J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 47, 2025. (67-76)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Considering Energy Minimization and Obstacle Avoidance

Amirhossein Najari[1*], Mohammad Saeed Seif[2]

[1] *PhD Candidate, Sharif University of Technology; amirhossein.najari@mech.sharif.edu*
[2] *Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Aug 2025
Last modification: 8 Oct 2025
Accepted: 13 Oct 2025
Available online: 13 Oct 2025

Article type:
Research paper

Keywords:
Unmanned Surface Vehicle (USV)
Path Planning
Path Optimization
Collision Avoidance

ABSTRACT

With the rapid advancement of intelligent technologies and the growing use of unmanned systems in various land, aerial, and marine applications, research in this field has become increasingly significant. Among the most widely used autonomous marine platforms are Unmanned Surface Vehicles (USVs), which are employed in diverse operations such as hydrographic mapping of dam and lake beds, search and rescue missions, and military applications. One of the key challenges in this area is the design of intelligent path-tracking algorithms for effective obstacle avoidance. In this study, the problem of optimal path planning is addressed with the objective of minimizing energy consumption—thus increasing operational endurance—while simultaneously avoiding collisions with obstacles. The proposed path planning is performed using potential field algorithms and roadmap methods, followed by trajectory planning. The implemented methods are capable of generating collision-free trajectories for an intelligent surface vessel operating in environments with various obstacles, while minimizing both energy consumption and the traveled distance.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.6

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۷، ۱۴۰۴، (۷۶-۶۷)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

طراحی مسیر حرکت شناور سطحی بدون سرنشین با در نظر گرفتن حداقل‌سازی انرژی و اجتناب از برخورد

امیرحسین نجاری[۱*]، محمدسعید سیف[۲]

[۱] دانشجوی دکتری/ دانشگاه صنعتی شریف، amirhossein.najari@mech.sharif.edu

[۲] استاد تمام/ دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

شناورسطحی بدون سرنشین

برنامه ریزی مسیر

بهینه سازی مسیر

اجتناب از برخورد

چکیده

با توجه به توسعه روز افزون فناوری های هوشمند و استفاده از سیستم های بدون سر نشین در کاربردهای مختلف زمینی، هوایی و دریایی تحقیق و پژوهش در این حوزه حائز اهمیت است. یکی از پرکاربردترین وسایل شناورهای سطحی بدون سرنشین می‌باشند که جهت انجام عملیات مختلفی همانند نقشه برداری هیدروگرافی بستر سدها و دریاچه ها، نجات غریق و کاربردهای نظامی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از مسائل مهم در این زمینه طراحی الگوریتم هوشمند تعقیب مسیر جهت اجتناب از موانع است. در این پژوهش به بررسی مسئله طراحی مسیر بهینه با هدف کمینه سازی مصرف انرژی که منجر به افزایش زمان عملیات خواهد شد و همچنین اجتناب از برخورد با موانع پرداخته شده است.طراحی مسیر با استفاده از الگوریتم‌های میدان پتانسیل و نقشه راه صورت گرفته و برنامه ریزی زمانی مسیر نیز در ادامه انجام شده است. روش های پیاده سازی شده در این مقاله به خوبی می‌توانند طراحی مسیر برای یک شناور هوشمند سطحی در حضور موانع مختلف انجام دهند و همزمان مصرف انرژی و مسافت طی شده توسط شناور کمینه باشد.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.6

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

۱ - مقدمه

حدود ۷۵ درصد از سطح زمین را آب پوشانده است، در حالی‌که تنها حدود ۵ درصد از اقیانوس‌ها و دریاها تا کنون مورد کاوش قرار گرفته‌اند. با توجه به توسعه و گسترش صنایع دریایی و علوم مرتبط با دریا، امروزه انجام بسیاری از فعالیت‌ها از جمله اکتشاف و استخراج منابع زیرآبی، پایش و جمع‌آوری داده‌های زیست‌محیطی و پژوهشی، و نیز نصب، تعمیر و نگهداری سازه‌های ساحلی و فراساحلی مستلزم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و پیشرفته به‌منظور پاسخگویی به نیازهای فزاینده است. در سال‌های اخیر استفاده از تجهیزات و ابزارآلات مهندسی با قابلیت عملکرد در اعماق دریا و کاربری‌های متنوع در سطح و زیرسطح آب رشد چشمگیری داشته است. در بسیاری از صنایع، بهره‌برداری از سامانه‌هایی که امکان هدایت و کنترل از راه دور را بدون نیاز به حضور مستقیم نیروی انسانی فراهم می‌سازند.

یکی از مهم ترین وسایل هوشمند دریایی شناورهای سطحی بدون‌سرنشین[1] می‌باشند که در عملیات های مختلف نظامی، پایش منابع آب ، نقشه برداری هیدروگرافیکی ، عملیات جستجو و نجات و سایر عملیات هایی که نیازمند دقت و سرعت عمل بالا است و در محدوده توانایی انسان قرار ندارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند هوشمند سازی و حذف نیاز به اوپراتور و کنترل نیروی انسانی، طراحی مسیر حرکت ربات حائز اهمیت است. دو ملاحظه اصلی در برنامه‌ریزی مسیر شناورهای بدون سرنشین سطحی، بهینه‌سازی مصرف سوخت و جلوگیری از برخورد با موانع است.

