کنترل آرایش حرکت گروهی از ربات بدون سرنشین خودمختار زیرسطحی در یک ساختار سوئیچ شونده همراه با تأخیر

مرتضی حق‌پرست[۱] ، احسان طاهری[۲*]

[۱] دکتری برق قدرت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، m_haghparast@hotmail.com
[۲] دکتری برق کنترل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، taheri.ehsan@mut-es.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴

کلمات کلیدی:
ربات بدون سرنشین خودمختار زیرسطحی
کنترل آرایش
اجماع
سیستم چند عاملی
ساختار سوئیچ شونده

چکیده

وجود ساختار ارتباطی سوئیچ‌شونده دریک سیستم چندعاملی باعث می‌شود که ماتریس‌های مجاورت، درجه و لاپلاسین گروه و در نهایت مقدار ویژه فیدلر آن بطور مدام تغییر نموده و متعاقبا اجماع گروه را تحت تاثیر قرار دهند. در این تحقیق هدف طراحی پروتوکل اجماع مناسب جهت تحقق همگرایی گروهی و ایجاد یک آرایش حرکتی شش ضلعی در یک گروه از شناورهای بدون سرنشین زیرسطحی با در نظر گرفتن سوئیچینگ بین عامل‌ها می‌باشد. برای این منظور ابتدا مدل‌ریاضی شش درجه آزادی غیر خطی هر ربات ارائه و سپس به کمک نظریه گراف‌ها ارتباط بین عامل‌های گروه مدلسازی می‌شود. سپس الگوریتم کنترل اجماع رهبر-پیرو جهت شکل دهی یک آرایش شش ضلعی فی مابین ربات راهبر و ربات‌های پیرو طراحی می‌گردد. الگوریتم کنترل اجماع پیشنهادی طی چند دو سناریو متفاوت: ۱- سوئیچینگ بین توپولوژی ارتباطی ربات‌های پیرو، ۲- سوئیچینگ بین توپولوژی ارتباطی ربات‌های پیرو همراه با عامل تاخیر، مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است.

Formation Control for a Group of Autonomous Underwater Vehicles Subject to Switching Topologies and Time Delay Factor

Mortaza Haghparast[1], Ehsan Taheri[2*]

[1] PhD of Power Engineering, Malek Ashtar University of Technology; m_haghparast@hotmail.com
[2] PhD of Control Engineering, Malek Ashtar University of Technology; taheri.ehsan@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 06 Oct. 2021
Accepted: 25 Nov. 2021

Keywords:
Autonomous Underwater Vehicle
Formation Control
Consensus
Multi-Agent System
Switching Topologies

ABSTRACT

The presence of switchable communication topologies in a multi-agent system causes the adjacency, degree, and Laplacian matrices of the group, and finally, its Fiedler eigenvalue, to constantly change, thereby affecting the group consensus. The key motivation of this study is to design an appropriate control law to achieve group consensus and create a hexagonal motion formation in a group of autonomous underwater vehicles by considering switching communication topologies between agents. For this purpose, first, the six degrees of freedom mathematical model of each AUV is presented and then the relationship between the agents of the group is modelled through the graph theory. The leader-follower consensus control algorithm is then designed to form a hexagonal arrangement between the leader and the follower robots. The proposed consensus control algorithm has been assessed in two different scenarios: 1- Switching communication topology between the follower robots, 2- Switching communication topology between the follower robots with time delay factor.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

۱ - مقدمه

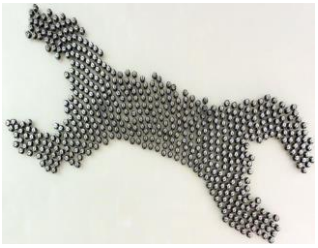
درسالیان اخیر با حصول پیشرفت‌های چشم‌گیر محقق شده در حوزه گلوگاهی خوداتکایی، طیف جدیدی از انتظارات از ربات‌های بدون سرنشین خودمختار مطرح شده است. جهت پاسخگویی به این انتظارات: ۱-افزایش سرعت پاسخگویی به نیاز کاربر، ۲-کاهش ریسک‌های نیروی انسانی، ۳-کاهش قیمت تمام شده هر عامل، ۴-افزایش منطقه عملیاتی تحت پوشش، ۵-افزایش احتمال موفقیت ماموریت با وجود از کار افتادن یک عامل و ... سیستم‌های چندعاملی مورد توجه محققان حوزه‌های مختلف قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر امکان پاسخگویی به انتظارات جدید مطرح شده و سناریوهای نوین تدوین شده به کمک یک عامل تنها در زمان مشخص و با کیفیت مدنظردشوار بوده و لذا سیستم‌های چندعاملی مطرح می‌گردند. از نمونه‌های بارز سیستم‌های چندعاملی در طبیعت می‌توان به حرکت گروهی، پرندگان، آبزیان، چهارپایان، تک سلولی‌ها ... اشاره داشت. در این سیستم‌ها هر عامل ساختاری ساده و در عین حال ویژگی خاص خود رادارد، ولیکن جایگاه آن در گروه بسیار منسجم و هماهنگ با سایر اعضای گروه می‌باشد. بلطبع دستاوردهای گروه همچون امنیت، منابع غذایی، جهت‌یابی و ... برای تک‌تک اعضای گروه بسیار بیشتر از حالتی است که تک‌تک عامل‌ها بصورت مستقل رفتار می‌کنند. از جمله نمونه‌های سیستم‌های چند عاملی در جوامع بشری می‌توان به حرکت گروهی ماهواره‌ها بمنظور ایجاد میدان دید وسیع‌تر، سیتم‌های کنترل بزرگ‌راه‌ها و آزاد راه‌ها جهت استفاده حداکثری از ظرفیت موجود، طراحی دارو جهت مقابله با سلول‌های سرطانی، عملیات‌های جستجو و نجات توسط مجموعه‌ای از ربات‌ها، عملیات‌های نظارتی توسط گروهی از عامل‌ها، حمل پیلود و ... اشاره داشت، شکل ۱.

یک مسئله بسیارمهم در سیستم های چند عاملی، توانایی به اجماع رسیدن عامل‌ها بر روی یک پارامتر خاص می‌باشد. کنترل شکل‌دهی یا آرایش حرکت گروهی، زمانی در یک سیستم چندعاملی میسر می‌گردد که عامل‌های تشکیل دهنده گروه بتواند بر روی یک پارامتر خاص به اجماع برسند. این پارامتر خاص می‌تواند سرعت حرکت عامل‌ها در یک راستای خاص، زاویه یاو و پیچ حرکتی، ارتفاع حرکتی عامل‌ها، ... باشد. طراحی پروتوکل اجماع جهت همگرایی یک سیستم چند عاملی بر روی یک پارامتر خاص و شکل‌دهی آرایش حرکت در گروه، بدیل وجود ساختار ارتباطی سوئیچ شونده بین راهبر گروه و سایر عامل‌ها، دینامیک غیرخطی عامل‌ها، اغتشاشات محیطی و نویزهای اندازه‌گیری، پهنای باند محدود، زیرعملگر بودن عامل‌ها، کوپلینگ غیرخطی بین درجات آزادی ربات و ... یکی از حوزه‌های باز تحقیقاتی قلمداد می‌شود. این امر زمانی خاص‌تر و حادتر می‌گردد که سیال در بر گیرنده محیط عملیاتی، رفتار متغییر با زمان و غیرقابل پیشبینی از خود نشان دهد و نقشه از پیش تعیین شده‌ای برای محیط کاری در دست نباشد. علاوه بر موارد ذکر شده، زمان مدنظر جهت رسیدن به اجماع، رسیدن به یک آرایش مشخص و حفظ آن آرایش مشخص در طول انجام ماموریت و رهگیری یک مسیر مشخص، تغییر آرایش جهت عدم برخورد با موانع و بازیابی آرایش پس از عبور از موانع، لحاظ نمودن عامل تاخیر در اجماع پارامترها، اجماع پارامترها با وجود از دست دادن راهبر گروه، اجماع با در نظر گرفتن قطع و وصل شدن ارتباط بین عامل‌ها و تغییر توپولوژی ارتباطی، قابلیت اطمینان الگوریتم کنترل اجماع و تحمل‌پذیری خطا در آن به هنگام وقوع عیب در یک یا چند عامل گروه و ... از دیگر مسائل جذاب در این حوزه می‌باشد.

