دنبال‌یابی مسیر و حرکت گروهی رونده‌های زیرسطحی خودگردان بر مبنای روش رهبر-پیرو

محمدتقی ثابت[۱*]، حسین نورمحمدی[۲]

[۱] استادیار ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر-پژوهشکده علوم و فناوری شمال، sabet_mt@mut.ac.ir
[۲] استادیار ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر-پژوهشکده علوم و فناوری شمال، hnourmohammadi@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی:
رونده زیرسطحی خودگردان
دنبال‌یابی مسیر
حرکت گروهی
روش رهبر-پیرو

چکیده

با افزایش پیچیدگی ماموریت‌های زیر آب، محققان علاقه زیادی به طراحی و ساخت رونده‌های زیرسطحی خودگردان با قابلیت حرکت هماهنگ و گروهی پیدا کردند. در اجراء یک ماموریت پیچیده، سامانه‌های گروهی بر یک رونده تنها برتری خاصی دارند. در این مقاله هدف طراحی کنترل کننده هوشمند برای کنترل گروهی از رونده‌های زیرسطحی خودگردان با معماری رهبر-پیرو مقاوم است. در سامانه کنترل گروهی رهبر-پیرو از کنترل گروهی مبتنی بر رفتار نیز در طراحی الگوریتم بهره می‌گیریم، تا در مواقع رخدادهای پیش‌بینی نشده سامانه کنترل گروهی دچار اختلالات خاصی نشود. برای بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف و در حضور نواقص قابل رخداد، از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

Path following and Cooperative Motion of Autonomous Underwater Vehicles Based on Leader-Follower method

Mohammadtaghi Sabet [1*], Hossein Nourmohammadi[2]

[1] Faculty of Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Iran, sabet_mt@mut.ac.ir
[2] Faculty of Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Iran, hnourmohammadi@mut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 Dec 2023
Accepted: 12 May 2024
Available online: 8 Jun 2024

Keywords:
AUV
Path Following
Cooperative Motion
Leader-Follower Method

ABSTRACT

With the increasing complexity of underwater missions, researchers have become very interested in designing and manufacturing Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) with ability of cooperative motion. In performing a complex mission, a cooperative systems have a special advantage over a single vehicle. The aim of this article is to design an intelligent controller to control a group of AUVs with a robust leader-follower architecture. In the leader-follower formation control system, we also use behavior-based cooperative control in the design of the algorithm, so that the cooperative control system does not fail in during disturbance environmental and unforeseen events. To validation of the proposed method in different conditions and in the presence of possible defects, simulation in the MATLAB software has been used.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

۱ - مقدمه

امروزه با توسعه ماموریت‌ها در زیر آب نیاز به استفاده از سامانه‌های هوشمند دریایی از جمله رونده‌های زیرسطحی خودگردان[۱] افزایش یافته است. این رونده‌ها برای مأموریت‌های مختلف از جمله اکتشاف، شناخت عوارض زیرآبی، تولید نقشه‌های جغرافیایی و ژرفاسنجی، عملیات نظامی و غیره استفاده می‌شوند [۱-۳]. پیچیدگی ماموریت‌های زیر آبی، محققان زیادی را به سمت طراحی و ساخت رونده‌های زیرسطحی خودگردان با قابلیت حرکت هماهنگ و گروهی سوق داده است. دانش ربات‌های گروهی که از طبعیت الهام گرفته شده در واقع ترکیبی از هوش[۲] و ربات‌های گروهی است که از جنبه‌های مختلف توانایی‌های شگرفی ایجاد خواهد کرد [۴]. در انجام ماموریت‌های پیچیده، استفاده از یک سامانه شامل مجموعه‌ای از رونده‌های همکار و هماهنگ به دلیل بهره‌وری[۳] بیشتر، اقتصادی[۴] بودن و افزونگی[۵]، بر استفاده از یک رونده تنها ارجعیت دارد [۵]. مطابق مراجع موجود، کنترل هماهنگ مسیر حرکتی به همراه آرایش و پیکره‌بندی مشخص به سه روش اصلی رفتار مبنا[۶] [۶-۷]، ساختار مجازی[۷] [۸-۹] و روش رهبر-پیرو[۸] [۱۰-۱۱] قابل تفکیک است. در بین روش‌های مطرح شده روش رهبر-پیرو به دلیل سادگی، حجم ارتباطی پایین و قابلیت اطمینان[۹] بالاتر بیشتر مورد استقبال محققان قرار گرفته است [۱۲].

در روش رهبر-پیرو به منظور انجام ماموریت کلی، مسئولیت تولید مسیر و دنبال‌یابی مسیر[۱۰] بر عهده رونده رهبر است. با توجه به دلایل مطرح شده تحقیقات مهمی در زمینه روش رهبر-پیرو صورت گرفته که منجر به نتایج مهمی شده است [۱۳-۲۳]. شجاعی [۱۳] در کار تحقیقاتی خود یک کنترلر عصبی-تطبیقی[۱۱] بر مبنای روش رهبر-پیرو برای کنترل گروهی رونده‌های زیرسطحی خودگردان ارائه کرده است. داس و همکارانش [۱۴] مساله کنترل گروهی با روش رهبر-پیرو را با حضور موانع محیطی بررسی کردند. به منظور تولید مسیر برای اجتناب از موانع محیطی آنها از روش تابع پتانسیل مجازی[۱۲] و بهینه‌سازی به روش کولونی مورچه[۱۳] استفاده کردند. پانگ و همکارانش [۱۵] با استفاده از یک اندازه‌گیر فاصله و زاویه نسبی یک حرکت گروهی بر مبنای روش رهبر-پیرو را با استفاده از روش کنترلی پس‌گام پیاده‌سازی کردند. ژائو و همکارش [۱۶] در کار تحقیقاتیشان با استفاده از روش کنترلی لیاپانوف مستقیم و پس‌گام مساله کنترل و ردیابی مسیر برای یک مجموعه از رونده‌های هوشمند زیرسطحی که در قالب آرایش رهبر–پیرو حرکت کرده، را حل کردند. یان و همکارانش [۱۷] روش کنترل آرایش رهبر-پیرو را برای حرکت گروهی چندین رونده زیرسطحی بدون‌سرنشین در حضور عدم‌قطعیت‌های موجود در مدل، اغتشاشات ناشی از جریان زیرسطحی و اختلالات موجود در ارتباطات بین رونده‌ها استفاده کردند. بی‌آن و همکارانش یک طرح کنترل هماهنگ سه بعدی رهبر-پیرو که ترکیبی از کنترل مد لغزشی[۱۴] و تکنیک پس‌گام است، برای حرکت هماهنگ چندین رونده زیرسطحی خودگردان پیشنهاد دادند [۱۸]. لی و همکارانش [۱۹] روش کنترل آرایش مقاوم و متغیر با زمان به منظور کنترل هماهنگ چندین رونده زیرسطحی خودگردان پیشنهاد دادند که عملکرد مناسبی در شرایط حضور اغتشاشات محیطی و اشباع ورودی‌های کنترلی دارد. یان و همکارانش [۲۰] مساله کنترل گروهی چندین رونده زیرسطحی خودگردان با روش رهبر-پیرو را در حضور چالش ناشی از تاخیرات و قطعی ارتباطی را بررسی کردند. آقای وانگ و همکارانش [۲۱-۲۲] در مقاله تحقیقاتی خود، روش رهبر-پیرو را برای حرکت گروهی چندین رونده زیرسطحی خودگردان با کنترلر مد لغزشی بر مبنای شبکه عصبی-تطبیقی پیاده‌سازی کردند. وانگ و همکارانش [۲۳] روش کنترل گروهی رهبر-پیرو را برای کنترل یک مجموعه سه‌تایی از رونده‌های زیرسطحی خودگردان استفاده کردند.

با وجود تحقیقات خوبی که در این زمینه صورت گرفته، اما هنوز چالش‌های مهمی در این زمینه تحقیقاتی وجود دارد. در بیشتر کارهای انجام شده مدل‌سازی دینامیک حرکت رونده‌های زیرسطحی در دو بعد انجام شده است [۲۴]. در کنترل حرکت گروهی و دنبال‌یابی مسیر در دو بعد، از چالش‌های کنترل در بعد سوم صرف نظر می‌شود. در اکثر تحقیقات انجام شده معادلات دینامیکی و سامانه کنترل گروهی طراحی شده در دستگاه‌های مختصات محلی انجام شده است [۲۵-۲۷]. در صورتی که در یک الگوریتم کنترل گروهی کاربردی که در محیط واقعی و عملی قابل کاربرد است، باید در دستگاه ناوبری جغرافیایی محلی و طبق مدل

---

[۱] Autonomous Underwater vehicle (AUV)
[۲] Intelligence
[۳] Efficiency
[۴] Economy
[۵] Redundancy
[۶] Behavioral based
[۷] Virtual structure
[۸] Leader-follower
[۹] Reliability
[۱۰] Path following
[۱۱] Neural-adaptive
[۱۲] Artificial potential
[۱۳] Ant colony
[۱۴] Sliding mode

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

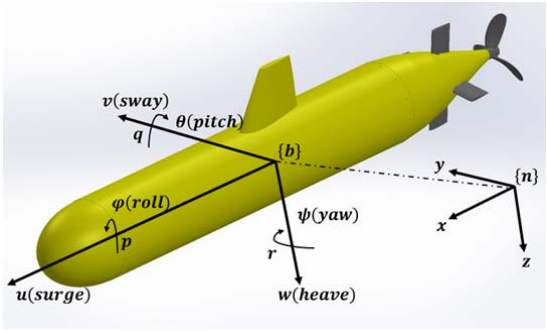
WGS-84 استخراج شود. یکی از پارامترهایی که صحت عملکرد یک الگوریتم حرکت گروهی رونده‌های زیرسطحی خودگردان را تایید می‌کند، مقاوم بودن آن نسبت به اختلالات و نواقص احتمالی در حین ماموریت است. برخی از این اختلالات از جمله تاخیر در انتقال داده از طریق مودم، اشباع شدن ورودی‌های کنترلی، جریانات زیرسطحی و اشباع نیروی رانش رونده‌ها در تحقیقات موجود بررسی شده است [۲۸-۲۹]. صیادی و همکارانش [۳۰] با روش کنترل گام به عقب، یک سامانه کنترلی برای کنترل مسیر رونده‌های زیرسطحی خودگردان طراحی کردند. آنها با استفاده از قواعد تئوری گراف مجموعه‌ای از رونده‌های زیرسطحی را به صورت گروهی کنترل نمودند. حق پرست و همکارانش [۳۱] با استفاده از روش رهبر پیرو یک آرایش حرکت شش ضلعی برای حرکت گروهی مجموعه‌ای از رونده‌های بدون‌سرنشین زیرسطحی ایجاد کردند. کنترل آرایش ربات‌ها در یک ساختار سوئیچ شونده و همراه با تاخیر بررسی شده است. اما در اکثر این تحقیقات از اختلالات و نواقص احتمالی در مجموعه رونده‌ها از جمله نقص رونده رهبر، نقص در هر یک از رونده‌های پیرو و قطع ارتباط بین هر یک از رونده‌های پیرو با رونده رهبر صرف‌نظر شده است.