یکی از الزامات مهم عملیات شناورهای سطحی بدون سرنشین، افزایش بازده است که به طور مستقیم بر برد عملیاتی و مدت زمان مأموریت تأثیر می‌گذارد. مصرف انرژی یکی از فاکتور های مهم الگوریتم های مسیریابی برای سیستم های خودران است. به طور خاص، در طراحی شناورهای سطحی بدون سرنشین [۱] و ربات زیرسطحی بدون سرنشین [۲][۳] برای انجام ماموریت‌هایی با اغتشاشات محیطی مختلف و عدم قطعیت در حضور ویژگی‌های محیطی نامشخص و پویا طراحی مسیر را چالش‌برانگیزتر می‌کند. الگوریتم های مسیریابی شناورهای سطحی بدون سرنشین ها و ربات های زیرسطحی خودران با هدف بهینه سازی جنبه های مختلفی از جمله، زمان ماموریت، مصرف انرژی و ایمنی توسعه داده شده اند. به طور معمول، این ربات ها برای ماموریت های بلندمدت با انرژی محدود طراحی می‌شوند. در سال های اخیر مباحث مربوط به توسعه الگوریتم‌های مسیریابی با مصرف انرژی بهینه مورد بررسی قرار گرفته است[۴][۵]. رویکردی مبتنی بر مجموعه سطح[2] برای طراحی مسیر ربات‌های بدون سرنشین زیر سطحی که جریان خارجی را به طور صریح در نظر می گیرد، توسط لولا [3] و همکاران شرح داده شده است[۶][۷]. در رویکرد مجموعه سطح، مسیرهای بهینه زمانی برای تک شناور یا چندین شناور با استفاده از گسترش مجموعه سطح میدان جریان با توجه به موقعیت های شروع و پایان مورد نظر برای شناورها تعیین می‌شود. از آنجایی که این روش به کل اطلاعات میدان جریان نیاز دارد و نیازمند توان محاسباتی زیادی است، این روش برای طراحی مسیر آنلاین و در لحظه مناسب نخواهد بود[۸][۹].

برنامه ریزی پویا به عنوان یک روش جستجوی مبتنی بر گراف در طراحی مسیر بهینه به کار رفته است، جایی که هزینه‌ها به رئوس گراف مرتبط است[۱۰]. اگرچه برنامه ریزی پویا قادر به تولید مسیرهای بهینه است، اما هزینه محاسباتی آن با ابعاد فضای جواب به شدت افزایش می یابد. درسال ۲۰۰۸ یک الگوریتم برنامه ریزی خطی برای هدایت چندین ربات بدون سرنشین زیر سطحی معرفی شد[۱۱]. با این حال، زمان محاسباتی این روش با ابعاد مسئله به صورت نمایی افزایش می یابد و بنابراین این رویکرد برای کاربردهای عملی و واقعی محدود خواهد شد [۱۲].

روش‌های جستجوی شبکه‌ای مبتنی بر اکتشاف[4] به طور معمول برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه و غیرخطی دشوار به کار می‌روند. فضای عملیاتی با استفاده از درخت‌های چهارگانه[5] در پژوهش کارول[6] و همکاران به یک گراف تبدیل می‌شود تا بتوان با استفاده از الگوریتم مناسب مسیرهای بهینه را تولید کرد[۱۳]. یک الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر مشابه با مصرف بهینه انرژی برای در نظر گرفتن داده‌های جریان دریا پیشنهاد شد[۱۴]، در این حالت فرض بر این بود که نیروی رانش ثابت است. الگوریتم دیگری برای برنامه‌ریزی مسیر ربات زیرسطحی بدون سرنشین مبتنی روش ذکر شده در پژوهش گاراو [7] و همکارن برای تولید مسیرهای با مصرف انرژی بهینه در شرایط جریان گردابی مختلف به کار گرفته شد و این کار در یک محیط اقیانوسی شبیه‌سازی شده مورد آزمایش قرار گرفت[۱۵]. تأثیر توابع اکتشافی مختلف بر نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با این حال، روش‌های قطعی و اکتشافی مانند الگوریتم‌های معرفی شده نیازمند توان محاسباتی زیادی هستند[۱۶][۱۷] و به دلیل ضعف آن‌ها در حل مسائل با بعد بالا نقد هایی به آن وارد است[۱۸].

[1] Unmanned Surface Vehicle

[2] Level-set
[3] Lolla
[4] heuristic
[5] quad trees
[6] Carroll
[7] Garau

نیو[8] و همکاران در پژوهش خود به بررسی استفاده از داده‌های جریان دریایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی شناورهای سطحی بدون سرنشین پرداخته اند[۱۹]. این پژوهش از عوامل محیطی برای طراحی مسیرهای انرژی بهینه استفاده می‌کند. علاوه بر رویکردهای ابتکاری، کنترل پیش‌بین مدل[9] به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی مصرف سوخت بصورت آنلاین مطرح شده است[۲۰]. صیادی و باباخانی در یک پژوهش به طراحی و تعقیب مسیر رباتهای زیرسطحی در محیطهای دینامیک با استفاده از روشهای حل تبدیل هوشمند و کلاسیک پرداختند[۲۱].