در مرجع [۱] مسائل اجماع خطی و غیرخطی برای شبکه‌ای از عوامل دینامیکی، با توپولوژی ثابت و سوئیچینگ بررسی شده است. مرجع [۲] یک مسئله‌ی اجماع رهبر- پیرو را در سامانه‌های چندعاملی مرتبه دوم با توپولوژی ثلبت و سوئیچینگ و همچنین تأخیرهای متغیر بازمان غیریکنواخت مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۳] از روش‌هایی در حوزه زمان (قضیه لیاپانوف) و حوزه فرکانس (معیار پایداری نایکوییست) استفاده کرده است تا به مطالعه الگوریتم‌های اجماع بدون راهبر و راهبر- پیرو، با تأخیرهای ارتباطی و ورودی، تحت توپولوژی شبکه جهت‌دار مرتبه اول و مرتبه دوم بپردازد. در مرجع [۴] یک پروتکل اجماع جدید، بدون استفاده از اطلاعات سرعت عوامل همسایه ارائه شده است. توپولوژی سوئیچ‌شونده تصادفی و تأخیر ارتباط تصادفی که در سیگنال سوئیچینگ و همچنین تبادل اطلاعات موقعیت وجود دارد، توسط دو زنجیره مارکوف با استقلال متقابل، تحت کنترل قرار گرفته است. مرجع [۵] مسئله پایداری اجماع رهبر- پیرو و همچنین پایداری سامانه‌های چندعاملی با تأخیرهای متغیر با فاصله زمانی را مد نظر قرار داده است. در مرجع [۶] مسئله اجماع تصادفی برای سامانه‌های چندعاملی خطی و نامتغیر با زمان، بر روی شبکه‌های سوئیچ‌شونده مارکوفین با تأخیرهای متغیر بازمان و عدم قطعیت توپولوژی، بررسی شده است. مرجع [۷] روش میانگین‌یابی قطعی را به حالت تصادفی که شامل نویز سفید ارتباطی و توپولوژی شبکه سوئیچ‌شونده مارکوفین است، تعمیم داده است. در این مرجع شرط اجماع برای یک سامانه شبکه مبتنی بر نابرابری‌های ماتریس خطی که تحت تأثر تأخیرهای متغیر بازمان و توپولوژی سوئیچ‌شده قرار دارد، بررسی شده است. مرجع [۸] نیز روش جدیدی را برای تحلیل اجماع سامانه‌های چندعاملی با ورودی‌های کنترلی که تحت تأثیر تأخیرهای متغیر بازمان و توپولوژی متغیر قرار دارند، ارائه می‌دهد. مرجع [۹] نتایج کلی و کاربردی پایداری یکنواخت، پایداری مجانبی یکنواخت و پایداری نمایی سامانه‌ها را با استفاده از تئوری کنترل تکانه‌ای و برخی استدلال‌های مقایسه‌ای تعیین می‌نماید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]



۱-۱-حرکت گروهی ربات‌ها



۱-۲-حرکت گروهی جنگده ها



۱-۳-حرکت گروهی پرنده‌ها



۱-۴-حرکت گروهی خرچنگ‌ها

مرجع [۱۰] توپولوژی ارتباطات را به دو قسمت مختلف سوئیچ‌شونده تقسیم می‌کند. سپس یک الگوریتم اجماع برای حل مسئله کنترل مختصات AUVهای چندگانه بدون راهبر با دو توپولوژی ارتباطی سوئیچینگ مستقل مارکوفین و تأخیرهای متغیر بازمان در سنسورهای زیر آب ارائه می‌نماید. در مرجع [۱۱] سامانه تحت تأثیر پردازش داده و تأخیرهای زمانی ارتباطی ناهمگام قرار می‌گیرد. پس‌ازآن، اجماع سامانه اشباع‌شده مرتبه دوم با دینامیک غیرسوئیچ‌شونده که می‌توان آن را با یک نمودار جهت‌دار نشان داد، ارائه می‌گردد. مرجع [۱۲] به مطالعه قوانین سوئیچینگی می‌پردازد که برای حفظ پایداری سامانه‌های غیرخطی سوئیچ‌شونده، در دو حالت پایدار و ناپایدار طراحی شده است. تأخیرهای زمانی در نظر گرفته‌شده، شامل تأخیرهای محدود و نامحدود است.

در این تحقیق هدف طراحی للگوریتم کنترل اجماع، برای گروهی متشکل از هفت ربات‌های بدون سرنشین خودمختار زیرسطحی جهت ایجاد آرایش شش ضلعی با وجود ساختار ارتباطی سوئیچ‌شونده و عامل تاخیر می‌باشد. در این گروه یک AUV راهبر بوده و به مسیر مرجع دسترسی دارد و شش AUV پیرو بوده و وظیفه تشکیل آرایش شش ضلعی و حفظ آن در حین رهگیری مسیر مرجع را برعهده دارند. مسیر مرجع یک مارپیچ سه بعدی می‌باشد. بین AUV راهبر و هر یک از AUV های پیرو یک گراف جهت دار همبند وجود خواهد داشت. برای این منظور دو سناریوی تست تعریف گردید:

۱-شکل دهی آرایش حرکتی شش ضلعی با وجود ساختار ارتباطی سوئیچ شونده فی‌مابین AUV های پیرو و با فرض وجود یک گراف همبند و بدون حضور تاخیر.

۲- شکل دهی آرایش حرکتی شش ضلعی با وجود ساختار ارتباطی سوئیچ شونده فی‌مابین AUV های پیرو و با فرض وجود یک گراف همبند بین AUV راهبر و هریک از AUVهای پیرو و همچنین با لحاظ نمودن عامل تاخیر. بطور خلاصه مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش عبارتند از:

۱- طراحی پروتکل اجماع برای یک سیستم چندعاملی متشکل از یک AUV راهبر و شش AUV پیرو، بمنظور شکل‌دهی آرایش حرکتی شش ضلعی و حفظ آرایش در زمان رهگیری مسیر مرجع مارپیچ سه بعدی.

۲-تضمین آرایش حرکتی شش ضلعی سه بعدی و حفظ آن، با وجود سوئیچینگ ارتباطی فی ما بین AUV های پیرو (در نظر گرفتن قطع و وصل شدن ارتباط بین عامل‌ها و تغییر توپولوژی ارتباطی) در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن عامل زمانی تاخیر.