در این مقاله هدف طراحی و پیاده‌سازی یک الگوریتم حرکت گروهی مقاوم برای مجموعه رونده‌های زیرسطحی خودگردان است. به این منظور از مدل دینامیک شش درجه آزادی رونده‌های زیرسطحی خودگردان در فضای سه بعدی استفاده خواهد شد. روش رهبر-پیرو مقاوم پیشنهادی در این تحقیق در دستگاه مختصات جغرافیایی و طبق مدل WGS-84 استخراج می‌شود. الگوریتم پیشنهادی نسبت به اختلالات و نواقص ایجاد شده در مجموعه از جمله نقص در هر یک از رونده‌ها و قطع ارتباط هر رونده با مجموعه مقاوم بوده و عکس‌العمل مناسبی در وقوع رخدادهای ناخواسته خواهد داد.

در ادامه مقاله در بخش دوم تئوری مربوط به دینامیک حرکت رونده زیرسطحی در فضای شش درجه آزادی ارائه خواهد شد. سپس در بخش سوم الگوریتم حرکت گروهی و نحوه تولید هدایت مطلوب برای هر یک از رونده‌های رهبر و پیرو ارائه خواهند شد. در بخش چهارم نتایج مربوط به شبیه‌سازی حالات مختلف ارائه می‌شوند. در بخش نهایی نتیجه‌گیری بدست آمده از مقاله حاضر گزارش می‌شود.

۲ - مدل‌سازی شش درجه آزادی دینامیک رونده زیرسطحی خودگردان

معادلات حرکت یک رونده زیرسطحی به دو بخش سینماتیک و سینتیک قابل تفکیک است. در فضای سه بعدی به منظور توصیف حرکت یک رونده زیرسطحی شش مختصه مستقل مطابق شکل (۱)، لازم است.



شکل (۱) مختصه‌های حرکت یک رونده زیرسطحی خودگردان در فضای سه بعدی.

که $\{b\}$ معرف دستگاه بدنی و $\{n\}$ معرف دستگاه جغرافیایی محلی[۱۵] یا NED است.

۲-۱- معادلات سینماتیک زیرسطحی

در فضای سه بعدی ماتریس دوران توسط سه چرخش حول محورهای z، y و x به صورت $\mathbf{C}_b^n(\boldsymbol{\Theta}_{nb})$ $\left(\boldsymbol{\Theta}_{nb}=[\varphi,\theta,\psi]^T\right)$ تعریف می‌شود. با استفاده از این ماتریس دوران هر بردار تعریف شده در دستگاه بدنی قابل انتقال به دستگاه NED است. بردار سرعت در دستگاه بدنی نسبت به دستگاه NED $\mathbf{v}_{b/n}^b=[u,v,w]^T$ تعریف می‌شود. بنابراین بردار سرعت در دستگاه NED $\dot{\mathbf{p}}_{b/n}^b=\left[\dot{p}_x,\dot{p}_y,\dot{p}_z\right]^T$ به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است [۳۲].

(۱)

$$\dot{\mathbf{p}}_{b/n}^n=\mathbf{C}_b^n(\boldsymbol{\Theta}_{nb})\mathbf{v}_{b/n}^b$$
$$\Updownarrow$$
$$\mathbf{C}_b^n(\boldsymbol{\Theta}_{nb})=\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta\mathrm{c}\psi & -\mathrm{s}\psi\mathrm{c}\varphi+\mathrm{c}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{s}\varphi & \mathrm{s}\psi\mathrm{s}\varphi+\mathrm{c}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{c}\varphi\\ \mathrm{c}\theta\mathrm{s}\psi & \mathrm{c}\psi\mathrm{c}\varphi+\mathrm{s}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{s}\varphi & -\mathrm{c}\psi\mathrm{s}\varphi+\mathrm{s}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{c}\varphi\\ -\mathrm{s}\theta & \mathrm{c}\theta\mathrm{s}\varphi & \mathrm{c}\theta\mathrm{c}\varphi\end{bmatrix}$$

که $\mathrm{c}=\cos(\cdot)$ و $\mathrm{s}=\sin(\cdot)$. همچنین، بردار سرعت زاویه‌ای در دستگاه بدنی $\boldsymbol{\omega}_{b/n}^b=[p,q,r]^T$، و بردار نرخ زوایای اویلر $\dot{\boldsymbol{\Theta}}_{nb}=\left[\dot{\varphi},\dot{\theta},\dot{\psi}\right]^T$ با استفاده از یک ماتریس انتقال $\mathbf{T}_{\boldsymbol{\Theta}}(\boldsymbol{\Theta}_{nb})$ به صورت رابطه (۲) با هم ارتباط دارند.

[۱۵] Local Geographical Frame

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}}_{nb}=\mathbf{T}_{\boldsymbol{\Theta}}\left(\boldsymbol{\Theta}_{nb}\right)\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}$$
$$\Updownarrow$$
$$\mathbf{T}_{\boldsymbol{\Theta}}\left(\boldsymbol{\Theta}_{nb}\right)=\begin{bmatrix}1 & \mathrm{ta}(\theta)\mathrm{s}(\varphi) & \mathrm{ta}(\theta)\mathrm{c}(\varphi)\\ 0 & \mathrm{c}(\varphi) & -\mathrm{s}(\varphi)\\ 0 & \mathrm{s}(\varphi)/\mathrm{c}(\theta) & \mathrm{c}(\varphi)/\mathrm{c}(\theta)\end{bmatrix} \quad (۲)$$

که $\mathrm{ta}=\tan(\cdot)$. با ترکیب رابطه (۱) و (۲) معادلات سینماتیک حرکت یک زیرسطحی خودگردان به صورت رابطه (۳) قابل بیان است.

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}=\mathbf{J}_{\boldsymbol{\Theta}}\left(\boldsymbol{\eta}\right)\mathbf{v}$$
$$\Updownarrow$$
$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{p}}_{b/n}^{n}\\ \dot{\boldsymbol{\Theta}}_{nb}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{C}_{b}^{n}\left(\boldsymbol{\Theta}_{nb}\right) & \mathbf{0}_{3\times3}\\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{T}_{\boldsymbol{\Theta}}\left(\boldsymbol{\Theta}_{nb}\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{v}_{b/n}^{b}\\ \boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\end{bmatrix} \quad (۳)$$

۲-۲- معادلات سینتیک زیرسطحی

برای محاسبه معادلات سینتیک حرکت یک زیرسطحی از قوانین نیوتن-اویلر استفاده می‌شود. این معادلات در دستگاه بدنی استخراج می‌شوند. معادلات حرکت شامل سه معادله سینتیک حرکت انتقالی و سه معادله سینتیک حرکت دورانی می‌باشند [۳۳].

$$m\begin{pmatrix}\dot{\mathbf{v}}_{b/n}^{b}+\dot{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^{b}\times\mathbf{r}_{g}^{b}+\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\times\mathbf{v}_{b/n}^{b}+\\ +\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\times\left(\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\times\mathbf{r}_{g}^{b}\right)\end{pmatrix}=\mathbf{f}_{b}^{b} \quad (۴)$$

$$\mathbf{I}_{b}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^{b}+\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\times\mathbf{I}_{b}\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}+ \\ +m\mathbf{r}_{g}^{b}\times\left(\dot{\mathbf{v}}_{b/n}^{b}+\boldsymbol{\omega}_{b/n}^{b}\times\mathbf{v}_{b/n}^{b}\right)=\mathbf{m}_{b}^{b} \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، $\mathbf{f}_{b}^{b}=\left[X_{force},Y_{force},Z_{force}\right]^{T}$ بردار نیرو و $\mathbf{m}_{b}^{b}=\left[K_{moment},M_{moment},N_{moment}\right]^{T}$ بردارگشتاور حول مرکز مختصات بدنی و $\mathbf{r}_{g}^{b}=\left[x_{g},y_{g},z_{g}\right]^{T}$ بردار مرکز جرم نسبت به مرکز مختصات هستند. فرم ماتریسی معادلات حرکت به صورت زیر قابل استخراج است.

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}}+\mathbf{C}_{RB}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}=\boldsymbol{\tau}_{RB}$$
$$\boldsymbol{\tau}_{RB}=\boldsymbol{\tau}_{hyd}+\boldsymbol{\tau}_{hs}+\boldsymbol{\tau}_{control}+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{propulsion}} \quad (۶)$$

که $\mathbf{M}_{RB}$ و $\mathbf{C}_{RB}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}$ ماتریس اینرسی و ماتریس نیروهای کوریولیس و مرکزگرا، $\mathbf{v}$ بردار سرعت (خطی و زاویه‌ای) و $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ نیروهای خارجی هستند. نیروهای خارجی شامل: نیروهای هیدرودینامیک، هیدروستاتیک، کنترلی و رانشی هستند.

در نهایت مدل دینامیک یک رونده زیرسطحی به فرم ماتریس زیر قابل استخراج است.

$$\underbrace{\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}}+\mathbf{C}_{RB}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}}_{rigid-body\ forces}+\underbrace{\mathbf{M}_{A}\dot{\mathbf{v}}+\mathbf{C}_{A}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}+\mathbf{D}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}}_{hydrodynamic\ forces}+ \\ +\underbrace{\mathbf{g}\left(\boldsymbol{\eta}\right)}_{hydrostatic\ forces}=\boldsymbol{\tau} \quad (۷)$$
$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}+\mathbf{C}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}+\mathbf{D}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}+\mathbf{g}\left(\boldsymbol{\eta}\right)=\boldsymbol{\tau}$$

که:

جدول (۱) معرفی ماتریس‌ها و بردارهای نیرویی رابطه (۷).

ماتریس‌ها و بردارهای نیرویی	توصیف
$\mathbf{M}=\mathbf{M}_{RB}+\mathbf{M}_{A}$	ماتریس اینرسی جسم صلب و جرم افزوده
$\mathbf{C}\left(\mathbf{v}\right)=\mathbf{C}_{RB}\left(\mathbf{v}\right)+\mathbf{C}_{A}\left(\mathbf{v}\right)$	ماتریس کوریولیس-مرکزگرا جسم صلب و جرم افزوده
$\mathbf{D}\left(\mathbf{v}\right)$	ماتریس میرایی
$\mathbf{g}\left(\boldsymbol{\eta}\right)$	بردار نیروها و گشتاورهای گرانشی و بویانسی
$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\tau}_{Lift}+\boldsymbol{\tau}_{Control}+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{Propulsion}}$	بردار نیرویی ورودی‌های کنترلی، نیروهای لیفت و رانشی

با توجه به روابط (۳) و (۷)، مدل شش درجه آزادی از بدنه زیرسطحی با ۱۲ متغیر حالت به صورت رابطه (۸) قابل ارائه است.

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{v}}\\ \dot{\boldsymbol{\eta}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{M}^{-1}\left(\boldsymbol{\tau}-\mathbf{C}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}-\mathbf{D}\left(\mathbf{v}\right)\mathbf{v}-\mathbf{g}\left(\boldsymbol{\eta}\right)\right)\\ \mathbf{J}_{\boldsymbol{\Theta}}\left(\boldsymbol{\eta}\right)\mathbf{v}\end{bmatrix} \quad (۸)$$

متغیرهای حالت به صورت $\mathbf{x}_{state}=\begin{bmatrix}\mathbf{v} & \boldsymbol{\eta}\end{bmatrix}^{T}$ قابل تعریف‌اند، که شامل سرعت و موقعیت خطی، سرعت زاویه‌ای و وضعیت می‌باشند.