ماهیت پویای محیط‌های دریایی نیازمند مکانیزم‌های قوی جلوگیری از برخورد برای اطمینان از انجام ماموریت با ایمنی بالا است. وانگ[10]و همکاران بر روی توسعه الگوریتمی برای برنامه‌ریزی مسیر پویا و آنلاین با در نظر گرفتن جلوگیری از برخورد با موانع پژوهش هایی انجام دادند[۲۲]. تکنیک‌های تلفیق حسگرهای مختلف، مانند ترکیب داده‌های لیدار، سونار و رادار، به طور گسترده برای ایجاد مدل جامع از محیط اطراف استفاده شده‌اند[۲۳]. رویکردهای ترکیبی که از بهینه سازی چند هدفه جهت ایجاد تعادل بین مصرف سوخت و جلوگیری از برخورد بکار گرفته شده اند نیز عملکرد مناسبی داشته اند. ژائو[11] و همکاران در مقاله خود یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه را معرفی کرده‌اند که تعادل بین بهره‌وری سوخت و ایمنی را با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک چند هدفه[12] فراهم می‌کند[۲۴]. روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، به ویژه یادگیری تقویتی، رویکرد جدیدی به برنامه‌ریزی مسیر برای شناورهای سطحی بدون سرنشین اضافه کرده‌اند. نجاری و سیف در یک پژوهش مدلی مبتنی بر یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی برای شبیه‌سازی مانور شناور سطحی استخراج و عملکرد آن را در مدلسازی رفتار وسیله ارزیابی کردند[۲۵]. طاهری و همکاران در یک پژوهش طراحی مسیر یک ربات زیرسطحی در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از محیط ناشناخته را با استفاده از روش درخت جستجو سریع تصادفی محلی انجام دادند[۲۶]. ژانگ[13] و همکاران در پژوهشی، عملکرد الگوریتم یادگیری تقویتی در توسعه استراتژی‌های برنامه‌ریزی مسیر تطبیقی و مقاوم برای وسایل نقلیه دریایی خودکار را نشان داده‌اند[۲۷]. علاوه بر این، تکنیک‌های یادگیری عمیق، از جمله شبکه‌های عصبی پیچشی[14]، برای تشخیص و دسته بندی موانع بصورت آنلاین استفاده شده‌اند و موقعیت‌یابی شناورهای هوشمند را بهبود می‌بخشند. استفاده از داده‌های اقیانوس‌شناسی در زمان واقعی، مانند جریان‌ها و جزر و مد، برای برنامه‌ریزی مسیر جهت بهینه سازی مصرف انرژی شناورها موضوعی مهم است. در این پژوهش طراحی مسیر با هدف بهینه سازی مصرف انرژی و جلوگیری از برخورد برای یک شناور سطحی بدون سرنشین با دو روش کمینه سازی میدان پتانسیل و نقشه راه انجام شده است. در روش های ذکر شده علاوه بر طراحی مسیر با در نظر گرفتن موانع موجود در محیط، کمینه سازی مسافت طی شده با هدف کاهش مصرف سوخت شناور، انجام می‌گردد.

۲- طراحی حرکت برای شناور سطحی بدون سرنشین

طراحی حرکت از موضوعات اصلی در به کارگیری ربات ها می‌باشد، طراحی حرکت به دو بخش طراحی مسیر حرکت[15] و طراحی الگوی زمانی[16] حرکت تقسیم می‌شود.

مسئله طراحی مسیر در صورتی که قید و مانعی در محیط حرکت ربات وجود نداشته باشد، دارای جواب بدیهی خط راست می‌باشد. اما در حالت کلی اینطور نیست. به طور مثال برای یک شناور سطحی بدون سرنشین در محیط دریا که دارای موانع متعدد است، بایستی طراحی مسیر با در نظر گرفتن این قید ها و ملاحضات انجام گیرد.

۲-۱- مسئله طراحی الگوی زمانی

طراحی الگوی زمانی به این معنا است که شناور در مسیر طراحی شده در هر نقطه با چه سرعتی حرکت کند و به طور خلاصه طراحی پروفیل حرکت شامل پروفیل شتاب و سرعت است. اگر فرض شود مسیر مورد نظر برای حرکت شناور طراحی شده و اکنون هدف طراحی الگوی زمانی حرکت است، ساده ترین روش این است که الگوی حرکت نسبت به زمان به صورت چند جمله ای در نظر گرفته شود:

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \qquad (۱)$$

همانطور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، مولفه افقی حرکت نسبت به زمان با یک چند جمله ای درجه ۳ مدل شده است. از مشکلات این روش نداشتن کنترل روی سرعت بیشینه است ، این مشکل با در نظر گرفتن پروفیل ذوزنقه ای[17] برای سرعت نسبت

[8] Niu
[9] Model Predictive Control (MPC)
[10] Wang
[11] Zhao
[12] NSGA-II
[13] H. Zhang
[14] CNNs
[15] Path Planning
[16] Trajectory Planning
[17] LSPB(Linear Segment Polynomial Blending)

به زمان حل می‌شود و با مشتق و انتگرال گیری به ترتیب شتاب و مکان بدست می‌آیند.

۲-۲- مسئله طراحی مسیر حرکت

مسئله طراحی مسیر حرکت به دو صورت سراسری[18] و محلی[19] حل می‌شود . در روش سراسری فرض بر این است که محیط حرکت و موانع آن شناخته شده است و بر این اساس مسیر طراحی می‌شود. اما در روش محلی از اطلاعات بدست آمده توسط سنسور های موجود بر روی ربات در محدوده ای که ربات قرار گرفته برای طراحی مسیر استفاده می‌شود.

در این پژوهش فرض می‌شود مختصات نقطه شروع حرکت ، نقطه پایان و همچنین موانع داده شده اند . روش های متعددی برای طراحی مسیر بین دو نقطه ابتدایی و انتهایی وجود دارند که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود.

۲-۳- روش میدان پتانسیل

در این روش یک میدان جاذبه برای مقصد و یک میدان دافعه در اطراف هر مانع تعریف می‌شود. در نهایت بر اساس برآیند این دو میدان در هر نقطه پتانسیلی تعریف خواهد شد ، مسیر حرکت در جهت شدید ترین کاهش پتانسیل یا درجهت بردار گرادیان میدان پتانسیل طراحی می‌شود.

میدان پتانسیل جاذبه برای نقطه انتهایی بصورت رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$U_{att}(\vec{X}) = \left|\vec{X} - \overrightarrow{X_E}\right|^2 * \frac{1}{2}\eta \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) η یک ضریب است که به طور دلخواه انتخاب می‌شود و متناسب با قدرت میدان جاذبه مقصد است.

