وسیله نقلیه پیموده است تا به نقطه هدف برسد در شکل 12 نشان داده شده است که نشان دهنده عملکرد خوب کنترل کننده فازی اعمالی می‌باشد. همچنین سیگنال‌های مطلوب تولید شده از مسیر بهینه و تعقیب شده توسط وسیله با اعمال کنترل کننده فازی در اشکال 13 الف تا 13 و نشان داده شده است. v_d برابر $0/5 \frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در اشکال 13 الف تا 13 و نشان داده شده است، مکان و وضعیت وسیله پس از حد اکثر 4 ثانیه به مقدار مطلوب همگرا شده است، که با توجه به خطای اولیه و مقدار نیروهای محدود پیشران‌ها قابل قبول می‌باشد. شکل 14 نیروهای اعمالی پیشران‌ها را نشان می‌دهد که حداکثر 6 نیوتن بوده است و مقداری کوچک و معقول می‌باشد.

دومین محیط، محیطی است که در وسط نقطه شروع و هدف آن، استوانه‌ای با شعاع $1/25$ متر به مرکز $(5, 5/2, z)$ و در راستای محور z قرار دارد و میزان تهدید به خطر آن 1003 است و همچنین مابقی محیط میزان تهدید به خطر 3 را دارا می‌باشد. تابع خطر این محیط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DF(x, y, z) = \begin{cases} 1003(x-5)^2 + (y-2.5)^2 < 1.25^2 \\ 3(x-5)^2 + (y-2.5)^2 \geq 1.25^2 \end{cases} \quad (73)$$

نقطه شروع و پایان مسیر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$p_s = [0 \quad 2.5 \quad -2.5]^T \quad (74)$$

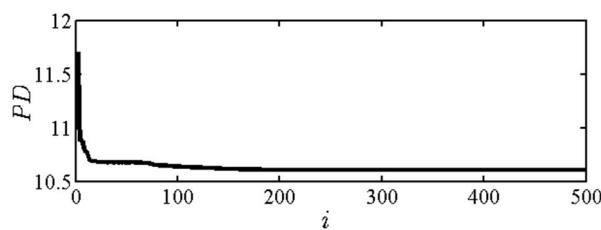
$$p_g = [10 \quad 2.5 \quad -2.5]^T \quad (75)$$

همچنین n که تعداد مولفه‌های سینوسی درون توابع مذکور می‌باشد برابر 3 و nop برابر 1000 در نظر گرفته شده است. جهت بهینه سازی به روش تجمع ذرات، تعداد جمعیت اولیه 300، تعداد تکرار چرخه 500 و ضرایب C_1 و C_2 و C_3 به ترتیب برابر با $0/9$ ، $1/2$ و 1، در نظر گرفته شده است. روند کاهش PD در این محیط در طول چرخه بهینه‌سازی، در شکل 15 نشان داده شده است.

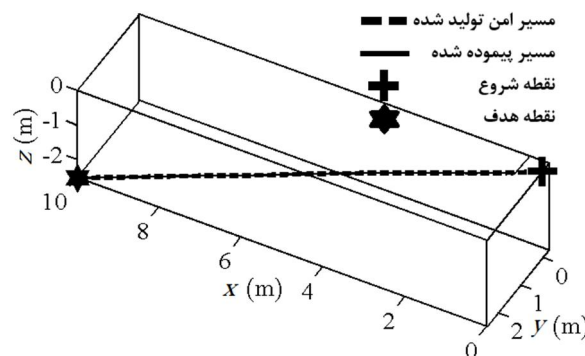
همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده است تقریباً بعد از 150 تکرار PD به جواب بهینه همگرا شده است. در نتیجه این بهینه سازی، مسیری مانند مسیر نشان داده شده در شکل 16 تولید شده است.