۳ – الگوریتم کنترل گروهی پیشنهادی

در این بخش هدف ارائه الگوریتم پیشنهادی برای حرکت گروهی رونده‌های زیرسطحی خودگردان است. مطابق توضیحات مطرح شده طرح پیشنهادی برای کنترل گروهی رونده‌ها استفاده از روش رهبر-پیرو است. در روش کنترل گروهی رهبر-پیرو پیشنهادی از کنترل آرایش مبتنی بر رفتار نیز در طراحی الگوریتم بهره می‌گیریم، تا در مواقع رخدادهای پیشبینی نشده سامانه کنترل گروهی دچار اختلالات نشود. روش پیشنهادی برای مسیرهای با نقاط هدف از پیش تعریف شده، قابل کاربرد است. در صورت بروز هر گونه اختلال و انحراف از انجام ماموریت، راهبردهایی برای بازگرداندن ساختار گروهی به حالت مطلوب وجود خواهد داشت.

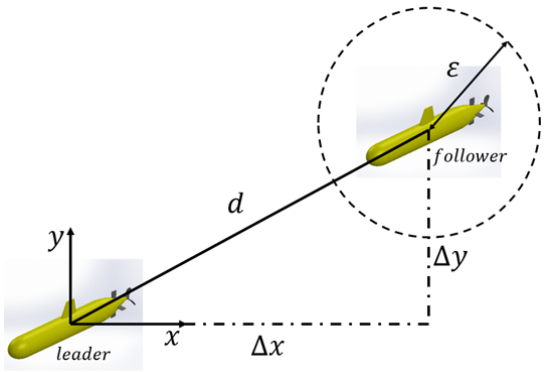
اعضاء تیم در این حرکت گروهی به رونده رهبر و رونده‌های پیرو قابل طبقه‌بندی و تفکیک بوده و تنها یک رونده رهبر در یک تیم وجود دارد. روش پیشنهادی در این مقاله در سه بخش شامل: آرایش‌بندی، تولید مسیر و هدایت و الگوریتم کنترلی قابل توصیف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

است. تمامی معادلات موجود در الگوریتم پیشنهادی طبق مدل WGS-84 بیان خواهند شد.

۳-۱- آرایش‌بندی

در الگوریتم پیشنهادی در آرایش تیم رونده‌ها از ساختارهای مجازی الهام گرفته شده است. در این الگوریتم رونده‌ها در یک سامانه مختصاتی که موقعیت رونده رهبر به عنوان مبدا در نظر گرفته شده قرار می‌گیرند. این بدان معناست که رونده‌های پیرو با یک اختلاف موقعیتی مشخص در راستای x و y نسبت به رونده رهبر قرار می‌گیرند. به عنوان مثال رونده پیرو شماره i با یک جابه‌جایی به اندازه Δx_i در راستای محور x و یک جابه‌جایی به اندازه Δy_i در راستای محور y نسبت به رونده رهبر قرار می‌گیرد. در شکل (۲) جابه‌جایی‌ها و قیدها برای یک تیم شامل یک رونده رهبر و یک رونده پیرو نشان داده شده است.



شکل (۲) نمایش جابه‌جایی، مسافت و قید موجود برای آرایش یک تیم شامل دو رونده.

مطابق رابطه (۹) یک محدودیت فاصله بین رونده رهبر و رونده پیرو ایجاد شده تا آرایش هندسی بین رونده‌ها حفظ شود. در این طراحی برای قید فاصله مطرح شده، یک حاشیه تغییر فاصله‌ای برای رونده پیرو در نظر گرفته شده است.

$$d \in \left[\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2}-\varepsilon, \sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2}+\varepsilon\right] \qquad (۹)$$

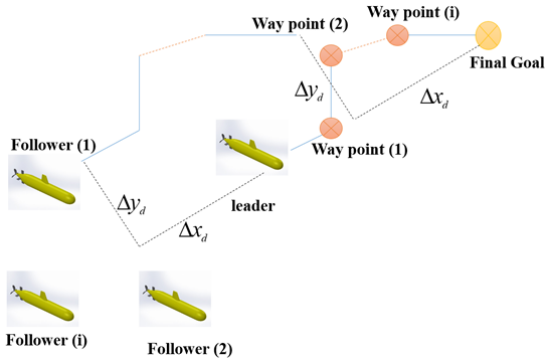
چون موقعیت رونده‌ها در دستگاه مختصات جغرافیایی و طبق مدل WGS-84 بیان می‌شود، حتما قبل از بررسی قید فاصله باید تبدیل مختصه جغرافیایی به مسافت انجام شود. به این منظور فرمول هورساین[۱۶] به منظور تعیین مسافت و زاویه دید نسبت به راستای شمال بین دو موقعیت جغرافیایی مشخص مطابق رابطه زیر قابل ارائه خواهد بود.

$$\begin{aligned} a &= \sin(\Delta L/2)^2+\cos(L_s)\times \\ &\quad \cos(L_M)\times\sin(\Delta l/2)^2, \\ c &= 2\times a\tan 2\left(\sqrt{a},\sqrt{1-a}\right), \\ d &= R\times c, \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که ΔL اختلاف عرض جغرافیایی[۱۷]، Δl اختلاف طول جغرافیایی[۱۸]، R شعاع زمین و d فاصله بین دو موقعیت جغرافیایی بر حسب متر هستند. همچنین L_S و L_M به ترتیب عرض جغرافیایی رونده‌های پیرو و رهبر هستند.

۳-۲- تولید مسیر و هدایت

مسیر رونده رهبر با توجه به موقعیت هدف‌های میانی (نقطه راه میانی[۱۹]) و هدف نهایی و زاویه دید بین رونده و نقاط هدف که با استفاده از روش هورساین تعیین می‌شود، تولید خواهد شد. با تولید مسیر هدایت برای رونده رهبر مسیر هدایت برای رونده‌های پیرو با توجه به شکل حرکتی و قید فاصله از پیش تعیین شده، تولید خواهد شد. در شکل (۳) شماتیکی از نحوه تولید مسیر برای رونده‌های رهبر و پیرو نشان داده شده است.



شکل (۳) شماتیکی از نحوه تولید مسیر برای رونده رهبر و رونده‌های پیرو.

در شکل (۳) نحوه تولید مسیر برای رونده رهبر ارائه شده است. مسیر این رونده با روش نقطه راه میانی تولید خواهد شد. تولید مسیر برای رونده‌های پیرو با استفاده از موقعیت رونده رهبر در هر لحظه ایجاد خواهد شد.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، رونده رهبر با استفاده از موقعیت نقطه راه‌ها و با بکارگیری روابط هورساین راستای حرکت مطلوب خود را تولید کرده و به ترتیب به سمت نقطه راه‌های متوالی حرکت خواهد کرد. رونده‌های پیرو نیز با دریافت سیگنال موقعیت رونده رهبر توسط یک لینک ارتباطی آکوستیکی

[۱۶] Haversine Formula

[۱۷] Latitude

[۱۸] Longitude

[۱۹] Waypoints

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

و نوع آرایش از پیش تعیین شده مسیر هدایت خود را طبق روابط زیر تولید خواهند نمود.

$$L_S = a\sin\begin{pmatrix}\sin(L_M)\times\cos(\delta)+\\ \cos(L_M)\times\sin(\delta)\times\cos(\gamma)\end{pmatrix}$$
$$l_S = l_M + a\tan 2\begin{pmatrix}\sin(\delta)\times\sin(\gamma)\times\cos(L_M),\\ \cos(\delta)-\sin(L_M)\times\sin(L_S)\end{pmatrix} \quad (۱۱)$$

که:

$$\gamma = a\tan 2(\Delta x_d, \Delta y_d)$$
$$d = \sqrt{(\Delta x_d)^2 + (\Delta y_d)^2} \quad (۱۲)$$
$$\delta = \frac{d}{R}$$

در روابط بالا، L و l به ترتیب عرض و طول جغرافیایی هستند. اندیس‌های M و S به ترتیب بیانگر رونده‌های رهبر و پیرو هستند. Δx_d و Δy_d فاصله مطلوب رونده پیرو نسبت به رونده رهبر در دو راستای x و y و در واحد متر هستند. R نیز در این روابط شعاع زمین خواهد بود.

۳-۳- الگوریتم کنترل آرایش

الگوریتم کنترلی پیشنهادی محدودیت‌های گروه را بررسی می‌کند و در صورت هرگونه اختلال ایجاد شده در گروه اقدام مناسب می‌کند. این الگوریتم در رده الگوریتم‌های کنترلی بر مبنای رفتار قرار گرفته و دو رفتار دنبال‌یابی مسیر[۲۰] و حفظ آرایش[۲۱] یک رونده را شامل می‌شود. در انجام ماموریت، دنبال‌یابی مسیر رفتار اصلی هر یک از رونده‌ها است و در انجام ماموریت استراتژی حرکت هماهنگ با رفتار حفظ آرایش اجراء خواهد شد.

۳-۳-۱- قیدهای گروهی و استراتژی حرکت گروهی

دو قید گروهی در روش کنترل آرایش مطابق جدول (۲) قابل تعریف است. قید C2 برای اطمینان از برخورد نکردن رونده‌ها وضع خواهد شد که نقض این محدودیت باید به تعویض رفتار از دنبال‌یابی مسیر یا حفظ آرایش به اجتناب از مانع منجر شود. همچنین برای حفظ آرایش، قید C1 برای هر رونده وضع می‌شود، و پنج استراتژی همکاری گروهی برای رسیدگی به نقض این محدودیت مطابق جدول (۳) طراحی می‌شود. استراتژی‌های همکاری گروهی بیانگر این منطق هستند که کدام رونده باید در شرایط مختلف تغییر رفتار دهند.

جدول (۲) قیدهای گروهی در روش کنترل آرایش

مشخصه قید	توصیف قید
C1	رونده پیرو همواره باید در یک محدوده شعاع ε از موقعیت مطلوب خود قرار داشته باشد.
C2	فاصله بین دو رونده باید همواره بزرگتر از d_{min} باشد.

جدول (۳) استراتژی همکاری گروهی برای ارضاء قید C1

مشخصه	وضعیت	عملکرد	علت عملکرد
S1	یک رونده پیرو در طول انجام ماموریت عقب بیافتد.	رونده رهبر باید برای یک بار از حرکت ایستاده و منتظر بماند.	به منظور پیوستن رونده پیرو به گروه متوقف می‌شود. زمان توقف رونده رهبر ۳۰ ثانیه است. این بازه زمانی با توجه به میزان سرعت حرکت رونده‌ها انتخاب شده است. اگر این زمان طولانی شود رونده پیرو خیلی از مجموعه دور می‌شود.
S2	رونده رهبر در طول انجام ماموریت عقب بیافتد.	رونده پیرو باید همواره ایستاده و منتظر بماند.	رونده پیرو به منظور عدم دور شدن از مجموعه تا زمانی که رونده رهبر متوقف است از حرکت می‌ایستد.
S3	رونده پیرو در اجراء ماموریت از رونده رهبر پیش بیافتد.	رونده پیرو باید همواره ایستاده و منتظر بماند.	رونده پیرو متوقف می‌شود تا رونده رهبر از آن پیشی بگیرد و در پشت رونده رهبر حرکت کند.
S4	رونده رهبر در اجراء ماموریت از رونده پیرو پیش بیافتد.	رونده رهبر باید برای یک بار از حرکت ایستاده و منتظر بماند.	رونده رهبر برای اینکه رونده پیرو عقب افتاده به مجموعه باز گردد متوقف می‌شود.
S5	رونده رهبر برای یک رونده پیرو بایستد و منتظر باشد.	همه رونده‌های پیرو باید از حرکت ایستاده و منتظر باشند.	زمانی که رونده رهبر در هر شرایطی متوقف شود، تمامی رونده‌های دیگر به منظور عدم دور شدن از گروه و حفظ آرایش متوقف می‌شوند.