میدان پتانسیل دافعه در اطراف هر مانع طبق رابطه (۳) بدست محاسبه می‌شود.

$$U_{rep\,,\,i}(\vec{X}) = \begin{cases} 0 & \rho_i(\vec{X}) \geq \rho_{oi} \\ \frac{1}{2}\alpha_i\left(\frac{1}{\rho_i(\vec{X})} - \frac{1}{\rho_{oi}}\right)^2 & \rho_i(\vec{X}) < \rho_{oi} \end{cases} \qquad (۳)$$

که در رابطه (۳) $\rho_i(\vec{X})$ فاصله نقطه از مانع i ام است و ρ_{oi} شعاع اثر مانع است و ضریب α_i به صورت دلخواه انتخاب می‌شود و بیانگر قدرت دافعه مانع است. رابطه (۳) بیان می‌کند که تنها اگر نقطه در شعاع اثر مانع قرار داشت نیروی دافعه به آن وارد می‌شود.

۳- فرمول بندی مسئله بهینه سازی

به منظور حل مسئله تعقیب مسیر و یافتن مسیر بهینه ، فرمول بندی در راستای کمینه کردن پتانسیل بیان خواهد شد. چرا که نقطه مقصد بگونه ای در این الگوریتم تعریف شده است که در کمترین پتانسیل قرار داشته باشد.

$$\begin{gathered} \min U(\vec{X}) \\ \min U_{att}(\vec{X}) + \sum_{i=1}^{n} U_{rep\,,\,i}(\vec{X}) \\ \text{sub to } \vec{B}_i(\vec{X}) > 0 \end{gathered} \qquad (۴)$$

که در رابطه (۴)، i تعداد موانع می‌باشد.

۳-۱- پیدا کردن جهت حرکت

همانطور که گفته شد مسیر حرکت در جهت بیشترین کاهش پتانسیل است . بنابراین مسیر حرکت یا جهت نیروی وارده هم جهت با بردار گرادیان میدان پتانسیل است.

$$\vec{F}(\vec{X}) = -\nabla\left(U_{att}(\vec{X}) + \sum_{i=1}^{n} U_{rep\,,\,i}(\vec{X})\right) \qquad (۵)$$

براساس خاصیت خطی گرادیان و اصل برهم نهی مجموع نیروها محاسبه خواهند شد.

$$\vec{F}(\vec{X}) = -\nabla U_{att}(\vec{X}) - \sum_{i=1}^{n} \nabla U_{rep\,,\,i}(\vec{X}) \qquad (۶)$$

$$\vec{F}_{att}(\vec{X}) = -\nabla U_{att}(\vec{X}) = \eta(\overrightarrow{X_E} - \vec{X}) \qquad (۷)$$

$$\vec{F}_{rep\,,\,i}(\vec{X}) = \begin{cases} 0 & \rho_i(\vec{X}) \geq \rho_{oi} \\ \alpha_i \frac{1}{\rho_i(\vec{X})^3}\left(\frac{1}{\rho_i(\vec{X})} - \frac{1}{\rho_{oi}}\right)\left(\vec{X} - \vec{B}_i(\vec{X})\right) & \rho_i(\vec{X}) < \rho_{oi} \end{cases} \qquad (۸)$$

در رابطه (۸) $\vec{B}_i(\vec{X})$ مختصات نزدیک ترین نقطه از مانع i ام تا X است.پیدا کردن نزدیک ترین نقطه مانع به صورت کامل توضیح داده خواهد شد.بدین ترتیب رابطه (۸) در هر نقطه از فضا برآیند نیروهای جاذبه و دافعه جهت حرکت را ارائه می‌کند.

بردار یکه جهت حرکت به صورت زیر بدست می آید :

$$\vec{F}_{drive} = \frac{\vec{F}_{att} + \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{rep\,,\,i}}{\left|\vec{F}_{att} + \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{rep\,,\,i}\right|} \qquad (۹)$$

پس از انجام محاسبات ذکر شده ، نقطه بعدی مسیر از رابطه (۹) بدست می آید.

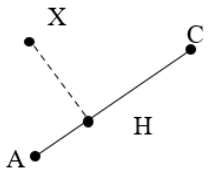
[18] Global
[19] Local

$$\vec{X}_{j+1} = \vec{X}_j + \varepsilon \vec{F}_{drive} \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) ε گام حرکت است که به صورت دلخواه تنظیم می‌شود.

۳-۲- پیدا کردن نزدیک ترین نقطه به مانع $\vec{B}_i(\vec{X})$

بدیهی است که نزدیک ترین نقطه از مانع تا نقطه‌ی X ، روی یکی از ضلع های مانع قرار دارد. کافی است برای هر ضلع نزدیکترین نقطه به X را پیدا کرده و با از بین آنها کمترین مقدار انتخاب شود.



شکل ۱- پیدا کردن نزدیک ترین نقطه از یکی از اضلاع مانع

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود اگر محل قرار گیری نقطه X به گونه ای باشد که درشکل نشان داده شده است، روش محاسبه مختصات نزدیک ترین نقطه H در ادامه بیان خواهد شد. ابتدا معادله خط گذرنده از A و C بصورت رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$\vec{P} = (\vec{A} - \vec{C})\alpha + \vec{C} \qquad (۱۱)$$

معادله خطی که از X بگذرد و عمود بر AC باشد به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌گردد.

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}(\vec{A} - \vec{C})\beta + \vec{X} \qquad (۱۲)$$

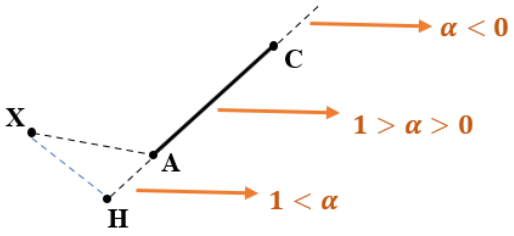
از محاسبه نقطه تلاقی معادله خطوط در روابط (۱۱) و (۱۲)، مختصات نقطه H طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\vec{H} = (\vec{A} - \vec{C})\alpha + \vec{C} \qquad (۱۳)$$

که مقدار از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = D^{-1}(\vec{X} - \vec{C}) \qquad (۱۴)$$
$$D = \left[(\vec{A} - \vec{C}) \quad -\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}(\vec{A} - \vec{C})\right]$$

نقطه X می‌تواند به صورتی قرار گرفته باشد که نزدیک‌ترین نقطه به آن دیگر روی ضلع مانع قرار نداشته باشد.