در این محیط انتظار می‌رود که مسیر تولید شده به گونه‌ای باشد که استوانه را دور بزند و از نقاط شروع و هدف تقریباً بر آن مماس باشد که شکل 16 نشان دهنده تولید مسیری این چنینی است. علاوه بر مسیر تولید شده مسیری که وسیله نقلیه به وسیله نقلیه پیموده تا به نقطه هدف برسد در شکل 16 نشان داده شده است که نشان دهنده عملکرد خوب کنترل کننده فازی اعمالی می‌باشد. همچنین سیگنال‌های مطلوب تولید شده از مسیر بهینه و تعقیب شده توسط وسیله با اعمال کنترل کننده فازی در اشکال 17 الف تا 17 و نشان داده شده است. v_d برابر $0/2 \frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که از اشکال 17 الف تا 17 و پیداست، مکان و وضعیت وسیله پس از حد اکثر $3/5$ ثانیه به مقدار مطلوب همگرا شده است، که با توجه به خطای اولیه و مقدار نیروهای محدود پیشران‌ها قابل قبول می‌باشد. نیروهای اعمالی پیشران‌ها حداکثر 6 نیوتن می‌باشد که مقداری کوچک و معقول است (شکل 18).



شکل 11 روند کاهش اندازه PD در طول چرخه بهینه سازی به روش تجمع ذرات در محیط اول



شکل 12 مسیر ایمن و هموار تولید شده و مسیر پیموده شده توسط وسیله نقلیه در محیط اول

جدول 1 پارامترهای فیزیکی وسیله نقلیه زیر سطحی

مشخصات فیزیکی	مقدار عددی
I_G	$\begin{bmatrix} 0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0.22 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \text{ kg.m}^2$
m	10 kg
V_w	0.01 m^3
ρ_w	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$[x_G, y_G, z_G]$	$[0, 0, 0] \text{ m}$
$y_{T_{XRY}}$	-0.1 m
$y_{T_{XL}}$	+0.1 m
x_{TY}	0 m
x_{TZR}	-0.1 m
$x_{T_{ZFR}}$	+0.1 m
$y_{T_{ZFR}}$	-0.1 m
$x_{T_{ZFL}}$	+0.1 m
$y_{T_{ZFL}}$	+0.1 m

اولین محیط، محیطی با میزان تهدید خطر یکنواخت در نظر گرفته شده که تابع خطر آن به صورت زیر است:

$$DF(x, y, z) = 1 \quad (70)$$

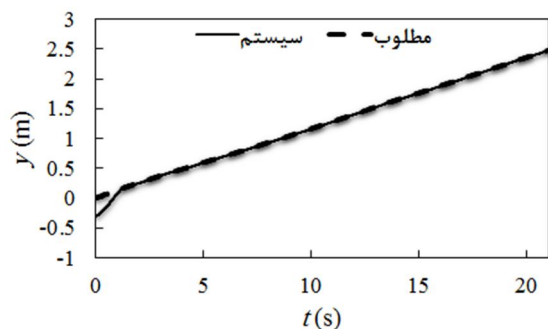
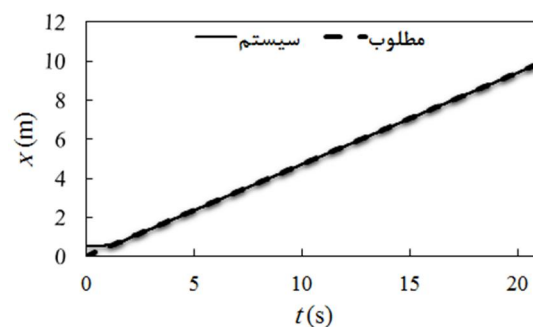
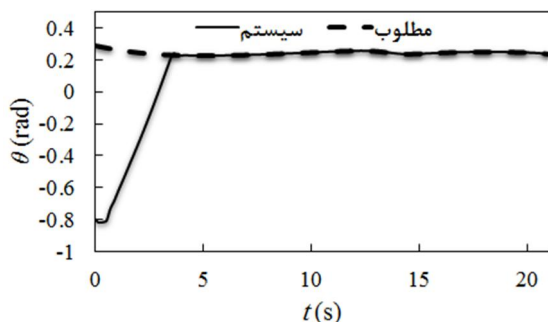
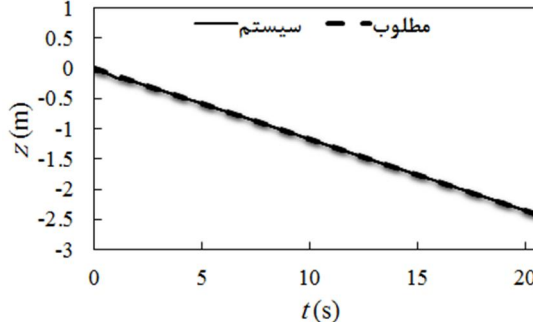
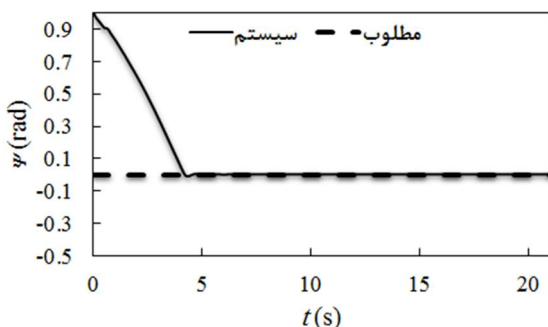
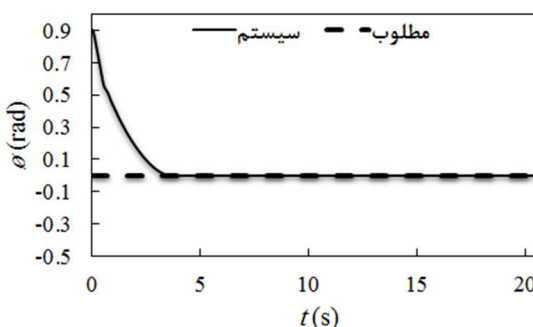
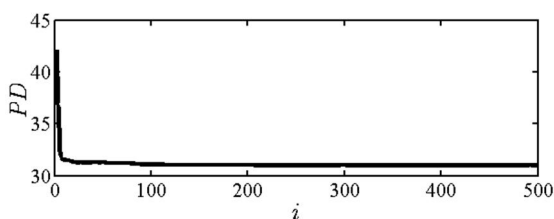
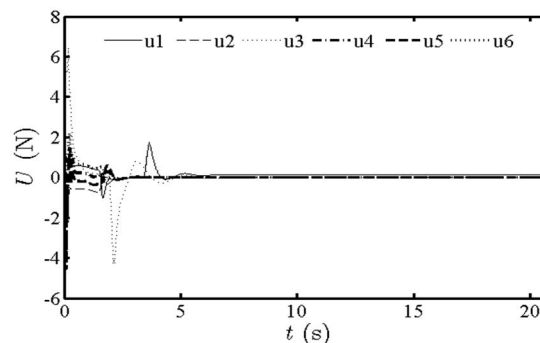
نقطه شروع و پایان مسیر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$p_s = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (71)$$

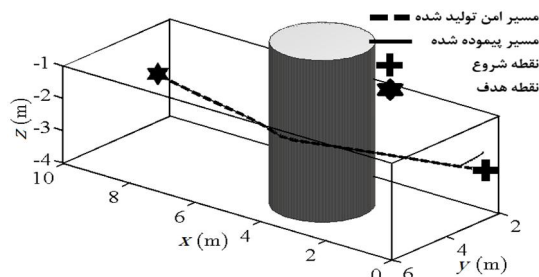
$$p_g = [10 \quad 2.5 \quad -2.5]^T \quad (72)$$

همچنین n که تعداد مولفه‌های سینوسی درون توابع مذکور می‌باشد برابر با 3 و nop برابر 1000 در نظر گرفته شده است. جهت بهینه‌سازی به روش تجمع ذرات، تعداد جمعیت اولیه 300، تعداد تکرار چرخه 500 و ضرایب C_1 و C_2 و C_3 به ترتیب $0/9$ ، $1/2$ و 1، در نظر گرفته شده است که با آزمون و خطا بدست آمده‌اند. روند کاهش PD در این محیط در طول چرخه بهینه سازی، در شکل 11 نشان داده شده است.