حالت‌های S1 و S4 این موضوع را بیان می‌کنند که رونده رهبر منتظر می‌ماند و از حرکت می‌ایستد، یعنی برای رفتار حفظ آرایش‌بندی، یکبار برای هر رونده پیرو اگر عقب بماند و یکبار اگر رونده رهبر پیش بیافتد، برای رونده پیرو منتظر می‌ماند. این بدان معناست که اگر یک رونده پیرو یکبار قبلا قید را نقض کرده باشد، رونده رهبر دیگر آن را به عنوان عضوی از گروه در نظر نمی‌گیرد. هنگامی که قید برآورده شد یا زمانی که دوره انتظار که در شبیه‌سازی مدت زمان ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده، به پایان رسید، هر کدام که زودتر اتفاق افتاد، رونده رهبر به رفتار دنبال‌یابی مسیر مطلوب خود بازخواهد گشت. حالت‌های S2 و S3 بیان می‌کنند که در صورتی که رونده رهبر عقب بماند یا اینکه رونده پیرو به آن برسد، رونده پیرو باید همواره منتظر بماند و از حرکت بایستد. در این مورد هیچ دوره یا بازه زمانی انتظار وجود نداشته و رونده پیرو باید تا زمان برآورده شدن قید منتظر باشد. برای جلوگیری از نقض هر گونه قید توسط رونده‌های پیرو دیگر، حالت S5 بیان می‌کند که زمانی که رونده پیرو از حرکت ایستاد یا

[۲۰] Path Following
[۲۱] Formation Preservation

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

منتظر یک رونده پیرو بود تمامی رونده‌های پیرو دیگر باید از حرکت بایستند و منتظر باشند.

۳-۳-۲- حلقه کنترل برای حرکت گروهی

حلقه کنترل برای حرکت گروهی هر بار برای یک رونده پیرو بررسی خواهد شد. این حلقه شامل شروط نقض قیدها خواهد بود. چنانچه هر کدام از این شروط برقرار شوند رونده باید متناسب با شرط، عملکرد درست از خود نشان دهد. این شروط شامل موارد زیر خواهند بود.

$$\begin{aligned}
&\textbf{condition1:} && d \notin \left[d_{MS} \pm \varepsilon\right] \\
&\textbf{condition1.1:} && d > \left(d_{MS} + \varepsilon\right) \;\&\; \%S < \%M \\
&\textbf{condition1.2:} && d > \left(d_{MS} + \varepsilon\right) \;\&\; \%S > \%M \\
&\textbf{condition1.3:} && d < \left(d_{MS} - \varepsilon\right) \;\&\; \%S > \%M \\
&\textbf{condition1.4:} && d < \left(d_{MS} - \varepsilon\right) \;\&\; \%S < \%M \\
&\textbf{condition2:} && d < d_{\min}
\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه d فاصله بین دو رونده است. d_{MS} فاصله مطلوب بین یک رونده پیرو و رونده رهبر است. علامت % بیانگر میزان پیشروی در انجام ماموریت می‌باشد. d_{min} کمینه فاصله مجاز بین دو رونده و ε بیشینه انحراف مجاز برای رونده پیرو است.

اگر یک رونده پیرو بیش از حد مجاز از موقعیت مطلوب خود منحرف شود و قید C1 را نقض کند، شرط ۱ فعال می‌شود. شرایط ۱-۱ تا ۱-۴ برای طبقه‌بندی نوع انحرافات و انتخاب نوع استراتژی حرکت هماهنگ استفاده می‌شوند. شرط ۱-۱ زمانی فعال می‌شود که رونده پیرو از رونده رهبر زیاد فاصله گرفته و میزان پیشروی رونده رهبر از رونده پیرو بیشتر باشد که این بدان معناست که رونده پیرو عقب افتاده است. شرط ۱-۲ در صورتی فعال خواهد شد که رونده پیرو از رونده رهبر بسیار دور باشد و اما در انجام ماموریتش پیشروی بالاتری داشته باشد که بیانگر این است که رونده رهبر دچار نقص شده است. شرایط ۱-۳ و ۱-۴ نیز به دلیل میزان پیشرفت در یکی از رونده‌های پیرو و رهبر، دو رونده خیلی به هم نزدیک شده‌اند. شرط ۲ نیز زمانی فعال شده که فاصله بین دو رونده از حداقل مجاز کمتر شده باشد.

```
while formation control active
    if Condition 2 / C2 violated
        follower stop
    elseif Condition 1 / C1 violated
        if Condition 1.1
            S1, S5
        elseif Condition 1.2
            S3
        elseif Condition 1.3
            S4
        elseif Condition 1.4
            S2, S5
        end
    end
end
```

(۱۴)

الگوریتم ارائه شده در رابطه (۱۴) نشان می‌دهد که چگونه قیدها، استراتژی‌های حرکت گروهی و شرایط ارائه شده در رابطه (۱۳) در یک حلقه کنترلی برای یک حرکت گروهی متشکل از رونده رهبر و رونده‌های پیرو شکل می‌گیرد. باید توجه داشت که استراتژی S5 فقط در صورتی فعال می‌شود که تعداد رونده‌های پیرو تیم از یک رونده بیشتر شود. همواره شرط ۲ قبل از شرط ۱ بررسی می‌شود زیرا همواره عدم برخورد بر حفظ آرایش اولویت دارد.

۳-۴- طرح سامانه هدایت برای هر یک از رونده‌ها

در یک سامانه حرکت گروهی رونده‌های زیرسطحی، هر رونده به منظور قرارگیری در موقعیت مطلوب و مناسب خود برای ایجاد یک آرایش منظم نیاز به دو دسته طرح هدایت شامل هدایت سرعت حرکت و هدایت سمت حرکت خواهد داشت. بنابراین با توجه به نوع ماموریت هر رونده، هدایت مناسب آن طراحی خواهد شد. در این میان رونده‌های پیرو دارای هدایت مشابه بوده و اما هدایت رونده رهبر با رونده‌های پیرو متفاوت است. در ادامه نحوه تولید هدایت برای هر کدام از انواع رونده‌ها ارائه خواهد شد.

۳-۴-۱- هدایت رونده رهبر

رونده رهبر مسئولیت هدایت مجموعه رونده‌ها به سمت اهداف میانی و در نهایت موقعیت هدف نهایی را دارد. بنابراین وظیفه اصلی تولید مسیر رسیدن به هدف بر عهده این رونده است. هدایت طراحی شده برای این رونده از نوع هدایت دید مستقیم است. در این نوع هدایت رونده همواره موقعیت اهداف میانی و در نهایت هدف نهایی را معیار قرار داده و با محاسبه زاویه دید اهداف نسبت به راستای شمال واقعی که با استفاده از رابطه هورساین استخراج خواهد نمود، مسیر خود را تعیین می‌کند. رابطه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

هورساین برای محاسبه زاویه بین دو موقعیت جغرافیایی نسبت به راستای شمال واقعی مطابق رابطه زیر قابل ارائه است.

$$\begin{aligned} A_1 &= \cos(L_M)\sin(L_G) - \\ &\quad \sin(L_M)\cos(L_G)\cos(l_G - l_M) \\ A_2 &= \sin(l_G - l_M)\cos(L_G) \\ Bearing &= \frac{\pi}{2} - a\tan 2(A_1, A_2) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

در رابطه بالا، L_M و l_M به ترتیب طول و عرض جغرافیایی رونده رهبر و L_G و l_G به ترتیب طول و عرض جغرافیایی موقعیت اهداف میانی یا هدف نهایی هستند. همچنین Bearing زاویه دید مستقیم موقعیت هدف توسط رونده رهبر نسبت به راستای شمال جغرافیایی است. این زاویه در واقع به عنوان زاویه فرمان سمت برای رونده رهبر قابل تعریف است.

فرمان زاویه سمت نهایی برای اعمال به رونده زیرسطحی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$\psi_{com} = Bearing_{LOS} + \psi_{dev} \quad (۱۶)$$

پس از تولید فرمان زاویه سمت برای رونده رهبر نوبت به فرمان سرعت رونده رهبر خواهد رسید. مطابق مراجع موجود [۳۲] و [۳۶] سرعت یک رونده زیرسطحی رابطه مستقیمی با توان دوم دور پروانه رونده دارد. برای رونده‌های زیرسطحی مورد نظر یک سامانه رانش با قابلیت تنظیم دور در چند گام یا دور مختلف در نظر گفته می‌شود. به این ترتیب که با تغییر شماره فرمان سرعت از ۱ تا ۶ دور موتور طوری تغییر کرده که سرعت رونده به ترتیب متناسب با شماره فرمان موتور ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متربرثانیه خواهد شد. رونده رهبر در حالت عادی و زمانی که هیچ یک از قیود و شروط مطرح شده نقض نشده باشند، با سرعت ۲ متربرثانیه حرکت می‌کند. با توجه به الگوریتم ارائه شده در رابطه (۱۳) در حالتی که شروط ۱-۱ و ۱-۳ اتفاق میافتد یعنی زمانی که فاصله رهبر و پیرو خیلی از هم دور شده و رونده رهبر پیشروی بیشتر دارد و همچنین زمانی که فاصله این دو رونده به هم نزدیک شده و رونده پیرو پیشروی بیشتری دارد، رونده رهبر متوقف می‌شود. زمان توقف رونده رهبر برای هر کدام از رونده‌ها یکبار و به مدت ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۲- هدایت رونده پیرو

رونده‌های پیرو با توجه به نوع مسولیتشان و اینکه مسئولیت هدایت کل گروه را نداشته و تنها با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از موقعیت جغرافیایی رونده رهبر وظیفه قرارگیری در یک آرایش از پیش تعیین شده خواهند داشت، در واقع یک ساختار هدایتی محلی دارند. به این صورت که موقعیت رونده رهبر را در هر بازه زمانی مشخص توسط لینک‌های ارتباطی که شامل مودم مخابراتی و آکوستیکی بوده دریافت می‌کنند، مسیر حرکتی خود را مطابق رابطه (۱۱) تولید می‌کنند. با تولید مسیر حرکتی برای رونده‌های پیرو فاز دنبال‌یابی مسیر توسط این رونده‌ها آغاز خواهد شد.