برای این منظور ابتدا در بخش دوم، بصورت مختصر و صرفا جهت حفظ پیوستگی مطالب مدل‌ریاضی سینماتیکی، دینامیکی و معادلات حرکت هر عامل (AUV) معرفی شده، سپس پارامترها اصلی، برخی از ضرایبک هیدرودینامیکی و دستگاه‌های مختصات بدنی و اینرسی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های معرفی می‌گردند. در بخش سوم ارتباط بین عامل‌ها به کمک نظریه گراف مدل شده و قانون کنترل اجماع طراحی می‌گردد. در بخش چهارم موقعیت ابتدایی هریک از هفت AUV عضو گروه مشخص شده و مسیر مرجع سه بعدی که AUV راهبر آن را رهگیری می‌کند طراحی می‌گردد. سپس توانایی گروه در شکل دهی یک آرایش حرکتی شش ضلعی و حفظ آن در تعقیب یک مسیر هذلولی سه بعدی در دو حالت: ۱- سوئیچینگ بین عامل ها و بدون حضور عامل تاخیر و ۲-سوئیچینگ بین عامل‌ها با حضور عامل تاخیر بررسی می‌گردد. در نهایت در بخش پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری موضوع خواهیم پرداخت.

۲ - معادلات حاکم بر حرکت

همان‌طور که در شکل ۲ و جداول ۱ و پیوست دیده می‌شود، مدل دینامیک AUV را می‌توان با ۶ درجه آزادی (DOF) در دستگاه مختصات اینرسی و دستگاه مختصات متصل به بدنه توصیف کرد، [۱۳, ۱۴]. در این مطالعه، فرضیات ذیل لحاظ شده است:

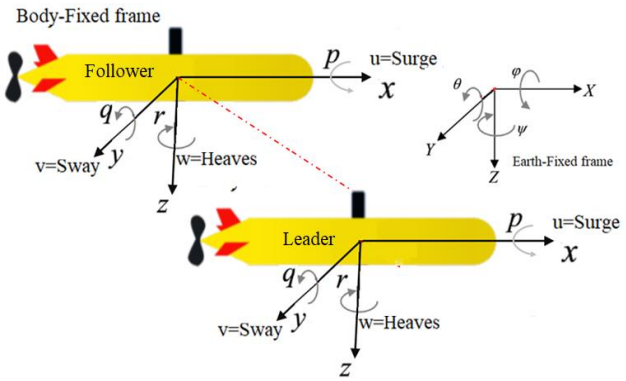
۱- AUVهای تشکیل دهنده گروه از نوع پرتابل توسط نفر و استوانه‌ای شکل هستند، جدول ۲.

۲-تمامی AUV ها هم در صفحه‌ی افقی و هم در صفحه‌ی عمودی تقارن دارند.

۳-چرخش حول محور x (roll) به کمک اختلاف بین مرکز جرم و مرکز حجم ربات خنثی می‌گردد، لذا تأثیر کمی بر حرکت انتقالی داشته و در لذا در مدل سرعت رول (p) نادیده گرفته می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]



شکل ۲ – دستگاه مختصات اینرسی و بدنی در توصیف مختصات AUV راهبر و پیرو

جدول ۱-پارامترها و نمادها در دستگاه مختصات اینرسی و دستگاه مختصات متصل به بدنه

موقعیت و وضعیت	سرعت خطی و زاویه‌ای	نیرو و ممان	توضیحات	درجه آزادی
x	u	X	حرکت انتقالی در راستای محور X	۱
y	v	Y	حرکت انتقالی در راستای محور Y	۲
z	w	Z	حرکت انتقالی در راستای محور Z	۳
ϕ	p	K	حرکت دورانی در راستای محور X	۴
θ	q	M	حرکت دورانی در راستای محور Y	۵
ψ	r	N	حرکت دورانی در راستای محور Z	۶

این مدل برای همه‌ی AUVها از جمله AUV راهبر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمادها و پارامترهای به‌کار رفته، مطابق با سامانه توصیه‌شده توسط اجلاس بین‌المللی دریایی و بولتن اصطلاحات انجمن کشتی‌سازی و مهندسی دریایی (SNAME) است. در این مدل از دستگاه مختصات دکارتی راست‌گرد استفاده شده است، جدول ۱.

معادله سینماتیکی و دینامیکی AUVها به شرح زیر است:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \qquad (۱)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \qquad (۲)$$

که در این رابطه $\eta=[x\ y\ z\ \theta\ \psi]^T \epsilon \mathbb{R}^5$ نشان‌دهنده‌ی موقعیت و وضعیت AUV و $J(\eta)$ ماتریس انتقال از دستگاه متصل به بدنه به‌دستگاه اینرسی است. بردار $v_i=[u_i,v_i,w_i,q_i,r_i]^T \epsilon \mathbb{R}^5$ نشان‌دهنده‌ی سرعت انتقالی و دورانی AUV نام است. ماتریس M نشان‌دهنده ماتریس اینرسی، C(v) نشان‌دهنده ماتریس کوریولیس و D(v) نشان‌دهنده‌ی ماتریس میرایی است. ماتریس g(η) نیز بردار نیروها گرانشی و شناوری را مشخص می‌کند. ماتریس τ، ورودی کنترل است. مدل AUV یک مدل غیرخطی و کوپل شده است که می‌توان از روش خطی‌سازی فیدبک برای تبدیل آن به یک مدل خطی استفاده کرد [۱۵]. روند انجام این کار به شرح زیر است. مدل ریاضیاتی یک AUV را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد:

$$\begin{bmatrix}\dot{\eta}\\ \dot{v}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}I & 0\\ 0 & -M^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}J(\eta)v\\ W(v)v\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ M^{-1}\gamma(\xi)\end{bmatrix}u_\tau \qquad (۳)$$

بنابراین مدل غیرخطی AUV به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}\dot{\xi} &= p(\xi) + q(\xi)u_\tau\\ \mu &= r(\xi)\end{aligned} \qquad (۴)$$

که در این رابطه

$$\dot{\xi} = [\eta^T, v^T]^T$$
$$p(\xi) = \begin{bmatrix}I & 0\\ 0 & -M^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}J(\eta)v\\ W(v)v\end{bmatrix} = [p_i(\xi)]^T,\ \ i = 1,2,\dots,10$$
$$q(\xi) = \begin{bmatrix}0\\ M^{-1}\gamma(\xi)\end{bmatrix} = [q_{ij}(\xi)]_{10\times10},\ \ i,j = 1,2,\dots,10$$
$$r(\xi) = \eta$$

لم یک: یک سامانه می‌تواند با روش خطی‌سازی فیدبک خطی شود، درصورتی‌که شرایط زیر تأمین گردد [۱۶]:

(۱) ابعاد ورودی همانند ابعاد خروجی باشد.

(۲) سامانه دارای درجه نسبی ρ_1، ρ_2، ... ،ρ_n است.

(۳) مجموع درجه نسبی همانند بعد سامانه است.