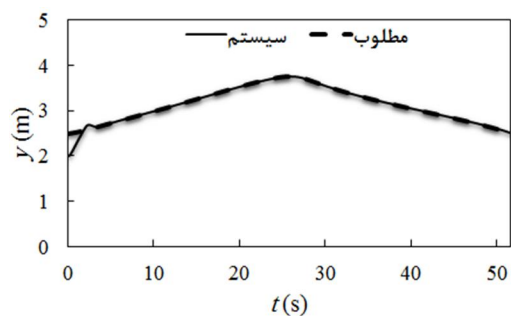
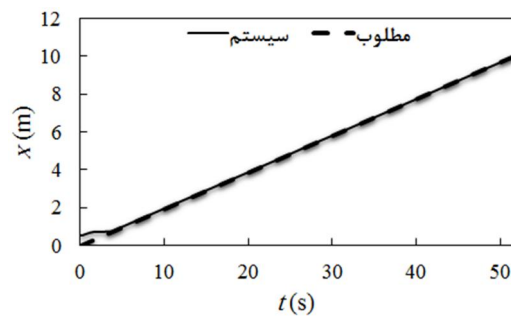
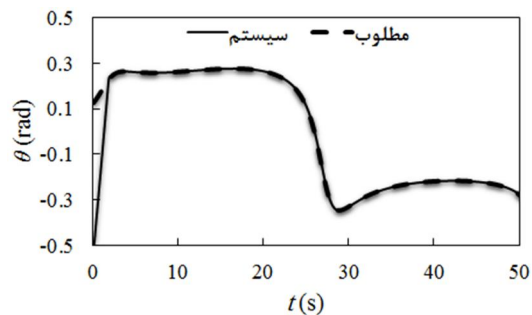
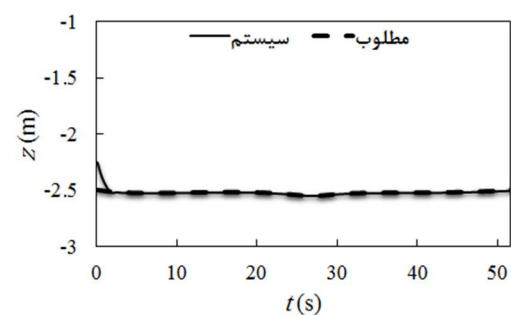
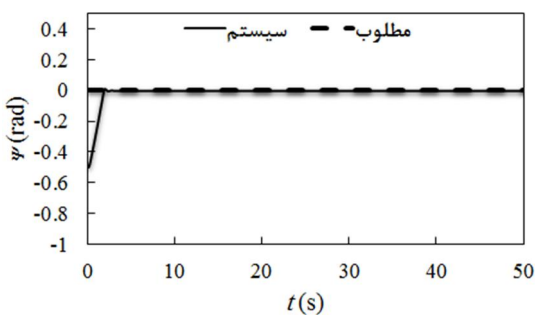
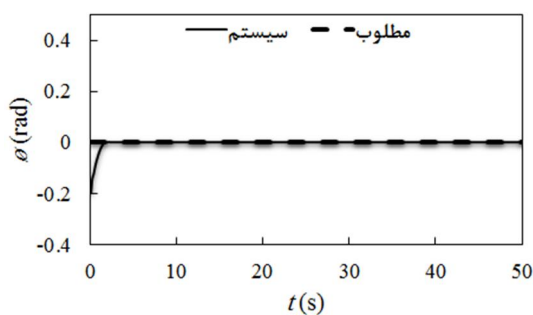
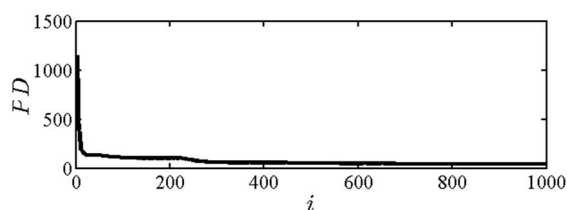
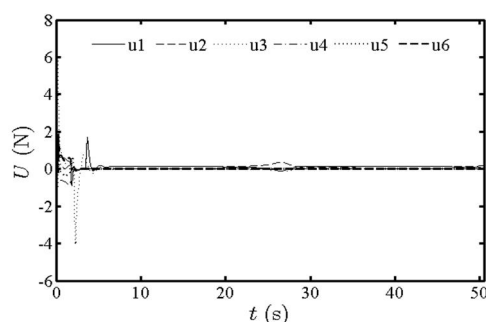
همان‌طور که در شکل 11 نشان داده شده است تقریباً بعد از 200 تکرار PD به جواب بهینه همگرا شده است. در نتیجه این بهینه‌سازی، مسیری مانند مسیر نشان داده شده در شکل 12 بدست آمده است.