با توجه به توضیحات مطرح شده، مسیر مطلوب برای حرکت هر رونده پیرو با استفاده از موقعیت ارسالی از رونده رهبر مطابق رابطه (۱۱) تولید خواهد شد. بنابراین موقعیت‌های جغرافیایی مطلوب و واقعی برای رونده پیرو iام به صورت l_{di} و L_{di} قابل محاسبه هستند. با داشتن موقعیت مطلوب، هدایت مطلوب برای زاویه سمت به صورت زیر برای هر رونده پیرو محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} A_1 &= \cos(\mathrm{L}_{Si})\sin(L_{di}) - \\ &\quad \sin(\mathrm{L}_{Si})\cos(L_{di})\cos(l_{di} - l_{Si}) \\ A_2 &= \sin(l_{di} - l_{Si})\cos(L_{di}) \\ Bearing_{di} &= \frac{\pi}{2} - a\tan 2(A_1, A_2) \end{aligned} \quad (۱۷)$$

که l_{di} و L_{di} به ترتیب عرض و طول جغرافیایی رونده پیرو iام است. بنابراین در هر لحظه از زمان فرمان زاویه سمت رونده پیرو تولید شده و رونده به سمت موقعیت مطلوب هدایت می‌شود.

پس از تولید فرمان زاویه سمت برای رونده‌های پیرو نوبت به فرمان سرعت خواهد رسید. در این رونده‌ها نیز مانند رونده رهبر سرعت رونده با ۶ گام مختلف دور پروانه تنظیم خواهد شد. رونده‌های پیرو نیز مانند رونده رهبر در حالت عادی و زمانی که هیچ یک از قیود و شروط مطرح شده نقض نشده باشند، با سرعت ۲ متربرثانیه حرکت می‌کند. حال اگر هر کدام از قیود و شروط نقض شده باشد طبق سناریوی زیر عمل خواهد شد.

چنانچه قید C2 برای هر کدام از رونده‌های پیرو فعال شود، و رونده بیش از حد به رونده رهبر نزدیک شود، موتور رونده پیرو دور خود را کاهش داده تا رونده متوقف شود. تا زمانی که قید C2 فعال است رونده پیرو مورد نظر از حرکت خواهد ایستاد. چنانچه شرط ۱-۱ برای هرکدام از رونده‌های دیگر فعال شود، چون رونده رهبر از حرکت خواهد ایستاد، متعاقبا رونده‌های پیرو دیگر نیز از سرعت خود کاسته و متوقف می‌شوند. اما آن رونده پیرو که از گروه عقب افتاده تا ۳۰ ثانیه که رونده رهبر و دیگر رونده‌های پیرو که برای رسیدن رونده عقب افتاده متوقف هستند با سرعت ۲ متربرثانیه به حرکت خود ادامه می‌دهد، اما چنانچه همچنان از گروه عقب افتاده باشد و گروه پس از ۳۰ ثانیه شروع به حرکت کنند، رونده عقب افتاده تا مدت زمان ۱۰۰ ثانیه با سرعت ۲/۵ متربرثانیه به حرکت خود ادامه می‌دهد، و در نهایت اگر باز همچنان از گروه عقب باشد، تا ۲۰۰ ثانیه دیگر با سرعت بیشینه ۳ متربرثانیه به حرکت خود ادامه می‌دهد. چنانچه شرط ۱-۲ برای یک رونده پیرو فعال شده و آن رونده پیرو از رونده رهبر پیشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

گرفته و فاصله زیادی از آن بگیرد، همان رونده پیرو باید متوقف شده و منتظر رونده رهبر بماند. چنانچه شرط ۱-۳ برای هر یک رونده‌های پیرو دیگر فعال شده و رونده پیرو دیگری بیش از حد به رونده رهبر نزدیک شده و همچنین از رونده رهبر پیشی گرفته باشد، چون رونده رهبر متوقف خواهد شد، دیگر رونده‌های پیرو نیز باید از حرکت باز ایستند. پس از گذشت زمان ۳۰ ثانیه که رونده رهبر و دیگر رونده‌ها متوقف شده شروع به حرکت می‌کنند، همچنان شرط ۱-۳ برقرار باشد، رونده پیروی که شرط ۱-۳ برای آن بر قرار است سرعت خود را یک پله کاهش داده و با سرعت ۱/۵ متربرثانیه به حرکت خود ادامه می‌دهد. چنانچه یک رونده به رونده رهبر نزدیک شده باشد و رونده رهبر پیشروی بیشتر از آن رونده پیرو داشته باشد و شرط ۱-۴ فعال شده باشد، تنها همان رونده پیرو باید از حرکت باز ایستد.

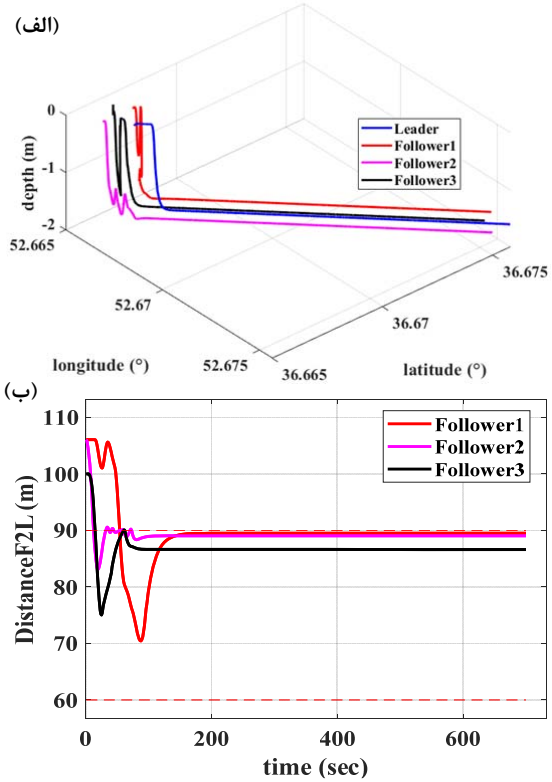
چنانچه یک رونده پیرو از گروه جدا شده و هیچ سیگنالی از رونده رهبر نداشته باشد یا در واقع از محدود مجازی که مودم آکوستیکی آن برای انتقال سیگنال نیاز دارد خارج شده باشد، از هدایت به صورت محلی و گروهی به هدایت انفرادی و تکی سوئیچ کرده و با استفاده از هدف نهایی که در ابتدای حرکت در آن تنظیم شده، در آن فعال خواهد شد، به مسیر خود با سرعت بهینه ۲ متربرثانیه ادامه خواهد داد. چنانچه مجدد در ادامه مسیر به گروه نزدیک شده و سیگنال ارسالی از مودم رونده رهبر را دریافت کند، به گروه خواهد پیوست. در حالت عادی نیز زمانی که هیچ یک از شروط و قیود برقرار نباشد و رونده‌ها در موقعیت مطلوب خود باشند، رونده‌ها پیرو با سرعتی برابر با سرعت رونده رهبر که سرعت ۲ متربرثانیه بوده به حرکت خود ادامه خواهند داد.

۴ - نتایج شبیه‌سازی حرکت هماهنگ رونده‌ها

پس از ارائه الگوریتم برای حرکت هماهنگ رونده‌ها، در این بخش هدف بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی عددی همواره ساده‌ترین و ارزان‌ترین راه خواهد بود. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته فاصله مطلوب بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر ۷۵ متر (d_{MS} =۷۵) در نظر گرفته شده است. مقدار بیشینه انحراف مجاز برای رونده پیرو ۱۵ متر (ε =۱۵) فرض شده است. همچنین کمینه فاصله مجاز بین رونده رهبر و پیرو ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. بیشینه برد انتقال اطلاعات مودم آکوستیکی ۲۵۰ متر فرض شده است. در این شبیه‌سازی‌ها تاخیری برای انتقال اطلاعات فرض نشده است. اطلاعاتی که بین رونده‌ها انتقال می‌یابد شامل موقعیت و سرعت رونده رهبر به بقیه رونده‌های پیرو است. در این شبیه‌سازی‌ها رونده رهبر در جلوی رونده‌های پیرو مسئولیت تولید مسیر و حرکت به سمت هدف از پیش تعیین شده را دارد. رونده‌های پیرو نیز در برد ۷۵ متری از آن در یک آرایش مثلثی نسبت به آن قرار می‌گیرند. رونده پیرو اول و دوم با زاویه دید ۶۰ درجه در عقب و سمت راست و چپ رونده رهبر و رونده پیرو سوم نیز با زاویه دید صفر درجه در عقب رونده رهبر در حال حرکت است. در شکل (۴) شبیه‌سازی از رونده‌ها برای حالتی که هیچ قید یا شرطی فعال نشده، ارائه شده است.

مطابق شکل (۴) رونده‌ها ابتدا از سطح شروع به حرکت کرده و طبق سناریو تعریف شده باید در عمق کروز ۲ متر و با آرایش از پیش تعیین شده که در پاراگراف قبلی توضیح داده شده حرکت کنند. مطابق شکل (۴-ب) پس از قرارگیری رونده‌های پیرو در حد مجاز ۱۵±۷۵ متر نسبت به رونده رهبر با حفظ آرایش به مسیر خود ادامه خواهند داد.

در ادامه شبیه‌سازی حرکت هماهنگ برای چهار رونده هوشمند زیرسطحی برای سناریوهای مختلف که در آن شروط و قیود مختلف ایجاد شده، ارائه می‌شوند. شبیه‌سازی‌هایی که در ادامه ارائه خواهند شد، شامل فعال شدن قیود و شروط موارد زیر خواهند بود:



شکل (۴) (الف) مسیر حرکت رونده‌ها در سه بعد، (ب) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر.

بخش ۴-۱: یک رونده پیرو در طول ماموریت دچار نقص شود، فعال شدن شروط $S1$ و $S5$.

بخش ۴-۲: رونده رهبر دچار نقص شود، فعال شدن شرط $S2$.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

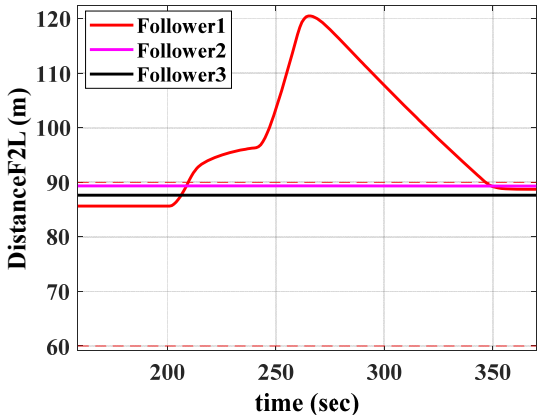
بخش ۴-۳: رونده پیرو در اجراء ماموریت از رونده رهبر پیش بیافتد، فعال شدن شرط S3.

بخش ۴-۴: جداشدن یکی از رونده‌های پیرو از مجموعه به علت نقصی که در آن برای یک بازه زمانی مشخصی رخ خواهد داد.

۴-۱- نقص رونده پیرو در طول ماموریت

به منظور بررسی این موضوع، در شبیه‌سازی شرایطی ایجاد خواهد شد که یکی از رونده‌های پیرو برای زمان مشخصی از اجرای شبیه‌سازی شرط‌های S1 و S5 برای آن برقرار شود. در واقع فرض ایجاد نقص در یکی از رونده‌های پیرو اتفاق خواهد افتاد. در این شبیه‌سازی در زمان بین ۲۰۰ تا ۲۶۰ ثانیه در رونده پیرو اول نقص ایجاد شده و متوقف می‌شود.