با ترکیب $q_{ij}(\xi)$ در معادله ۴، ماتریس $\Gamma(\xi)$ را می‌توان با ویژگی مشتق لی تعیین کرد. این مشتق به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$\Gamma(\xi) = L_{qi}L_P r_j(\xi) = \begin{bmatrix} q_{6,1}\cos\psi\cos\theta & -q_{7,2}\sin\psi & q_{8,3}\cos\psi\sin\theta\\ q_{6,1}\sin\psi\cos\theta & q_{7,2}\cos\psi & q_{8,3}\sin\psi\sin\theta\\ -q_{6,1}\sin\theta & 0 & q_{8,3}\cos\theta\\ 0 & 0 & q_{9,3}\\ 0 & q_{10,2}/\cos\theta & 0\\ q_{8,4}\cos\psi\sin\theta & -q_{7,5}\sin\psi & \\ q_{8,4}\sin\psi\sin\theta & q_{7,5}\cos\psi & \\ q_{8,4}\cos\theta & 0 & \\ q_{9,4} & 0 & \\ 0 & q_{10,5}/\cos\theta & \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

با توجه به معادله ۴، $q_{ij}(\xi)$ عددی مخصوص را می‌توان محاسبه کرد؛ بنابراین، $\Gamma(\xi)$ یک ماتریس ناویژه است و درجه نسبی سامانه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶] :

$$\rho_1 = 2,\ \ \rho_2 = 2,\ \ \rho_3 = 2,\ \ \rho_4 = 2,\ \ \rho_5 = 2 \qquad (۶)$$

بنابراین، $\rho_1+\rho_2+\rho_3+\rho_4+\rho_5=10$ که همان ابعاد سامانه است. طبق لم یک، مدل غیرخطی AUV را می‌توان با روش خطی‌سازی فیدبک خطی کرد و تغییر مختصات جدید عبارت است از:

$$\begin{aligned} x &= [r_1(\xi)\ \ r_2(\xi)\ \ r_3(\xi)\ \ r_4(\xi)\ \ r_5(\xi)]\\ v &= [L_p r_1(\xi)\ \ L_p r_2(\xi)\ \ L_p r_3(\xi)\ \ L_p r_4(\xi)\ \ L_p r_5(\xi)]\end{aligned} \qquad (۷)$$

که ورودی کنترل، در سامانه خطی جدید به این صورت تعریف می‌شود:

$$u = T(\xi) + \Gamma(\xi)u_\tau \qquad (۸)$$

که در این رابطه $T(\xi)=[L_p^2 r_1(\xi)\ L_p^2 r_2(\xi)\ L_p^2 r_3(\xi)\ L_p^2 r_4(\xi)\ L_p^2 r_5(\xi)]$. ازآنجایی‌که عبارت $T(\xi)$ بیش از حد پیچیده است، در خارج از اینجا نوشته نخواهد شد. بنابراین، ورودی کنترل واقعی به‌صورت $u_\tau=\Gamma^{-1}(\xi)(u_i-T(\xi))$ محاسبه می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

از ترکیب این رابطه با معادلات ۷ و ۸، مدل دینامیکی خطی‌سازی شده با فیدبک AUV را می‌توان به فرم انتگرال‌گیر استاندارد درجه دوم به‌دست آورد:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= u_i\end{aligned} \qquad (۹)$$

که در این رابطه، $x_i, v_i, u_i \in \mathbb{R}^5$ هستند.

۳ – مدلسازی توپولوژی ارتباطی AUV هابه کمک نظریه گراف

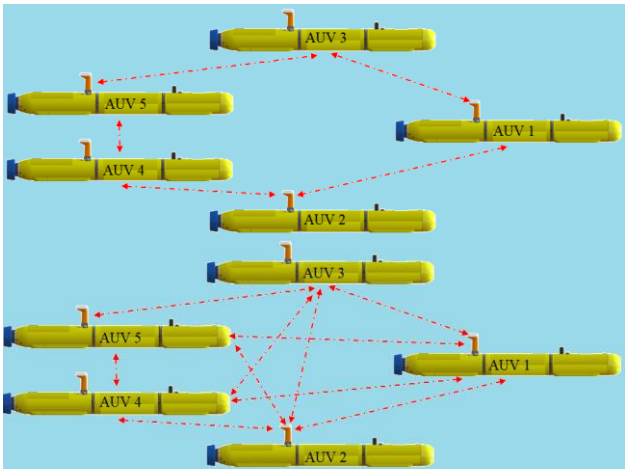
در سیستم‌های چندعاملی بمنظور مدلسازی ارتباطات حاکم فی ما بین عامل‌ها از نظریه گراف استفاده می‌گردد. هر گراف توسط یک زوج $G=(V,E)$ نمایش داده می‌شود که $V=\{v_1,v_2,...,v_n\}$ مجموعه گره‌ها و $E=(v_i,v_j)\subseteq V\times V$ مجموعه یال‌ها می‌باشد. عامل‌های همسایه v_i که با آن تبادل اطلاعات دارند را با $N_i=\{v_j:(v_i,v_j)\in E\}$ مشخص می‌نمایند. چنانچه متناظر با هر لبه گراف یک ضریب وزنی مطلقا مثبت تعریف گردد، ماتریس‌های مجاورت، درجه و لاپلاسین بصورت ذیل معرفی می‌گردند:

$$A=[a_{ij}] \Leftrightarrow \begin{cases} a_{ij}>0 & (v_i,v_j)\in E \\ a_{ij}=0 & (v_i,v_j)\notin E \end{cases}$$

$$D=\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} a_{ji} & i=j \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (۱۰)$$

$$L=D-A$$

دو پارامتر: ۱- همگرایی و ۲- پایداری شبکه را می‌توان با بررسی مقادیرویژه ماتریس‌های فوق بررسی نمود. در حالت کلی هرچه گراف شبکه کامل‌تر باشد، یعنی ارتباط بین عامل‌ها بیشتر باشد، مقدار ویژه دوم ماتریس لاپلاسین (فیدلر) بزرگتر و متعاقبا سرعت همگرایی افزایش می‌یابد. ولیکن در مقابل، پایداری سیستم نسبت به تغییر توپولوژی ارتباطی (سوئیچینگ) و یا عامل تاخیر کم‌تر می‌گردد.



شکل ۳ – توپولوژی ارتباطی رینگ (بالا) و ستاره (پایین)

در شکل ۳ یک شبکه ارتباطی فی مابین ۵ AUV با دو توپولوژی رینگ و ستاره معرفی شده است. ماتریس‌های مجاورت، درجه و لاپلاسین در توپولوژی ارتباطی رینگ بصورت ماتریس‌های ۱۱ و در توپولوژی ارتباطی ستاره بصورت ۱۲ خواهد شد:

$$A_R=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}0&1&0&1&0\\1&0&1&0&0\\0&1&0&0&1\\1&0&0&0&1\\0&0&1&1&0\end{bmatrix}\end{array},\quad D_R=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}2&0&0&0&0\\0&2&0&0&0\\0&0&2&0&0\\0&0&0&2&0\\0&0&0&0&2\end{bmatrix}\end{array} \qquad (۱۱)$$

$$L_R=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}2&-1&0&-1&0\\-1&2&-1&0&0\\0&-1&2&0&-1\\-1&0&0&2&-1\\0&0&-1&-1&2\end{bmatrix}\end{array}$$

$$A_S=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}0&1&1&1&1\\1&0&1&1&1\\1&1&0&1&1\\1&1&1&0&1\\1&1&1&1&0\end{bmatrix}\end{array},\quad D_S=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}4&0&0&0&0\\0&4&0&0&0\\0&0&4&0&0\\0&0&0&4&0\\0&0&0&0&4\end{bmatrix}\end{array} \qquad (۱۲)$$

$$L_S=\begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\end{array}\!\!\begin{array}{c}\begin{array}{ccccc}1&2&3&4&5\end{array}\\ \begin{bmatrix}4&-1&-1&-1&-1\\-1&4&-1&-1&-1\\-1&-1&4&-1&-1\\-1&-1&-1&4&-1\\-1&-1&-1&-1&4\end{bmatrix}\end{array}$$