شکل 13 ب سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده y در محیط اولشکل 13 الف سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده x در محیط اولشکل 13 د سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده θ در محیط اولشکل 13 ج سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده z در محیط اولشکل 13 و سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ψ در محیط اولشکل 13 ه سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ϕ در محیط اولشکل 15 روند کاهش اندازه PD در طول چرخه بهینه سازی به روش تجمع ذرات در محیط دوم

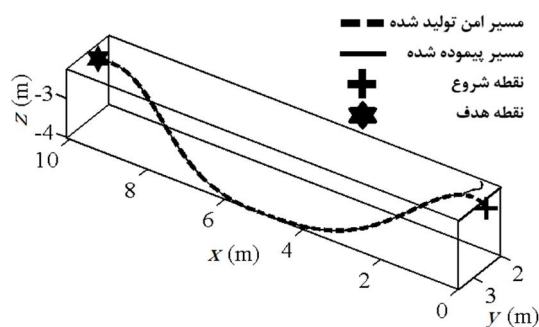
شکل 14 نیروی تولیدی پیشران‌ها جهت کنترل وسیله در مسیر تولید شده در محیط اول



شکل 16 مسیر ایمن و هموار تولید شده و مسیر پیموده شده وسیله نقلیه در محیط دوم

شکل 17 ب سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده y در محیط دومشکل 17 الف سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده x در محیط دومشکل 17 د سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده θ در محیط دومشکل 17 ج سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده z در محیط دومشکل 17 و سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ψ در محیط دومشکل 17 ه سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ϕ در محیط دومشکل 19 روند کاهش اندازه PD در طول چرخه بهینه سازی به روش تجمع ذرات در محیط سوم

شکل 18 نیروی تولیدی پیشران‌ها جهت کنترل وسیله در مسیر تولید شده در محیط دوم



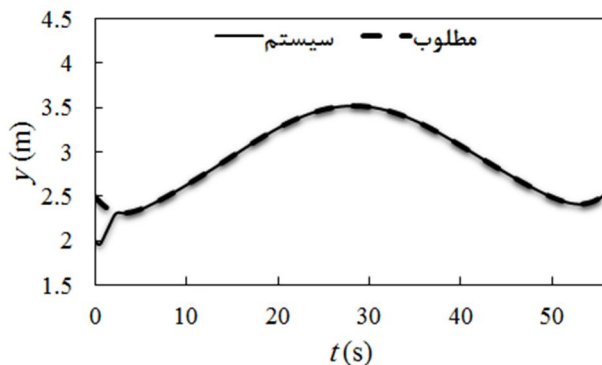
شکل 20 مسیر ایمن و هموار تولید شده و مسیر پیموده شده وسیله نقلیه به کمک کنترل کننده فازی در محیط سوم

داده شده است.