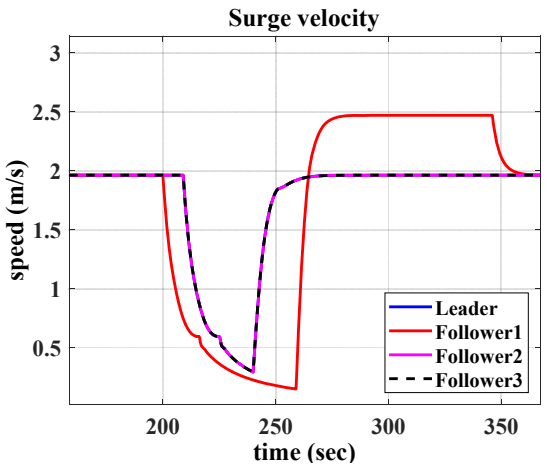
در شکل (۵) فاصله بین رونده‌های پیرو با رونده رهبر نشان داده شده است. در این شکل می‌توان به وضوح توقف رونده پیرو اول را در بازه زمانی ۲۰۰ تا ۲۶۰ ثانیه مشاهده کرد، زیرا در این بازه زمانی فاصله نسبی آن با رونده رهبر افزایش می‌یابد.



شکل (۵) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایطی که رونده پیرو (۱) دچار نقص می‌شود.

مطابق شکل (۵) رونده پیرو (۱) به دلیل نقصی که در ثانیه ۲۰۰ تا ۲۶۰ برای آن اتفاق می‌افتد، فاصله بین این رونده و رونده رهبر، از حد مجاز آن که ۱۵±۷۵ متر بوده تجاوز می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان این فاصله در ثانیه تقریبی ۲۱۵ ثانیه از حد مجاز خارج شده و درست در همین زمان شیب افزایش فاصله بین رونده پیرو (۱) و رونده رهبر کمتر خواهد شد، علت این امر این است که شرط توقف رونده رهبر و متعاقبا رونده‌های پیرو دیگر نیز فعال می‌شود. در اینجا ۳۰ ثانیه رونده رهبر و دیگر رونده‌های پیرو برای رونده پیرو (۱) متوقف شده و در ثانیه تقریبی ۲۵۰ ثانیه شروع به حرکت می‌کنند، که مجددا شیب افزایش فاصله بیشتر می‌شود. این افزایش فاصله تا ثانیه ۲۶۰ و حتی کمی بیشتر ادامه یافته و سپس پس از این زمان چون رونده پیرو (۱) مجددا شروع به حرکت کرده میزان فاصله پس از یک مدتی حتی کاهش نیز می‌یابد. علت کاهش فاصله فعال شدن شرط دیگری بوده که در ادامه بحث خواهد شد. مطابق این شبیه‌سازی صحت عملکرد الگوریتم زمانی که شروط S1 و S5 فعال می‌شود، اثبات می‌شود. در شکل (۶) میزان تغییرات سرعت رونده‌های پیرو و رهبر ارائه شده است.

مطابق شکل (۶) در ثانیه ۲۰۰ رونده پیرو (۱) دچار نقص شده و سرعتش افت پیدا می‌کند و در ثانیه ۲۶۰ مجدد شروع به حرکت می‌کند. به همین منظور در ثانیه تقریبی ۲۰۹ ثانیه رونده رهبر و دیگر رونده‌های پیرو به مدت ۳۰ ثانیه از حرکت متوقف می‌شوند. در این شبیه‌سازی چون فرضی برای تاخیر در ارسال اطلاعات بین رونده رهبر و رونده‌های پیرو در نظر نگرفته شده، بنابراین هم زمان رونده رهبر و دو رونده پیرو دیگر دستور توقف می‌دهند به همین منظور نمودار تغییر سرعت در هر سه رونده (رونده رهبر و رونده پیرو (۲) و (۳)) مشابه است.



شکل (۶) سرعت رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایطی که رونده پیرو (۱) دچار نقص می‌شود.

در ثانیه ۲۶۰ که مجددا رونده پیرو (۱) شروع به حرکت می‌کند، برای اینکه به مجموعه برسد، ابتدا طبق توضیحات مطرح شده با سرعت ۲/۵ متربرثانیه به مدت ۱۰۰ ثانیه و اگر چنانچه به موقعیت مطلوب خود نرسد، مجددا به مدت ۲۰۰ ثانیه با سرعت ۳ متربرثانیه به سمت مجموعه رونده‌ها حرکت می‌کند. چون در این شبیه‌سازی رونده پیرو (۱) پس از مدت زمان حدود ۶۰ ثانیه به موقعیت مطلوب خود در مجموعه می‌رسد سرعت خود را به سرعت حرکت بهینه یعنی ۲ متربرثانیه باز می‌گرداند. مطابق نمودار شکل (۶) نیز این موضوع کاملا مشهود است. چود در ثانیه ۳۴۵ رونده پیرو (۱) به محدوده مجاز باز می‌گردد.

۴-۲- نقص رونده رهبر در طول ماموریت

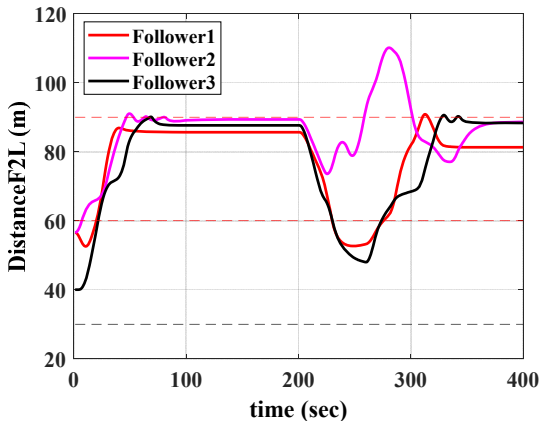
در این حالت شرط S2 فعال خواهد شد. در صورتی که این شرط فعال شود، تمامی رونده‌های پیرو نیز باید با این شرط متوقف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

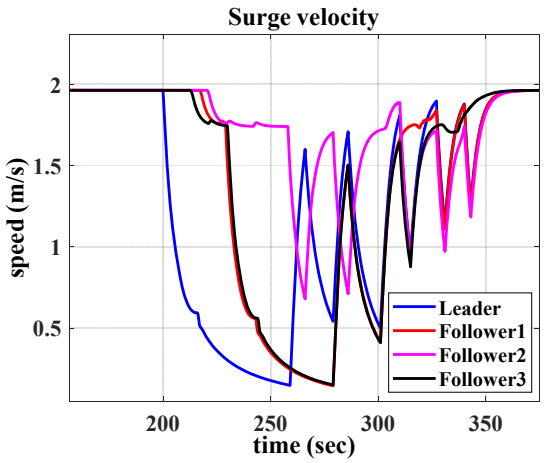
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

شوند، یعنی همزمان با فعال شدن شرط $S2$، شرط $S5$ نیز فعال خواهد شد. به منظور این شبیه‌سازی در بازه زمانی ۲۰۰ ثانیه تا ۲۶۰ ثانیه رونده رهبر متوقف شده و به این صورت عملکرد درست الگوریتم پیشنهادی را بررسی خواهیم کرد. در شکل (۷) فاصله بین رونده‌های پیرو با رونده رهبر نشان داده شده است.

مطابق شکل (۷) پس از آنکه در ثانیه ۲۰۰ رونده رهبر به علت نقصی که در آن رخ داده و متوقف می‌شود، فاصله بین رونده‌های پیرو با رونده رهبر کاهش می‌یابد. این کاهش فاصله نسبی برای رونده‌های پیرو (۱) و (۳) تا حدی پیش رفته که این دو رونده از فاصله حدی گذشته و این موجب فعال شدن شرط توقف برای این دو رونده خواهد شد. بنابراین رونده پیرو (۱) و (۳) تقریبا همزمان در ثانیه ۲۲۹ متوقف خواهند شد. رونده پیرو (۳) نیز در ثانیه ۲۵۸ به دلیل افزایش بیش از حد فاصله رونده پیرو (۳) و رونده رهبر متوقف خواهد شد. این توقف رونده‌های پیرو تا زمان حرکت مجدد رونده رهبر ادامه می‌یابد. در شکل (۸) تغییرات سرعت رونده‌های پیرو و رهبر ارائه شده است.

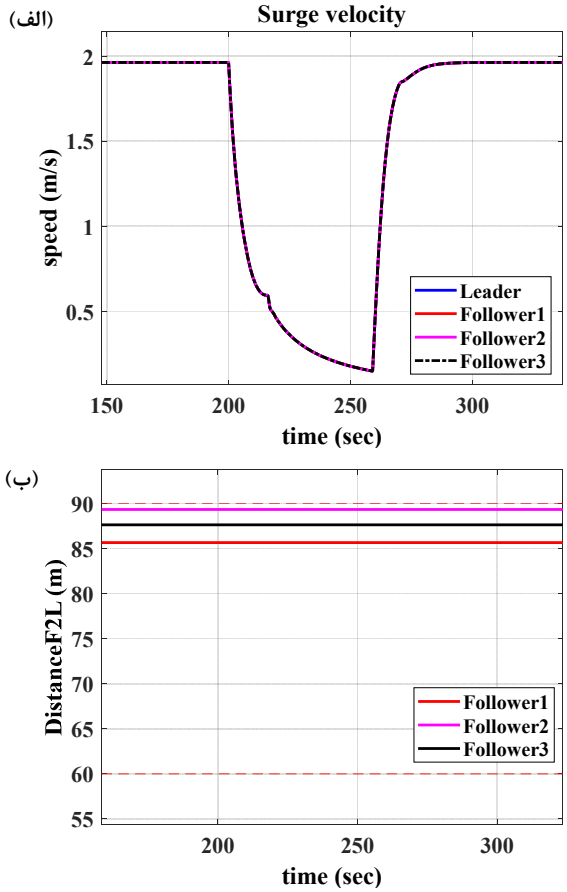


شکل (۷) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایطی که رونده رهبر دچار نقص می‌شود.



شکل (۸) سرعت رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایطی که رونده رهبر دچار نقص می‌شود.

چون آرایش مجموعه پس از متوقف شدن رونده رهبر اندکی به هم می‌ریزد، پس از آنکه رونده رهبر مجددا شروع به حرکت می‌کند، برای اینکه آرایش رونده‌ها منظم شود، مدت زمانی طول می‌کشد. در این بازه زمانی ممکن است شروط و قیود دیگری فعال شوند که این منجر به تغییرات چند باره در سرعت رونده‌های مختلف می‌شود. البته چنانچه اگر امکان ارسال سیگنال سرعت نیز بین رونده رهبر با بقیه رونده‌ها باشد، می‌توان در زمانی‌هایی که آرایش رونده‌ها منظم بوده و هر رونده در مسیر هدایتی درست خود قرار داشته و در واقع هیچ یک از شروط و قیود مطرح شده فعال نباشد، با هرگونه تغییر سرعت در رونده رهبر، سرعت رونده‌های پیرو نیز متناسب با آن تغییر کند که این منجر به حفظ آرایش بین رونده‌ها شده و دیگر پس از برگشت رونده رهبر به حالت عادی شاهد تغییرات سرعت این چنینی نخواهیم بود. در شکل (۹) نمودار مربوط به فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو با رونده رهبر و سرعت هر کدام از رونده‌ها نشان داده شده است. این شبیه‌سازی با فرض ارسال سیگنال سرعت رونده رهبر به رونده‌های دیگر و فرض تطبیق سرعت رونده‌های پیرو با سرعت رونده رهبر انجام شده است.