شکل ۲- حالت خاص قرار گیری نقطه X

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، محل قرارگیری X بگونه ای است که H دیگر روی پاره خط AC قرار ندارد پس نزدیک ترین نقطه در این وضعیت، نقطه A می‌باشد. بطور کلی بررسی سه وضعیت نشان داده شده در شکل ۲، طبق رابطه (۱۵) انجام می‌گیرد.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \le 0 & B = C \\ 0 < \alpha < 1 & B = H \\ \alpha \ge 1 & B = A \end{Bmatrix} \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵) B نزدیک ترین نقطه روی پاره خط AC از نقطه X می‌باشد. حال کافی است برای تک تک اضلاع مانع i ام این محاسبات انجام شود و از بین نتایج کمترین مقدار به عنوان $\vec{B}_i(\vec{X})$ گزارش خواهد شد.

۳-۳- مسئله کمینه محلی

مسئله مینیمم محلی در روش میدان پتانسیل یکی از مشکلات رایج است که در نقطه ای گیر افتاده و حلقه بی نهایت بار تکرار شده. یکی از روش های خارج شدن از مینیم محلی گام تصادفی[۲۰] است که به صورت تصادفی پرشی انجام می‌شود و الگوریتم دوباره تکرار می‌شود. این پرش باید بگونه ای باشد که با موانع برخوردی نداشته باشد و همچنین دوباره در مینیم محلی گیر نکند.

۴- شبیه سازی روش میدان پتانسیل

۴-۱- مشخصات شناور هدف

در جدول ۱ مشخصات کلی شناور هدف بیان شده است.

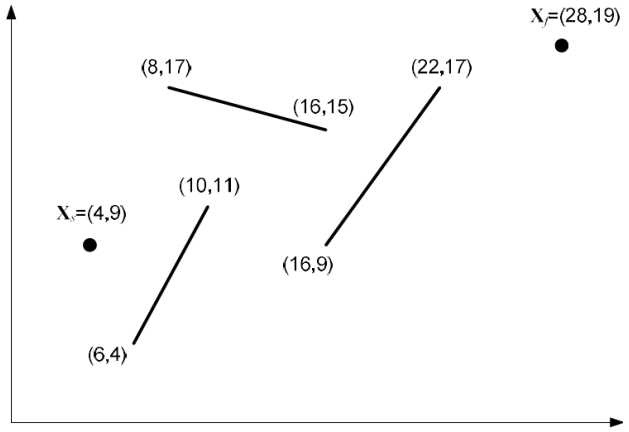
جدول ۱ – مشخصات ابعادی و هندسی شناور هدف

طول سرتاسر (L)	1.1 m
بیشترین عرض هر بدنه(b)	18 cm
بیشترین عرض شناور(B)	84 cm
آبخور(T)	9 cm

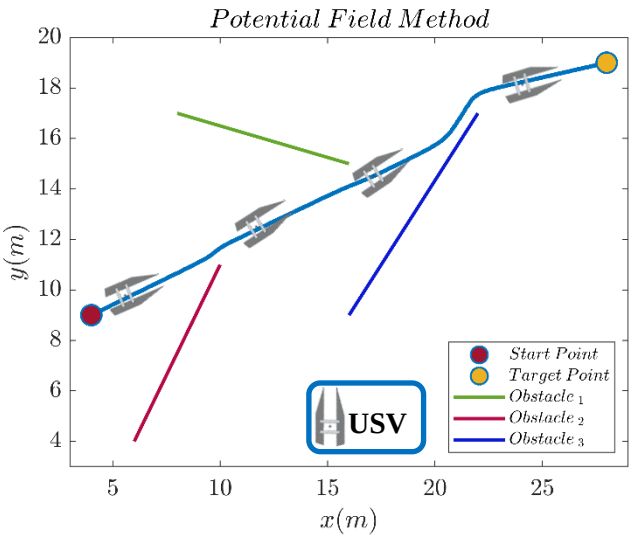
[20] Random Walk

وزن (W)	30 kg
نوع بدنه	کاتاماران
شعاع اثر موانع (ρ_{oi})	1.5L
گام حرکت میدان پتانسیل (ε)	0.1L

جهت بررسی عملکرد الگوریتم میدان پتانسیل در طراحی مسیر برای یک شناور سطحی، محیطی با موانع مشخص مطابق شکل ۳ درنظر گرفته شده است.