ماتریس درجه نشان می‌دهد که هر AUV در توپولوژی رینگ با دو همسایه خود در تماس است، در حالی که در توپولوژی ستاره با چهار همسایه در تماس است. شماره همسایه مد نظر در ماتریس مجاورت مشخص می‌گردد. همچنین مجموع درایه‌های هر سطر ماتریس لاپلاسین با توجه به دو جهته بودن ارتباط بین عامل‌ها برابر صفر می‌باشد. مقادیر ویژه هریک از توپولوژی‌های ارتباطی پیشنهادی رینگ و ستاره بصورت ذیل خواهد شد.

$$Eigenvalues_S=\begin{bmatrix}0.0\\5.0\\5.0\\5.0\\5.0\end{bmatrix}, Eigenvalues_R==\begin{bmatrix}0.0\\1.382\\1.382\\3.618\\3.618\end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

۳ – مدلسازی توپولوژی ارتباطی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

در این قسمت ابتدا الگوریتم کنترل اجماع بمنظور شکل‌دهی آرایش حرکت گروهی، متشکل از هفت AUV با توپولوژی سوئیچ‌شونده و تأخیر زمانی معرفی می‌شود. سپس به معرفی مسیرمرجع در اختیار AUV راهبر و آرایش شش ضلعی مد نظر خواهیم پرداخت. سامانه AUVهای چندگانه در قالب یک توپولوژی با تغییرات تصادفی عمل می‌نمایند. فرض بر این است که توپولوژی اتصال AUV ها، سوئیچینگ از نوع مارکوفین است که زنجیره مارکوف توصیف‌کننده فرآیند سوئیچینگ، دارای توزیع احتمال ایستا است. ازآنجاکه گراف متغیر بازمان است، فرض می‌شود که M حالت ممکن برای گراف وجود داشته و توپولوژی شبکه میان آن‌ها جابجا می‌شود.

۱-۳- طراحی پروتوکل اجماع

در سامانه متشکل از چندین AUV، بردار حالت حرکت iامین AUV در زمان t به‌صورت $x_i(t)$ و بردار حالت حرکت AUV راهبر اصلی $x_m(t)$ است. اگر موقعیت شناور راهبر، به‌عنوان نقطه‌ای در نظر گرفته شود که همه AUV ها باید به آن برسند، می‌توان بیان داشت که با برقرار شدن رابطه‌ی (۱۴)، اجماع گروهی به پایداری رسیده و AUVها به‌طور مداوم و پایدار ربات راهبر را دنبال خواهند کرد،[۱۶].

$$\lim_{t\to\infty}\|x_i(t)-x_m(t)\|=0 \qquad (۱۴)$$

با توجه به معادله دینامیکی (۹)، الگوریتم اجماع برای دینامیک AUV راهبر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t)&=v_m(t)\\ \dot{v}_m(t)&=u_m(t)\end{aligned} \qquad (۱۵)$$

دینامیک گروه AUVها که دارای چندین توپولوژی مستقل هستند نیز به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t)&=v_i(t)\\ \dot{v}_i(t)&=u_i(t)\end{aligned} \qquad (۱۶)$$

یک گروه از AUVهای چندگانه را در نظر بگیرید که هر AUV به‌عنوان یک گره در یک گراف G در نظر گرفته شده است. با استفاده از دینامیک استاندارد انتگرال‌گیر دوگانه AUVها در معادله (۹)، پروتوکل اجماع را می‌توان بر اساس الگوریتم اجماع به شرح زیر طراحی نمود:

$$u_i(t)=-\sum_{j\in N_i}a_{ij}(t)\Big(K_{pi}\big(p_i(t)-p_j(t)\big)+K_{vi}\big(v_i(t)-v_j(t)\big)\Big)-c_i(t)\Big(K_{pmi}\big(p_i(t)-p_m(t)\big)+K_{vmi}\big(v_i(t)-v_m(t)\big)\Big) \qquad (۱۷)$$

محدودیت‌های ارتباطی محدود به‌آسانی منجر به تأخیر زمانی می‌شود. الگوریتم اجماع با در نظر گرفتن تأخیر زمانی توسط روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$u_i(t)=-\sum_{j\in N_i}a_{ij}(t)\Big(K_{pi}\big(p_i(t-\tau_1)-p_j(t-\tau_1-\tau_2)\big)+K_{vi}\big(v_i(t-\tau_1)-v_j(t-\tau_1-\tau_2)\big)\Big)-c_i(t)\Big(K_{pmi}\big(p_i(t-\tau_1)-p_m(t)\big)+K_{vmi}\big(v_i(t-\tau_1)-v_m(t)\big)\Big) \qquad (۱۸)$$

در این رابطه، u_i ورودی کنترل iامین AUV است که فقط از اطلاعات حالت همسایگان آن استفاده شده است. پارامترهای K_{pi}، K_{vi}، K_{pmi} و k_{vmi}، بهره‌های پروتکل هستند؛ $p_i(t)\epsilon\mathbb{R}^n$ و $v_i(t)\epsilon\mathbb{R}^n$ به‌ترتیب موقعیت و سرعت iامین AUV در زمان t هستند. $p_m(t)\epsilon\mathbb{R}^n$ و $v_m(t)\epsilon\mathbb{R}^n$ نیز به‌ترتیب موقعیت و سرعت AUV راهبر در زمان t هستند. درایه $a_{ij}(t)$ وزن ارتباطی بین AUVهای iام و jام است که اگر $a_{ij}(t)>0$، AUVی iام در زمان t با AUVی Jام ارتباط دارد و در غیر این صورت، $a_{ij}(t)=0$ است. پارامتر $c_m(t)$، وزن ارتباطی بین AUV راهبر و iامین AUV است که توسط ماتریس قطری C توصیف می‌شود و $C=diag\{c1,c2,\dots,cN\}\epsilon\mathbb{R}^{N\times N}$. پارامترهای $\tau1$ و $\tau2(t)$ نیز به‌ترتیب تأخیرهای ورودی و ارتباطی را نشان می‌دهند که $\tau1$ ثابت و $\tau2(t)$ یک تابع مداوم متغیر بازمان است. قوانین کنترل (۱۷) و (۱۸) به‌نحوی تعریف شده‌اند که وضعیت همه AUV ها، به AUV راهبر همگرا گردد، [۱۶]. در مرجع فوق همگرایی روش فوق به ازای $K_{pi}= K_{vi}= K_{pmi}= K_{vmi}$ به‌تفصیل بررسی و اثبات شده است. اما همان‌طور که قبلاً بیان شد، قوانین کنترل (۱۷) و (۱۸) به‌دلیل همگرا شدن موقعیت تمام AUVها به موقعیت AUV راهبر، باعث برخورد AUVها با یکدیگر می‌شوند. برای رفع این مشکل، می‌توان با اصلاح قانون کنترل (۱۸)، موقعیت AUVها را به‌نحوی کنترل نمود که به یک آرایش چندضلعی پیرامون AUV راهبر دست یابند. قانون کنترل اصلاح‌شده پیشنهادی عبارت است از:

$$u_i(t)=-\sum_{j\in N_i}a_{ij}(t)\Big(K_{pi}\big(p_i(t-\tau_1)-p_j(t-\tau_1-\tau_2)d_{ij}(\theta,\psi)\big)+K_{vi}\big(v_i(t-\tau_1)-v_j(t-\tau_1-\tau_2)\dot{d}_{ij}(\theta,\psi)\big)\Big)-c_i(t)\Big(K_{pmi}\big(p_i(t-\tau_1)-p_m(t)d_{im}(\theta,\psi)\big)+K_{vmi}\big(v_i(t-\tau_1)-v_m(t)\dot{d}_{im}(\theta,\psi)\big)\Big) \qquad (۱۹)$$