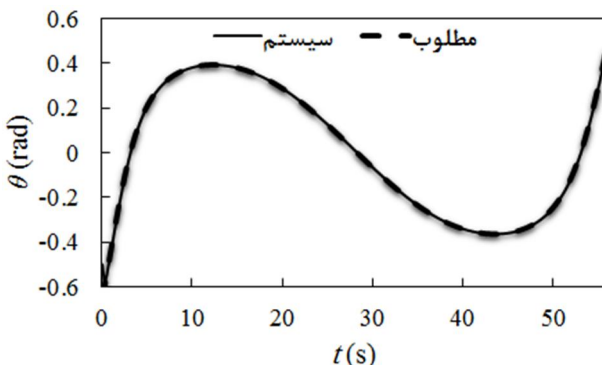
همان‌طور که در شکل 19 نشان داده شده است، تقریباً بعد از 700 تکرار PD به جواب بهینه همگرا شده است. در نتیجه‌ی این بهینه سازی، مسیری مانند مسیر نشان داده شده در شکل 20 بدست آمده است.

علاوه بر مسیر ایمن تولید شده، مسیری که وسیله نقلیه پیموده تا به نقطه هدف برسد در شکل 20 نشان داده شده است که نشان دهنده عملکرد خوب کنترل کننده فازی اعمالی می‌باشد. همچنین سیگنال‌های مطلوب تولید شده از مسیر بهینه و تعقیب شده توسط وسیله با اعمال کنترل کننده فازی در اشکال 21 الف تا 21 و نشان داده شده است. v_d برابر $0/2 \frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده است.

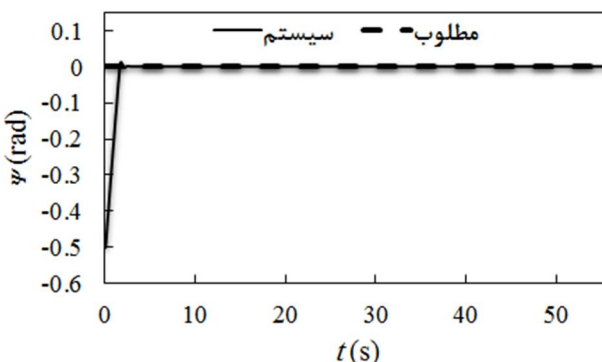
همان‌طور که از اشکال 21 الف تا 21 و مشخص است، مکان و وضعیت وسیله، پس از حداکثر 3/5 ثانیه به مقدار مطلوب همگرا شده است که با توجه به خطای اولیه و مقدار نیروهای محدود پیشران‌ها قابل قبول می‌باشد. شکل 22 نشان دهنده‌ی نیروهای اعمالی پیشران‌ها می‌باشد که حداکثر 6 نیوتن بوده است و مقداری کوچک و معقول می‌باشد.



شکل 21 ب سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده y در محیط سوم



شکل 21 د سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده θ در محیط سوم



شکل 21 و سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ψ در محیط سوم

دو محیط دارای خطر اول و دوم، جهت آزمایش روش تولید مسیر مذکور در نظر گرفته شده بودند، اما محیط سوم محیطی خطرناک پیچیده‌تری است که البته پیوستگی بیشتری هم دارد. که قابلیت این روش را در تولید مسیرهای پیچیده‌تر و دارای تغییرات پیوسته تهدید به خطر نشان می‌دهد. محیط سوم محیطی با تابع خطر پیچیده تر مانند زیر است:

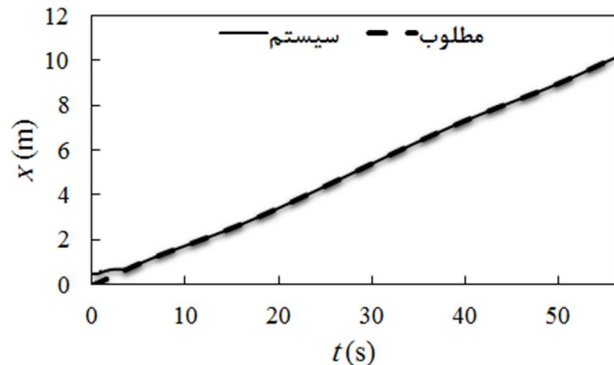
$$DF(x, y, z) = 1000 \left(1 - e^{-(10(z+4))^2 - (10(y-3.5)^2)} \right) \left(e^{(-2.5(x-5)^2)} \right) + 3 \quad (76)$$

نقطه شروع و پایان مسیر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

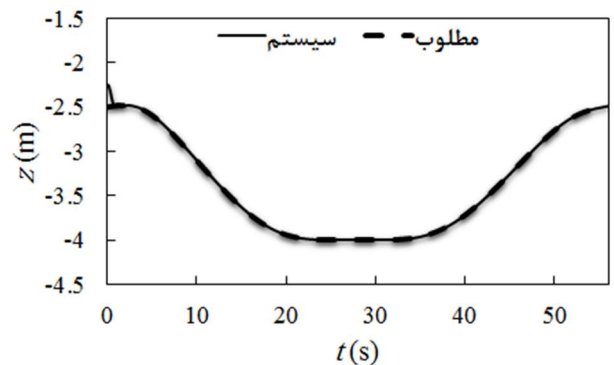
$$p_s = [0 \quad 2.5 \quad -2.5]^T \quad (77)$$

$$p_g = [10 \quad 2.5 \quad -2.5]^T \quad (78)$$

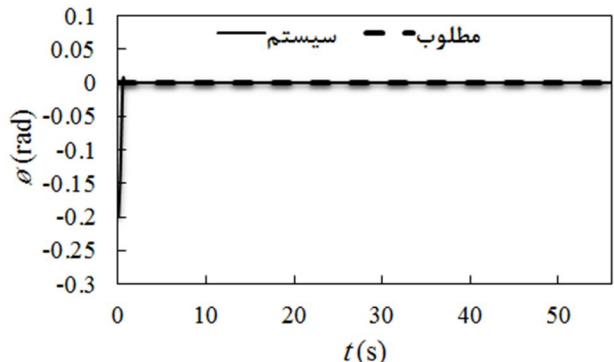
همچنین n ، که تعداد مولفه‌های سینوسی درون توابع مذکور می‌باشد 3 و nop برابر 1000 در نظر گرفته شده است. جهت بهینه‌سازی به روش تجمع ذرات، تعداد جمعیت اولیه 500، تعداد تکرار چرخه 1000 و ضرایب C_1 و C_2 و C_3 به ترتیب برابر با 0/95، 1/1 و 1، در نظر گرفته شده است. روند کاهش PD در این محیط در طول چرخه بهینه سازی، در شکل 19 نشان



شکل 21 الف سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده x در محیط سوم