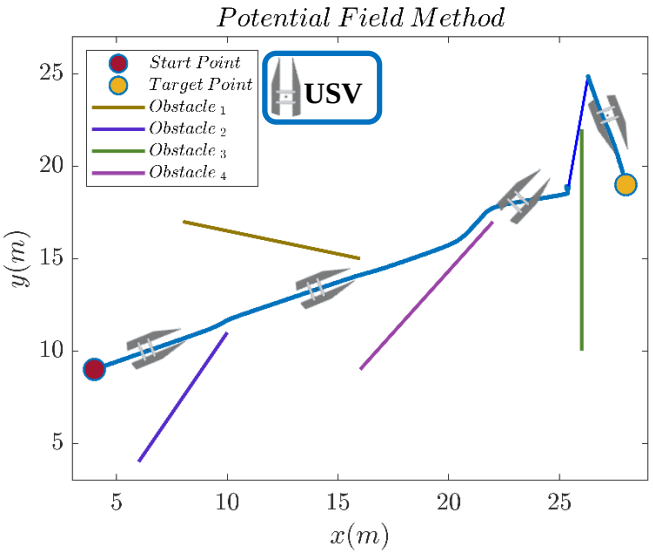


شکل ۳- محیط درنظر گرفته شده جهت بررسی عملکرد الگوریتم



شکل ۴- شبیه‌سازی طراحی مسیر شناور بر اساس روش میدان پتانسیل

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، الگوریتم مسیر حرکت شناور را بدون برخورد با موانع طراحی می‌کند. با اضافه نمودن یک مانع مسئله کمینه محلی و الگوریتم خروج از آن نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم میدان پتانسیل در نزدیکی مانع چهارم در یک نقطه کمینه محلی گیر افتاده و با استفاده از روش گام تصادفی ، پرشی بگونه ای انجام گرفته است که بدون برخورد با موانع از کمینه محلی خارج شود.پس از انجام پرش الگوریتم همانند قبل شروع به کار می‌کند و مسیر حرکت شناور را تعیین می‌کند.



شکل ۵- شبیه سازی طراحی مسیر شناور سطحی و بررسی فرار از نقطه کمینه محلی

۵- روش نقشه راه[21]

ایده کلی این روش تهیه یک مدل به کمک گراف است که در آن یال ها مسیر های مستقیم بدون برخورد شناور را در محیطی با حضور موانع متعدد را نشان می‌دهند. طراحی مسیر به صورت حل مسئله مسیریابی روی گراف در می آید.رئوس این گراف در ابتدا شامل نقاط شروع ، پایان و راسهای موانع است.

۵-۱- یافتن کوتاه ترین مسیر روی یک گراف به روش دایکسترا[22]

مراحل مرتب سازی در الگوریتم دایکسترا در ادامه بیان می‌شود:

۱) به هر راس یک مقدار فاصله نسبت داده می‌شود که همان فاصله از راس مقصد باشد، این مقدار در ابتدای الگوریتم برای همه رئوس بینهایت و برای راس مقصد صفر است.

۲) مجموعه ای با نام رئوس ملاقات نشده تشکیل داده شده. این مجموعه در ابتدا شامل تمام رئوس گراف است.

۳) راس مقصد راس فعلی مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود.

[21] Road Mapping
[22] Dijkstra

۴) برای راس فعلی تمام رئوس همسایه که ملاقات نشده هستند پیدا کرده و مقدار فاصله آن اصلاح می‌شوند.
۵) راس فعلی از مجموعه رئوس ملاقات نشده حذف می‌شود.
۶) اگر مجموعه رئوس ملاقات نشده خالی بود الگوریتم خاتمه می‌یابد، در غیر این صورت راسی که کمترین عدد را گرفته به عنوان راس فعلی در نظر گرفته می‌شود.
۷) مراحل ۴ به بعد تکرار مجددا تکرار می‌گردند.

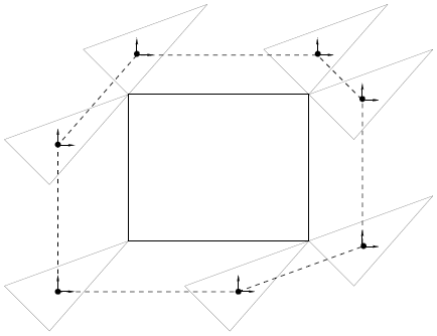
مرتبه این الگوریتم N^2 می‌باشد که در آن N تعداد رئوس گراف است.

پس از انجام مرتب سازی رئوس ، طراحی مسیر انجام می‌گیرد:

۱) راس مبدا راس فعلی گرفته می‌شود.
۲) از رئوس همسایه رأسی که مقدار عدد فاصله به اضافه عدد یال مربوطه برابر با عدد فاصله راس فعلی شود ، به عنوان راس فعلی جایگزین می‌گردد.
۳) اگر راس فعلی برابر با مقصد بود الگوریتم خاتمه می‌یابد در غیر اینصورت از مرحله ۲ الگوریتم مجددا تکرار شود.

۵-۲- تعمیم روش طراحی مسیر بدون برخورد از حالت نقطه به جسم

در قسمت های قبل فرض بر این بود که شناور به صورت یک نقطه است و قرار است برای حرکت این نقطه مسیر طراحی شود. اما در حالت واقعی شناور بصورت یک جسم صلب و دارای هندسه مشخص در نظر گرفته می‌شود. راه حل این است که مختصات یک نقطه از ربات را به عنوان نماینده درنظر گرفته می‌شود، سپس بردار هایی که از سمت دیگر رئوس به این راس است به رئوس موانع اضافه می‌گردند و پوش محدب[۲۳] نقاط بدست آمده و نقاط قبلی مانع را پیداکرده و به عنوان مانع رشد یافته قرار داده خواهد شد.کلیت مطابق شکل۶ این روش به این معنا است موانع بگونه‌ای تغییر داده می‌شود که بتوان ربات را بصورت نقطه در نظر گرفت و از الگوریتم معرفی شده استفاده نمود.