که در این رابطه، $dij(\theta,\psi)$ موقعیت شناور iام نسبت به شناور jام و $dim(\theta,\psi)$، موقعیت شناور iام نسبت به AUV راهبر است و بسته به آرایش AUVها، مقدار آنها برحسب θ و ψ به‌دست می‌آید. پارامترهای $\dot{d}_{ij}(\theta,\psi)$ و $\dot{d}_{im}(\theta,\psi)$ نیز به‌ترتیب مشتقات زمانی $dij(\theta,\psi)$ و $dim(\theta,\psi)$ هستند.

۲-۳- طراحی آرایش حرکتی شش ضلعی

ساختار گروه AUVهای چندگانه از هفت ربات خودمختار بدون سرنشین زیرسطحی شامل یک راهبر و شش پیرو تشکیل شده است. در ساختار سوئیچینگ، یک عامل به‌عنوان راهبر انتخاب شده و به مسیر مرجع دسترسی خواهد داشت و سایر عوامل از آن پیروی می‌کنند؛ اما نکته مهم، تغییر مکرر توپولوژی ارتباطی میان AUVها می‌باشد. در این ساختار ممکن است AUV راهبر با هریک از AUVها در ارتباط بوده و یا ارتباط آن قطع گردد؛ اما لازم است که میان هر AUV پیرو و AUV راهبر، حداقل یک مسیر ارتباطی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

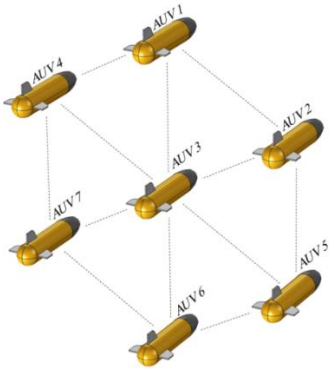
جدول ۲- وضعیت و سرعت اولیه AUVها

	وضعیت اولیه	سرعت اولیه
AUV1	[50 0 0 -π/9 π/2]	[0.5 0 0 0 0]
AUV2	[56 -1 -6 -π/18 π/4]	[0 0 0 0]
AUV3	[44 -2 6 π/18 2π/3]	[0 0 0 0]
AUV4	[60 -10 -4 π/9 π]	[0 0 0 0]
AUV5	[40 -8 2 –π/18 0]	[0 0 0 0]
AUV6	[45 -8 2 –π/18 0]	[0 0 0 0]
AUV7	[49 -8 2 –π/18 0]	[0 0 0 0]

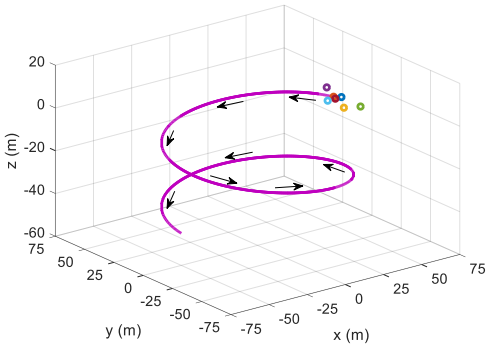
مستقیم یا غیرمستقیم وجود داشته باشد. این شرط، دست‌یابی همه‌ی عوامل به مسیر مرجع را تضمین می‌نماید. در ادامه، کنترل اجماعی AUVهای چندگانه با ساختار سوئیچینگ و در دو حالت مختلف در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها، هفت AUV با آرایش شش‌ضلعی و گراف ارتباطی سوئیچنگ، یک مسیر حلزونی شکل را دنبال می‌کنند. شکل ۴ نحوه‌ی قرار گرفتن AUVها در آرایش شش‌ضلعی و شکل ۵ مسیر حرکت و موقعیت اولیه آنها را نمایش می‌دهد. مسیر مرجع، یک مسیرحلزونی (مارپیچ) شکل سه‌بعدی است که با معادلات ۲۰ بیان می‌شود:

$$x(t) = 50\cos(0.002\pi t), y(t) = 50\sin(0.002\pi t), \quad z(t) = -0.03t \qquad (۲۰)$$

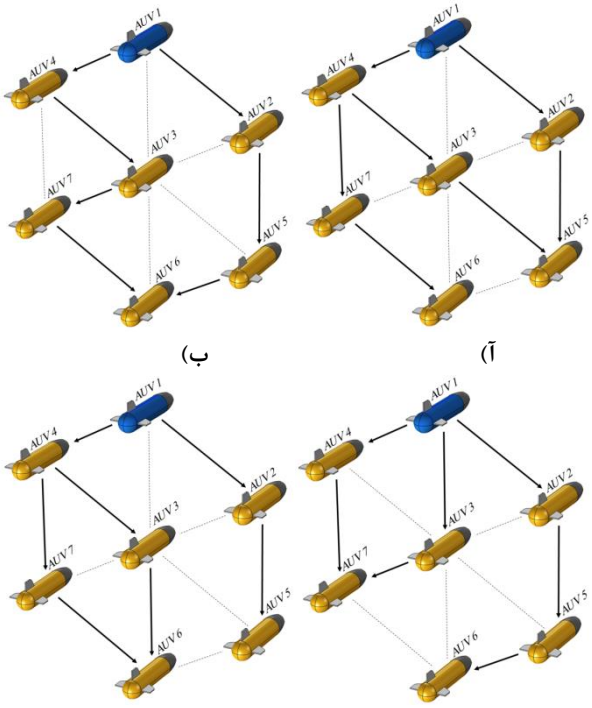
زوایای $\theta(t)$ و $\psi(t)$ نیز به‌صورتی در نظر گرفته می‌شوند که AUVها بر مسیر حرکت مماس باشند. جدول ۲ نیز وضعیت و سرعت اولیه‌ی AUVها را مشخص می‌کند.



شکل ۴- نحوه‌ی قرار گرفتن AUVها در آرایش شش‌ضلعی



شکل ۵-مسیر حرکت مرجع و موقعیت اولیه AUVها



شکل ۶- چهار توپولوژی‌های ارتباطی ممکن در سناریوی اول با آرایش شش‌ضلعی

۴- سناریو تست

به منظور اعتبارسنجی و اعتبار بخشی به پروتوکل اجماع طراحی شده، دو سناریو تست ذیل پیشنهاد می‌گردد:

۱-سناریو اول: آرایش شش ضلعی و رهگیری مسیر مرجع حلزونی سه بعدی با وجود توپولوژی ارتباطی سوئیچ شونده بین AUVهای پیرو و بدون حضور عامل تاخیر .