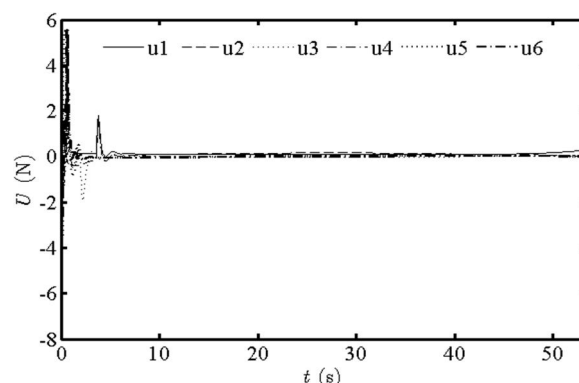


شکل 21 ج سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده z در محیط سوم



شکل 21 ه سیگنال مطلوب تولید شده و پیموده شده ϕ در محیط سوم

- [2] F. Ahmed and K. Deb, Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms, *Soft Computing*, Volume 17, Issue 7, pp 1283-1229, 2013.
- [3] J. Poppinga; A. Birk.; K. Pathak; N. Vaskevicius, Fast 6-DOF path planning for Autonomous Underwater Vehicles (AUV) based on 3D plane mapping, *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2011 IEEE International Symposium on, pp.345,350, 1-5 Nov. 2011.
- [4] D. Zhu, Y. Yang, M. Yan, Path planning algorithm for AUV based on a Fuzzy-PSO in dynamic environments, *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2011 Eighth International Conference on, pp.525,530, 26-28 July 2011.
- [5] A. Alvarez, A. Caiti, R. Onken, Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol.29, no.2, pp.418,429, April 2004
- [6] D. Kruger, R. Stolkin, A. Blum, J. Briganti, Optimal AUV path planning for extended missions in complex, fast-flowing estuarine environments, *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pp.4265,4270, 10-14 April 2007
- [7] S. Liu, Y. Wei, Y. Gao, 3D path planning for AUV using fuzzy logic, *Computer Science and Information Processing (CSIP)*, 2012 International Conference on, pp.599, 603, 24-26 Aug. 2012.
- [8] M. H. Kkorayem, M. nazemizadeh and H. Ghaffarpour, Optimal path planning of nonholonomic mobile robots using optimal control method and verification of the method via experimental tests of the scout mobile robot, *Modes Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 87-94, 2012. (In Persian)
- [9] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, *Neural Networks, 1995, Proceedings., IEEE International Conference on*, vol.4, pp.1942,1948 vol.4, Nov/Dec 1995.
- [10] A. Nag, S. S. Patel, S. A. Akbar, Fuzzy logic based depth control of an autonomous underwater vehicle, *Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s)*, 2013 International Multi-Conference on, pp.117,123, 22-23 March 2013.
- [11] J. j. Craig, *Introduction to Robotics, mechanics and Control*, Second edition, PP. 125-241, Addison-wesley, 1989.
- [12] H. baruh, *Analytical Dynamic*, International edition, PP. 215-265, Mc Graw Hill, 1999.
- [13] A. V. Inzartsev, *Underwater Vehicles*, PP.540-545, In-Tech, 2008
- [14] H. J. Zimmermann, *fuzzy set theory and its application*, third edition, pp. 203-238, boston, Kluwer Academic Publishers 1996.



شکل 22 نیروی تولیدی پیشران ها جهت کنترل وسیله در مسیر تولید شده در محیط سوم

8- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مسیری امن و هموار با استفاده از توابع پیوسته و هموار با ماهیتی سینوسی و همچنین با استفاده از روش بهینه سازی تجمع ذرات در محیط های پیچیده که دارای میزانی تحدید به خطر هستند، ایجاد شده است. سپس وسیله نقلیه زیر سطحی مسیر بهینه را از نقطه شروع تا هدف طی کرده است. نتایج نشان داده است که توابع پیشنهاد شده، قابلیت خوبی برای تخمین مسیر دارند و همچنین روش بهینه سازی تجمع ذرات، در جستجوی جواب بهینه، از دقت و سرعت خوبی برخوردار بوده است. جهت کنترل وسیله برای عبور از مسیر، از کنترل کننده فازی استفاده شده که نتایج حاصله نشان دهنده عملکرد مناسب این کنترل کننده، هم از لحاظ پایداری و هم از لحاظ اندازه نیروی اعمالی است. وسیله ای که در این مسیر توسط روش های کنترل اتوماتیک هدایت می شود در اصل، امن ترین مسیر را می پیماید.

9- مراجع

- [1] Z. Guang-lei; J. He-Ming, Global path planning of AUV based on improved ant colony optimization algorithm, *Automation and Logistics (ICAL)*, 2012 IEEE International Conference on, pp.606, 610, 15-17 Aug. 2012.