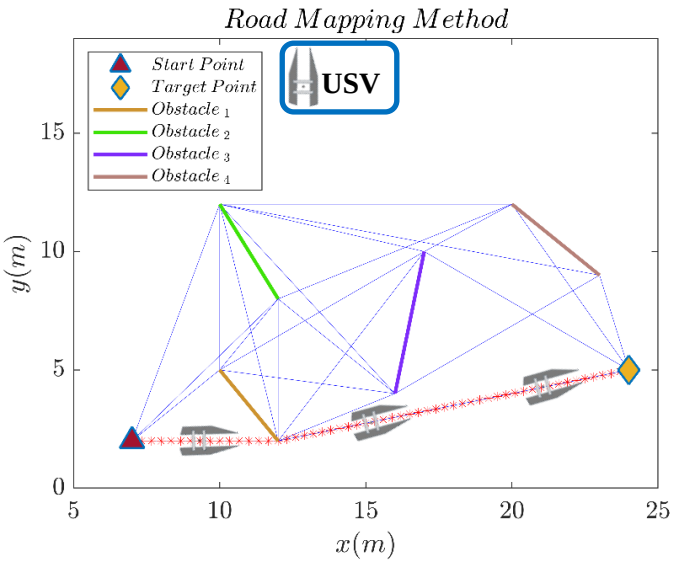


[23] Convex Hull

شکل ۶- کاهش هندسه شناور به یک نقطه و اثر دادن آن در هندسه موانع

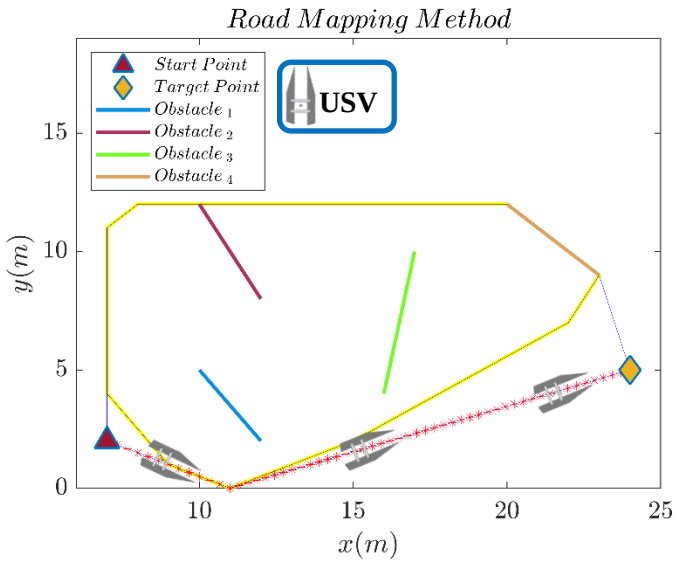
۵-۳- شبیه سازی روش نقشه راه

جهت بررسی عملکرد الگوریتم نقشه راه در طراحی مسیر برای یک شناور سطحی ، محیطی با موانع مشخص مطابق شکل ۳ که قبلا جهت بررسی عملکرد الگوریتم میدان پتانسیل استفاده شد، درنظر گرفته شده است.



شکل ۷- شبیه سازی روش نقشه راه با در نظر گرفتن شناور بصورت یک نقطه

مطابق شکل ۷ شبیه سازی طراحی مسیر بهینه شناور هوشمند با استفاده از روش نقشه راه صورت گرفته است. در این شبیه سازی شناور سطحی بدون سرنشین بصورت یک نقطه در نظر گرفته شده و کوتاه ترین مسیر ممکن جهت صرفه جویی در توان مصرفی سیستم رانش توسط این الگوریتم ارائه شده است.



شکل ۸ - شبیه سازی الگوریتم در حالت مانع چند ضلعی

مطابق شکل ۸ شبیه سازی الگوریتم نقشه راه برای حالتی که شناور دارای یک هندسه دوبعدی است، انجام شده است.با توجه به اینکه معادلات مانور شناور معمولا به صورت حرکت صفحه ای و با در نظر گرفتن سه درجه آزادی سرج[۲۴] ، سوی[۲۵] و یاو[۲۶] مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند در نظر گرفتن شناور بصورت یک هندسه دو بعدی قابل قبول است. با توسعه موانع با روش معرفی شده می‌توان شناور را به صورت نقطه ای متحرک در نظر گرفت و الگوریتم را اجرا کرد. همانطور که در شکل ۸ مشخص است ، پوش محدب موانع با رنگ زرد مشخص شده است و بخشی از گراف نیز زیر آن قرار دارد و در تصویر مشخص نمی‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

طراحی مسیر بهینه برای یک شناور سطحی بدون سرنشین، به‌عنوان یکی از مسائل کلیدی در حوزه ناوبری دریایی هوشمند، اهمیت بسیار بالایی دارد. بهینه‌سازی مسیر نه‌تنها موجب کاهش طول مسیر پیموده شده می‌شود، بلکه از نظر مصرف انرژی نیز تأثیر مستقیمی بر افزایش بازه زمانی عملیات بدون نیاز به شارژ مجدد و بهبود برد عملیاتی شناور دارد. این ویژگی‌ها به‌طور ویژه برای مأموریت‌های طولانی‌مدت و محیط‌هایی که امکان پشتیبانی لجستیکی محدود است، ارزشمند می‌باشند.

در این پژوهش، طراحی مسیر با تکیه بر دو رویکرد کمینه‌سازی میدان پتانسیل و روش نقشه راه انجام گرفت. این ترکیب رویکردها قابلیت بهره‌برداری از مزایای هر روش را فراهم کرده و تعادل مناسبی میان ایمنی حرکت (اجتناب از برخورد با موانع) و کارایی مسیر ایجاد نموده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نه‌تنها توانسته است از برخورد با موانع در سناریوهای مختلف جلوگیری کند، بلکه به کاهش قابل توجه مسافت طی‌شده نیز منجر شده که این کاهش ارتباط مستقیمی با صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارد.