۲- سناریو دوم: آرایش شش ضلعی و رهگیری مسیر مرجع حلزونی سه بعدی با وجود توپولوژی ارتباطی سوئیچ شونده بین AUVهای پیرو و با در نظر گرفتن عامل تاخیر .

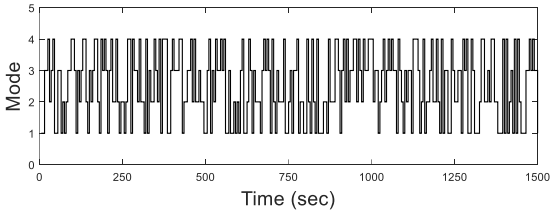
۴-۱-سناریو اول

در این سناریو هفت AUV با آرایش شش‌ضلعی و گراف ارتباطی سوئیچنگ، مسیر حلزونیِ نشان داده شده در شکل ۵ و معادله ۲۰ را دنبال می‌کنند. شکل ۶ و ۷، مجموعه توپولوژی‌های ارتباطی ممکن میان AUVها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در هر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

چهار ساختار ارتباطی، AUV1 راهبر اصلی بوده و مستقیماً به مسیر مرجع دسترسی دارد.



شکل ۷-نمودار تغییر حالت توپولوژی ارتباطی AUVها در سناریوی اول

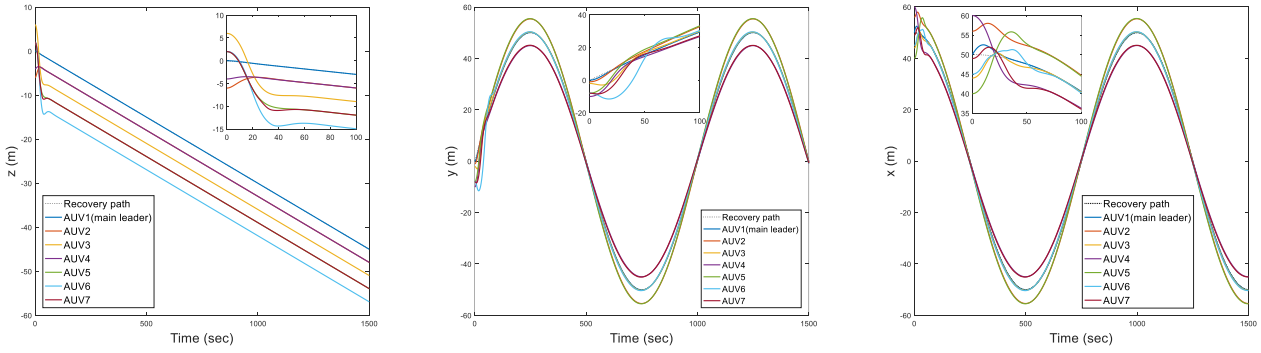
با اجرای شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب، شکل ۸ موقعیت و وضعیت AUVها را در خلال فرآیند اجماع را توصیف می‌کند. در این شبیه‌سازی مشاهده شد که حداکثر خطای ردیابی مسیر برای AUV راهبر و AUVهای پیرو به‌ترتیب برابر ۰/۱۰۲ m و ۰/۴۵۰ m است. همچنین، نوسانات و حالات گذرای موقعیت AUV راهبر و AUVهای پیرو به‌ترتیب در مدت‌زمان ۷۰ s و ۱۰۰ s میرا می‌شود. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که اگرچه موقعیت AUVها در راستای محورهای x، y و z با یکدیگر برابر نیست، اما فاصله و جهت AUVها یکسان بوده و بنابراین، شرط کنترل اجماعی برقرار مانده است.

در شکل ۹، مؤلفه‌های مختلف سرعت AUVها و در شکل ۱۰، سیگنال‌های کنترلی آن‌ها در خلال روند بازیابی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که سرعت در مدت‌زمانی کمتر از ۱۰۰ s به یک مقدار ثابت همگرا شده و نوسانات آن میرا می‌شود. همچنین دیده می‌شود که سرعت AUVها در راستای محورهای x، y و z دارای تفاضل ثابت و در راستای محورهای θ و ψ با یکدیگر برابر است.

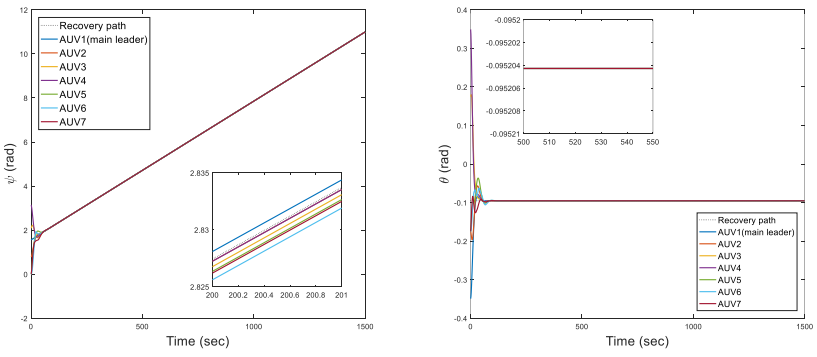
شکل ۱۱، مسیر سه‌بعدی حرکت AUVها را توصیف کرده و به‌طور شهودی‌تر، کل فرآیند اجماع، شکل‌دهی و رهگیری مسیر مرجع را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، AUV راهبر مسیر مرجع را دنبال کرده و شش AUV به آن همگرا می‌شوند و سپس با آن همراه می‌گردند. بنابراین، با استفاده از این شکل می‌توان دریافت که با به‌کارگیری روش کنترل اجماع پیشنهادی، گروه AUVها با حفظ آرایش خود مسیر موردنظر را در حالت سه بعدی دنبال کرده و به مقصد رسیده‌اند. در این حالت می‌توان گفت که مأموریت اجماع، شکل‌دهی حرکت و رهگیری مسیر مرجع AUVها به پایان رسیده است.

۲-۴-سناریو دوم

سناریو دوم از منظر تعداد اعضای تشکیل دهنده گروه، اجماع، شکل-دهی حرکت و رهگیری مسیر مرجع همانند سناریو اول است. منتها در این سناریو تاثیر تاخیر عملگرها بر همگرایی سیستم بررسی شده است. به‌منظور بررسی دینامیک مدل‌نشده‌ی عملگرها، فرض می‌شود که هر یک از آنها دارای ۲ s تأخیر بوده و شبیه‌سازی‌ها تکرار می‌شود. شکل ۱۲ مسیر حرکت AUVها در این شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که تأخیر عملگرها، زمان همگرایی عامل‌ها را شدایدا تحت تاثیر قرار می‌دهد.