شکل (۹) (الف) سرعت رونده‌های پیرو و رونده رهبر و (ب) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایطی که رونده رهبر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

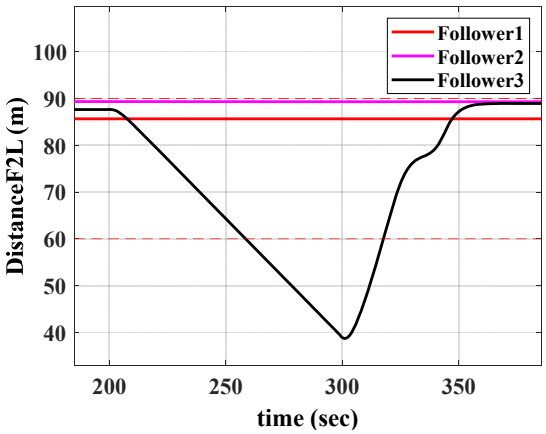
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

دچار نقص شده و رونده رهبر سیگنال سرعت به دیگر رونده‌ها ارسال می‌کند.

مطابق شکل (۹)، درست زمانی که رونده رهبر متوقف می‌شود، چون آرایش رونده‌ها در حالت مطلوب قرار داشته سریعا رونده‌های دیگر با دریافت سیگنال متوقف می‌شوند. چون در این شبیه‌سازی مدت زمان تاخیر در ارسال و دریافت داده توسط مودم‌های آکوستیکی و مخابراتی در نظر گرفته نشده به محض توقف رونده رهبر فرمان توقف به دیگر رونده‌ها رفته و نمودار سرعت آنها مشابه هم شده است. با توجه به نمودار فاصله نسبی بین رونده‌ها تغییر نکرده یا در واقع رونده‌ها تغییر آرایش نخواهند داشت.

۴-۳- پیشی گرفتن رونده پیرو در اجراء ماموریت از رونده رهبر

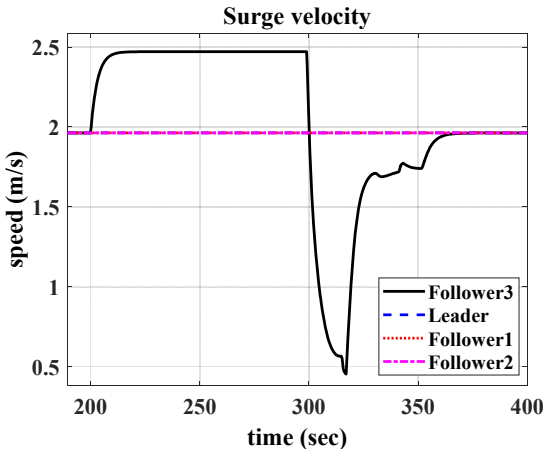
در این حالت شرط $S3$ فعال خواهد شد. این شرط ممکن است در حالتی که ارتباط یک رونده با مجموعه قطع شده و رونده به طور مستقل به حرکت خود به سمت هدف پیش فرض ادامه می‌دهد اتفاق افتد. البته حالات دیگری برای رخ داد این شرط نقص نیز می‌توان متصور بود. در این شبیه‌سازی فرض بر این است که از ثانیه ۲۰۰ تا ۳۰۰ رونده پیرو (۳) از مجموعه جدا شده و به حرکت خود به صورت مستقل ادامه خواهد داد. در ثانیه ۳۰۰ دوباره سیگنال ارسالی از رونده رهبر را دریافت کرده اما به دلیل اینکه فاصله آن از رونده رهبر از حد مرزی کمتر بوده و همچنین پیشروی بیشتر نسبت به آن داشته شرط $S3$ در آن فعال شده و متوقف خواهد شد تا اینکه فاصله نسبی آن با رونده رهبر به محدوده مجاز رسیده و مجددا شروع به حرکت کند. در شکل (۱۰) منحنی مربوط به فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو با رونده رهبر ارائه شده است.



شکل (۱۰) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایط پیشی گرفتن رونده پیرو در اجراء ماموریت از رونده رهبر.

مطابق شکل (۱۰) در ثانیه ۲۰۰ ارتباط بین رونده پیرو (۳) با رونده رهبر قطع شده به همین منظور طبق الگوریتم رونده پیرو مسیر هدایتی به سمت هدف از پیش تعیین شده خود حرکت می‌کند. ابتدا به مدت ۱۰۰ ثانیه تغییر سرعت به ۲/۵ متر بر ثانیه و چنانچه به گروه متصل نشد، سپس به مدت ۲۰۰ ثانیه با سرعت ۳ متربرثانیه به سمت هدف حرکت می‌کند. اما در ثانیه ۳۰۰ با اتصال مجدد ارتباطی با رونده رهبر، رونده پیرو متوجه شده که از رونده رهبر پیشروی بیشتر داشته و فاصله آن از حد مجاز کمتر است. در این لحظه فرمان توقف رونده پیرو (۳) صادر شده و این رونده تا به محدوده فاصله‌ای مجاز نرسیده متوقف خواهد ماند. در شکل (۱۱) تغییرات سرعت رونده‌های مختلف ارائه شده است.

در شکل (۱۱) سرعت رونده‌های پیرو (۱) و (۲) و رونده رهبر چون مشابه هم بوده نمودارشان روی هم قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ثانیه ۳۰۰ زمانی که مجددا ارتباط برقرار می‌شود، سرعت رونده پیرو شماره (۳) کاهش یافته و رونده متوقف می‌شود.



شکل (۱۱) سرعت رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایط پیشی گرفتن رونده پیرو در اجراء ماموریت از رونده رهبر.

۴-۴- جدایی یکی از رونده‌های پیرو از مجموعه

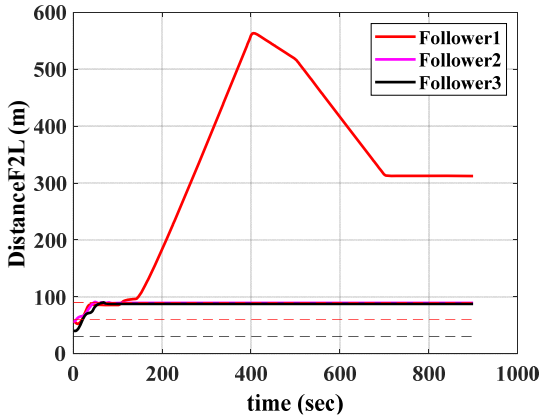
در حالتی که به هر دلیلی یکی از رونده‌های پیرو دچار نقص شود و از مجموعه جدا شود رونده رهبر برای مدت مشخص دستور توقف مجموعه را خواهد داد. شروط $S2$ و $S5$ در این حالت فعال خواهند شد. اما پس از مدت مشخص مجموعه رونده‌ها شروع به حرکت خواهند کرد. در این شبیه‌سازی رونده پیرو (۱) دچار نقص شده و از مجموعه جدا خواهد شد. اما پس از مدتی که نقص آن به طور تصادفی بر طرف شده و مجدد رونده شروع به حرکت می‌کند، به مدت ۱۰۰ ثانیه با سرعت حدود ۲/۵ متر بر ثانیه و سپس به مدت ۲۰۰ ثانیه با حداکثر سرعت ۳ متر بر ثانیه به سمت هدف نهایی از پیش تعیین شده حرکت می‌کند چنانچه در این بازه زمانی به محدوده ارتباطی مجموعه یا همان برد مودم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

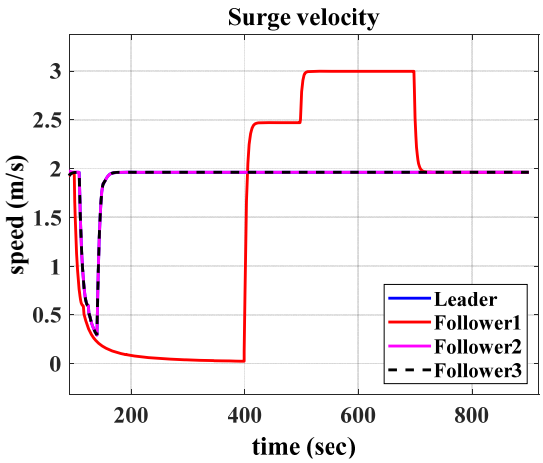
آکوستیکی که در این شبیه‌سازی ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده برسد به مجموعه ملحق شده و در موقعیت درست خود قرار خواهد گرفت، در غیر این صورت یک هدایت مستقل و حرکت به سمت هدف خواهد داشت.

در شبیه‌سازی زیر از ثانیه ۱۰۰ تا ۴۰۰ رونده پیرو (۱) دچار نقص شده و متوقف خواهد شد. پس از ثانیه ۴۰۰ مجدد شروع به حرکت خواهد کرد. در شکل (۱۲) منحنی فاصله نسبی بین رونده‌ها ارائه شده است.

مطابق شکل (۱۲) از ثانیه ۱۰۰ به بعد رونده پیرو (۱) تقریبا به دلیل نقص رخ داده در آن از مجموعه جدا خواهد شد. پس از فاصله گرفتن رونده پیرو (۱) از مجموعه و عبور این فاصله از حد مجاز تعریف شده، رونده رهبر و رونده‌های دیگر به مدت ۳۰ ثانیه متوقف خواهند شد. پس از آن به ماموریت خود ادامه خواهند داد. طبق سناریو تا ثانیه ۴۰۰ رونده پیرو (۱) متوقف است به همین منظور فاصله نسبی بین رونده‌ها افزایش می‌یابد. پس از ثانیه ۴۰۰ رونده پیرو (۱) شروع به حرکت کرده و چون از مجموعه جدا شده، به مدت ۱۰۰ ثانیه با سرعت ۲/۵ متربرثانیه و سپس به مدت ۲۰۰ ثانیه با سرعت ۳ متربرثانیه به حرکت خود ادامه می‌دهد و چون سرعتش نسبت به سرعت مجموعه در این بازه ۳۰۰ ثانیه بیشتر است، اندکی از فاصله نسبی آن کاهش یافته اما پس از این بازه زمانی چون به مجموعه نرسیده با هدایت مستقل از مجموعه با سرعت بهینه ۲ متربرثانیه به مسیر خود ادامه خواهد داد. در شکل (۱۳) تغییرات سرعت رونده‌ها ارائه شده است.



شکل (۱۲) فاصله نسبی بین رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایط جدایی یکی از رونده‌های پیرو از مجموعه.



شکل (۱۳) سرعت رونده‌های پیرو و رونده رهبر در شرایط جدایی یکی از رونده‌های پیرو از مجموعه.