۹- مراجع

1- Lv, C., Yu, H., Chi, J., Xu, T., Zang, H., lue Jiang, H., & Zhang, Z. (2019). A hybrid coordination controller for speed and heading control of underactuated unmanned surface vehicles system. Ocean Engineering, 176, 222-230. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.007

2- Palomeras, N., Vallicrosa, G., Mallios, A., Bosch, J., Vidal, E., Hurtos, N., ... & Ridao, P. (2018). AUV homing and docking for remote operations. Ocean Engineering, 154, 106-120. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.114

3- Xia, Y., Xu, K., Li, Y., Xu, G., & Xiang, X. (2019). Improved line-of-sight trajectory tracking control of under-actuated AUV subjects to ocean currents and input saturation. Ocean engineering, 174, 14-30. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.025

4- Lee, T., Kim, H., Chung, H., Bang, Y., & Myung, H. (2015). Energy efficient path planning for a marine surface vehicle considering heading angle. Ocean Engineering, 107, 118-131. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.030

5- Zeng, Z., Lian, L., Sammut, K., He, F., Tang, Y., & Lammas, A. (2015). A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles. Ocean Engineering, 110, 303-313. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.007

6- Lolla, T., Ueckermann, M. P., Yiğit, K., Haley, P. J., & Lermusiaux, P. F. (2012, May). Path planning in time dependent flow fields using level set methods. In 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 166-173). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225364

7- Lolla, T., Haley Jr, P. J., & Lermusiaux, P. F. J. (2015). Path planning in multi-scale ocean flows: Coordination and dynamic obstacles. Ocean Modelling, 94, 46-66. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.013

8- Kularatne, D., Bhattacharya, S., & Hsieh, M. A. (2016, June). Time and Energy Optimal Path Planning in General Flows. In Robotics: science and systems (pp. 1-10). https://doi.org/10.15607/RSS.2016.XII.047

9- Singh, Y., Sharma, S., Sutton, R., Hatton, D., & Khan, A. (2018). A constrained A* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents. Ocean Engineering, 169, 187-201. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.016

10- Bryson, A. E. (2018). Applied optimal control: optimization, estimation and control. Routledge. https://doi.org/10.1201/9781315137667

11- Yilmaz, N. K., Evangelinos, C., Lermusiaux, P. F., & Patrikalakis, N. M. (2008). Path planning of autonomous underwater vehicles for adaptive sampling using mixed integer linear

[24] Surge
[25] Sway
[26] Yaw

programming. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 33(4), 522-537. https://doi.org/10.1109/JOE.2008.2002105
12- Eichhorn, M. (2015). Optimal routing strategies for autonomous underwater vehicles in time-varying environment. Robotics and Autonomous Systems, 67, 33-43. https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.08.010
13- Carroll, K. P., McClaran, S. R., Nelson, E. L., Barnett, D. M., Friesen, D. K., & William, G. N. (1992, June). AUV path planning: an A* approach to path planning with consideration of variable vehicle speeds and multiple, overlapping, time-dependent exclusion zones. In Proceedings of the 1992 symposium on autonomous underwater vehicle technology (pp. 79-84). IEEE. https://doi.org/10.1109/AUV.1992.225191
14- Garau, B., Bonet, M., Alvarez, A., Ruiz, S., & Pascual, A. (2009). Path planning for autonomous underwater vehicles in realistic oceanic current fields: Application to gliders in the western mediterranean sea. Journal of Maritime Research, 6(2), 5-22.
15- Garau, B., Alvarez, A., & Oliver, G. (2005, April). Path planning of autonomous underwater vehicles in current fields with complex spatial variability: an A* approach. In Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 194-198). IEEE. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570118
16- Le, A. V., Prabakaran, V., Sivanantham, V., & Mohan, R. E. (2018). Modified a-star algorithm for efficient coverage path planning in tetris inspired self-reconfigurable robot with integrated laser sensor. Sensors, 18(8), 2585. https://doi.org/10.3390/s18082585
17- Song, R., Liu, Y., & Bucknall, R. (2019). Smoothed A* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning. Applied Ocean Research, 83, 9-20. https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.12.001
18- Zadeh, S. M., Powers, D. M., Yazdani, A., Sammut, K., & Atyabi, A. (2016). Differential evolution for efficient AUV path planning in time variant uncertain underwater environment. arXiv preprint arXiv:1604.02523. https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.02523
19- Niu, H., Ji, Z., Savvaris, A., & Tsourdos, A. (2020). Energy efficient path planning for unmanned surface vehicle in spatially-temporally variant environment. Ocean Engineering, 196, 106766. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106766
20- Lutz, Max, and Thomas Meurer. "Optimal trajectory planning and model predictive control of underactuated marine surface vessels using a flatness-based approach." 2021 American Control Conference (ACC). IEEE, 2021. https://doi.org/10.23919/ACC50511.2021.9483265
21- Sayyadi, H., Babakhani, A. (2009). Path planning & trajectory tracking of AUVs in dynamic environments using intelligent converted solution and classical methods. Marine Engineering, 5(9), 19-34. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17357608.1388.5.9.2.0
22- Wang, Z., Li, G., & Ren, J. (2021). Dynamic path planning for unmanned surface vehicle in complex offshore areas based on hybrid algorithm. Computer Communications, 166, 49-56. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.012
23- Stutters, L., Liu, H., Tiltman, C., & Brown, D. J. (2008). Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 38(4), 581-589. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2008.919147
24- Zhao, L., Bai, Y., & Paik, J. K. (2023). Achieving optimal-dynamic path planning for unmanned surface vehicles: A rational multi-objective approach and a sensory-vector re-planner. Ocean Engineering, 286, 115433. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115433
25- Najari A, Seif M S. (2025). Dynamic modeling of surface vessel maneuvering based on deep learning using recurrent neural networks. marineeng; 21 (46) :80-88 http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.7
26- Taheri, E., Ferdowsi, M. H., & Danesh, M. (2019). Path planning on line for an autonomous underwater robot in an almost unknown environment using local Rapidly-exploring Random Tree (RRT) method. Darya Fanon (Marine Science Journal), 6(3), 1–14. SID. (In Persian). https://civilica.com/doc/1017855
27- Zhou, X., Wu, P., Zhang, H., Guo, W., & Liu, Y. (2019). Learn to navigate: cooperative path planning for unmanned surface vehicles using deep reinforcement learning. Ieee Access, 7, 165262-165278. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953326