مطابق شکل (۱۳) پس از آنکه رونده پیرو (۱) در ثانیه ۱۰۰ متوقف می‌شود، چند ثانیه بعد فرمان توقف رونده رهبر و باقی رونده‌های دیگر صادر خواهد شد. چون کاهش سرعت رونده رهبر و دو رونده پیرو دیگر هم زمان صادر شده منحنی سرعت آنها روی هم قرار گرفته‌اند. در ثانیه ۴۰۰ که رونده پیرو (۱) مجدد شروع به حرکت می‌کند، رونده پیرو (۱) تا ثانیه ۵۰۰ با سرعت ۲/۵ متربرثانیه و سپس تا ثانیه ۷۰۰ با سرعت حداکثری ۳ متربرثانیه حرکت خواهد کرد اما چون به محدود تشخیص مودم که ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده نرسیده به طور مستقل به مسیر خود با سرعت بهینه ۲ متربرثانیه ادامه می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش کنترل گروهی مقاوم بر مبنای روش رهبر-پیرو به منظور کنترل گروهی مجموعه رونده‌های زیرسطحی خودگردان ارائه شده است. همچنین در این روش رهبر-پیرو از کنترل گروهی مبتنی بر رفتار نیز بهره گرفته شده تا از اختلالات محتمل در حین اجراء ماموریت جلوگیری شود. روش رهبر-پیرو مقاوم پیشنهادی در سه بعد و در دستگاه مختصات جغرافیایی و طبق مدل WGS-84 پیاده‌سازی شده است. عملکرد این روش در شرایط نواقص و اختلالات مختلف بررسی شده و نتایج مطلوبی از مقاومت و کارایی الگوریتم در تولید مسیر، حفظ آرایش و دنبال‌یابی مسیر حاصل شده است. روش پیشنهادی به دلیل سادگی در پیاده‌سازی، مقاومت بالا در مقابل اختلالات و اغتشاشات محیطی و نیاز به حداقل انتقال اطلاعات بین رونده‌های رهبر و پیرو قابل پیاده‌سازی در نمونه‌های واقعی و عملی با حداقل هزینه و با قابلیت اطمینان بالا است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

۵- مراجع

1- R. Mitchell and I.-R. Chen, “Adaptive intrusion detection of malicious unmanned air vehicles using behavior rule specifications,” (2014), IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst., vol. 44, no. 5, pp. 593–604. [DOI: 10.1109/TSMC.2013.2265083.]

2- Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, “Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges,” (2016), Annu Rev. Control, vol. 41, pp. 71–93. [https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.]

3- J. Wang, C. Wang, Y. Wei, and C. Zhang, “Command filter based adaptive neural trajectory tracking control of an underactuated underwater vehicle in three-dimensional space,” (2019), Ocean Eng., vol. 180, pp. 175–186. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.061.]

4- F. Pourpanah, R. Wang, C. P. Lim, X. Z. Wang and D. Yazdani, “A review of artificial fish swarm algorithms: recent advances and applications”, (2023), Artificial Intelligence Review, Vol 56, pp 1867-1903. [https://doi.org/10.1007/s10462-022-10214-4.]

5- J. Wang, C. Wang, Y. Wei, and C. Zhang, “Observer-Based Neural Formation Control of Leader–Follower AUVs with Input Saturation,” (2020), IEEE SYSTEMS JOURNAL, vol. 15, Issue. 2, pp. 2553–2561. [DOI: 10.1109/JSYST.2020.2993568.]

6- T. Balch and R. C. Arkin, “Behavior-based formation control for multirobot teams,” (1998), IEEE Trans. Robot. Autom, vol. 14, no. 6, pp. 926–939. [DOI: 10.1109/70.736776.]

7- X. Kang, H. Xu, and X. Feng, “Fuzzy logic based behavior fusion for multi-AUV formation keeping in uncertain ocean environment,” (2009), in Proc. OCEANS, pp. 824–830. [DOI: 10.23919/OCEANS.2009.5422361.]

8- K. D. Do and J. Pan, “Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices,” (2005), Automatica, vol. 41 no. 1, pp.87–95. [https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.08.005.]

9- L. Juan, Y. Ruikun, W. Huixin, and D. Xue, “Multi-AUV fixed-point and positioning control based on virtual leader,” (2019), in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. (ICMA), pp. 560–565. [DOI: 10.1109/ICMA.2019.8816488.]

10- X. Li and D. Zhu, “An adaptive SOM neural network method for distributed formation control of a group of AUVs,” (2018), IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 10, pp. 8260–8270. [DOI: 10.1109/TIE.2018.2807368.]

11- Z. Yan, Z. Yang, L. Yue, L. Wang, H. Jia, and J. Zhou, “Discretetime coordinated control of leader-following multiple AUVs under switching topologies and communication delays,” (2019), Ocean Eng., vol. 172, pp. 361–372.[https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.018.]

12- J. Wang , C. Wang, Y. Wei and C. Zhang, “Neuroadaptive Sliding Mode Formation Control of Autonomous Underwater Vehicles With Uncertain Dynamics”, (2019), IEEE SYSTEMS JOURNAL, vol. 14, Issue. 3, pp. 3325–3333.[DOI: 10.1109/JSYST.2019.2938315.]

13- K. Shojaei, “Leader-follower formation control of underactuated autonomous marine surface vehicles with limited torque,” (2015), Ocean Eng., vol. 105, pp.196–205. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.026.]

14- B. Das, S. Bidyadhar, and P. B. Bibhuti, “Cooperative control of a team of autonomous underwater vehicles in an obstacle-rich environment,” (2016), Journal of Marine Engineering & Technology, vol. 15, no. 3, pp. 135-151. [https://doi.org/10.1080/20464177.2016.1247636.]

15- S. Pang, W. Jian, L. Jingyang, and Y. Hong, “Three-dimensional leader–follower formation control of multiple autonomous underwater vehicles based on line-of-sight measurements using the back-stepping method,” (2018), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 232, no. 7, pp. 819-829. [https://doi.org/10.1177/0959651818760936.]

16- Z. Gao, and G. Ge, “Adaptive formation control of autonomous underwater vehicles with model uncertainties,” (2018), International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 32, no. 7, pp. 1067-1080. [https://doi.org/10.1002/acs.2886.]

17- Z. Yan, D. Xu, T. Chen, W. Zhang, and Y. Liu, “Leader–follower formation control of uuvs with model uncertainties, current disturbances, and unstable communication,” (2018), Sensors, vol. 18, no. 2, pp. 662. [https://doi.org/10.3390/s18020662.]

18- J. Bian, and X. Ji, “Three-dimensional coordination control for multiple autonomous underwater vehicles,” (2019), IEEE Access, vol. 7, pp. 63913-63920. [DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915933.]

19- J. Li, D. Jialu, and C. Wen-Jer, “Robust time-varying formation control for underactuated autonomous underwater vehicles with disturbances under input saturation,” (2019), Ocean Engineering, vol. 179, pp. 180-188. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.017.]

20- Z. Yan, Z. Yang, L. Xue, L. Wang, H. Jia, and J. Zhou, “Discrete-time coordinated control of leader-following multiple AUVs under switching topologies and communication delays,” (2019), Ocean Eng., vol. 172, pp. 361–372.[https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.018.]

21- J. Q.Wang, C.Wang,Y. J.Wei, and C. J. Zhang, “Sliding mode based neural adaptive formation control of underactuated AUVs with leader-follower strategy,” (2018), IEEE Access, vol. 6, pp. 74355–74365. [https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101971.]

22- J. Wang, C. Wang, Y. Wei, and C. Zhang, “Sliding mode based neural adaptive formation control of underactuated AUVs with leader-follower strategy,” (2020), Appl. Ocean. Res., vol. 94, Art. no. 101971. [doi:10.1016/j.apor.2019.101971.]

23- C. Wang, W. Cai, J. Lu, X. Ding, and J. Yang, “Design, Modeling, Control, and Experiments for Multiple AUVs Formation,” (2021), IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 19, Issue. 4, pp. 2776-2787. [DOI: 10.1109/TASE.2021.3094539.]

24- H. L. Wei, C. Shen, and Y. Shi, “Distributed Lyapunov-based model predictive formation tracking control for autonomous underwater vehicles subject to disturbances,” (2021), IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst., vol. 51, Issue. 8, pp. 5198-5208. [DOI: 10.1109/TSMC.2019.2946127.]

25- Z. Zeng, H. Yu, C. Guo, and Z. Yan, “Finite-time coordinated formation control of discrete-time multi-AUV with input saturation under alterable weighted topology and time-varying delay,” (2022), Ocean Engineering, vol.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]

266, no. 3. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112881.]
26- Q. Zhen, L. Wan, Y. Li, and D. Jiang, "Formation control of a multi-AUVs system based on virtual structure and artificial potential on SE(3)," (2022), Ocean Engineering, vol. 253. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111148.]
27- J. Li, J. Du, Y. Li, and G. Xu, "Distributed Robust Prescribed Performance 3-D Time-Varying Formation Control of Underactuated AUVs Under Input Saturations and Communication Delays," (2023), IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 48, no. 3. [DOI: 10.1109/JOE.2023.3245671.]
28- N. A. Thuyen, P. N. N. Thanh, and H. P. H. Anh, "Adaptive finite-time leader-follower formation control for multiple AUVs regarding uncertain dynamics and disturbances," (2023), Ocean Engineering, vol. 269. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113503.]
29- X. Li, H. Qin, and L. Li, "Fixed-time formation control for AUVs with unknown actuator faults based on lumped disturbance observer," (2023), Ocean Engineering, vol. 269. [https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113495.]
30- Sayyaadi, H., Ghasemi, I., "Design of Coordinated Path Following Controller for Multiple Autonomous Underwater Vehicle Considering Obstacles and Collision Avoidance" (2016), Jurnal of Marin Engineering, Vol.24, p.23-39. (In Persian)
31- Haghparast, M., Taheri, E., "Formation Control for a Group of Autonomous Underwater Vehicles Subject to Switching Topologies and Time Delay Factor," (2021), Jurnal of Marin Engineering, Vol.34, p.111-121. (In Persian)
32- T. I. Fossen, "Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control" (2021), John Wiley & Sons, 2nd Edition. [DOI:10.1002/9781119994138.]
33- M. T. Sabet, H. M. Daniali, A. Fathi, and E. Alizadeh, "Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Hydrodynamic Model Using the Extended, Cubature, and Transformed Unscented Kalman Filter," (2017), IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, vol. 43, Issue. 2, pp. 457-467. [DOI: 10.1109/JOE.2017.2694470.]
34- H. Yu, L. Ning, "coordinated obstacle avoidance of multi-AUV based on improved artificial potential field method and consistency protocol," (2023), Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11, Issue. 6. [https://doi.org/10.3390/jmse11061157.]
35- Z. Pan, C. Zhang, Y. Xia, H. Xiong, and X. Shao, "An Improved Artificial Potential Field Method for Path Planning and Formation Control of the Multi-UAV Systems," (2021), IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, vol. 69, Issue. 3, pp. 1129-1133. [DOI: 10.1109/TCSII.2021.3112787.]
36- M. T. Sabet, H. Mohammadi Daniali, A. Fathi, and E. Alizadeh, "A Low-Cost Dead Reckoning Navigation System for an AUV Using a Robust AHRS: Design and Experimental Analysis," (2018), IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, vol. 43, Issue. 4, pp. 927-939. [DOI: 10.1109/JOE.2017.2769838.]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-26]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.64]