آ) ب) پ)

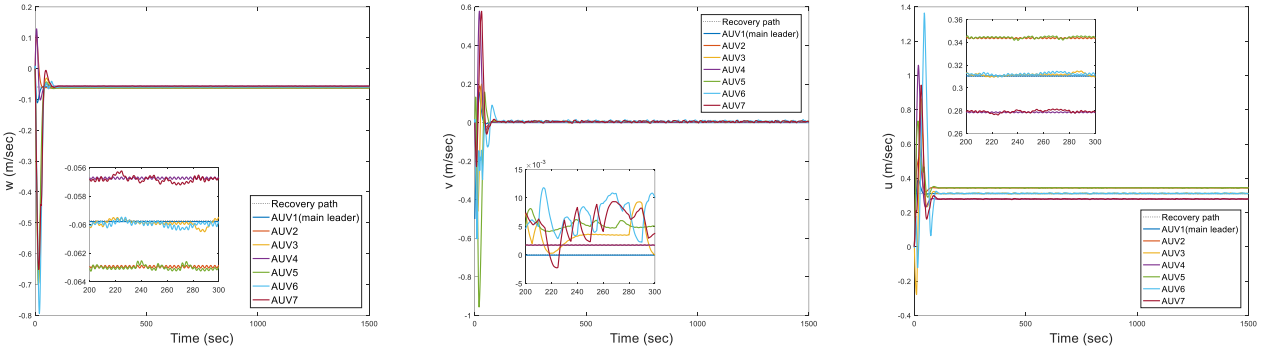


ت) ث)

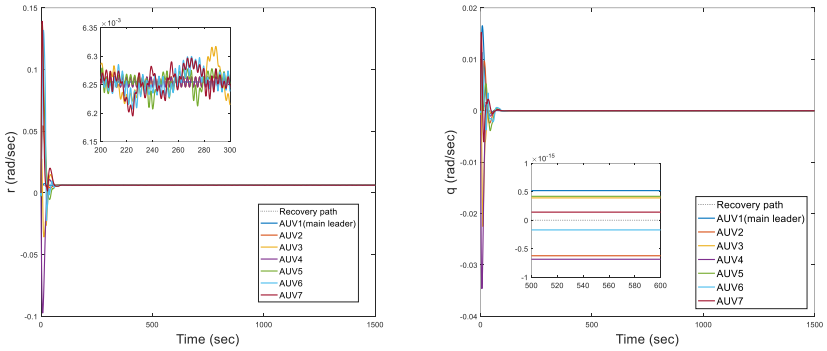
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

شکل ۸- موقعیت و وضعیت AUVها در سناریوی اول

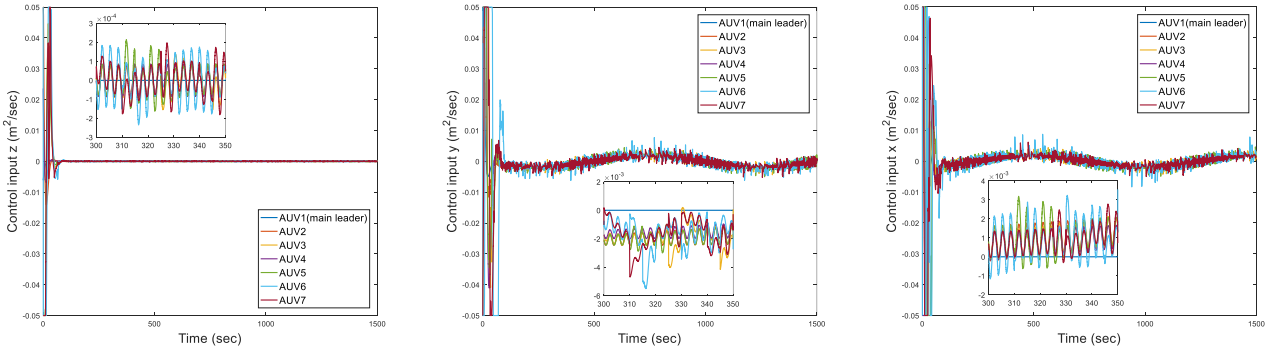


آ) ب) پ)

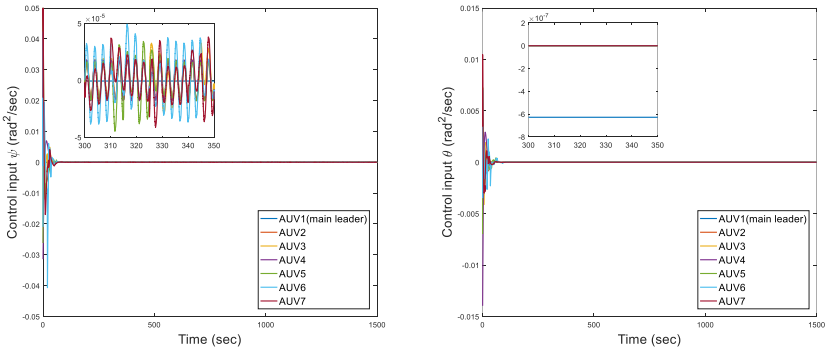


ت) ث)

شکل ۹-مؤلفه‌های مختلف سرعت خطی و زاویه‌ای AUVها در خلال کنترل اجماعی



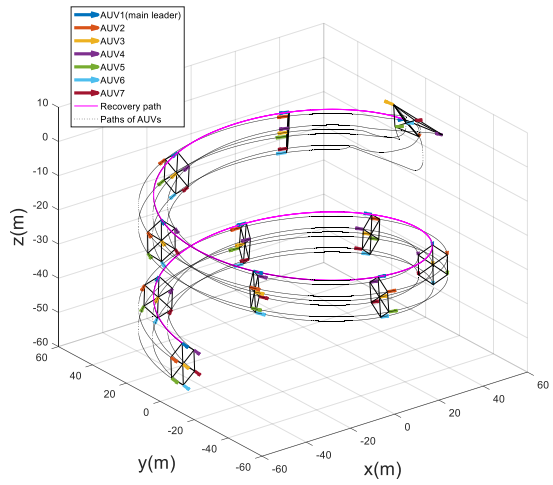
آ) ب) پ)



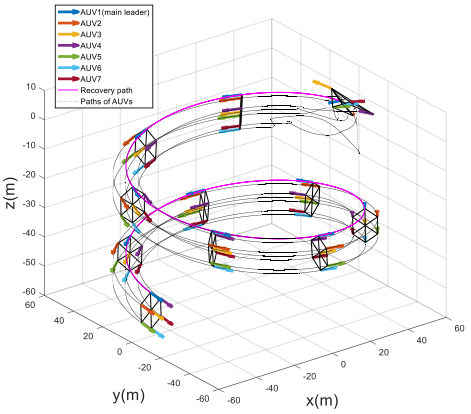
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

ت)



شکل ۱۱-مسیر حرکت سه بعدی AUVها با آرایش شش‌ضلعی و رهگیری مسیر مرجع در سناریو اول



شکل ۱۲- مسیر حرکت AUVها با آرایش شش‌ضلعی در بازه زمانی [۱۵۰۰-۰] ثانیه و با اعمال دو ثانیه تأخیر در عملگرها (سناریو دوم)

۳-۴-مقایسه نتایج

در جدول ۳، زمان همگرایی و خطای ردیابی مسیر AUVها با آرایش شش‌ضلعی و ساختار سوئیچینگ، در دو حالتِ بدون تاخیر و با تاخیر باهم مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود،

جدول ۳-زمان همگرایی و خطای ردیابی مسیر AUVها در آرایش شش‌ضلعی

AUV راهبر		AUVهای پیرو	
مدت‌زمان همگرایی (s)	بیشینه خطا (m)	مدت‌زمان همگرایی (s)	بیشینه خطا (m)
۷۰	۰/۱۰۲	۱۰۰	۰/۴۵۰
-	-	۲۰۰	۱/۲

ت)

ث)

شکل ۱۰-مؤلفه‌های مختلف سیگنال کنترل AUVها در خلال کنترل اجماعی

سوئیچینگ بدون تاخیر	۷۰	۰/۱۰۲	۱۰۰	۰/۴۵۰
سوئیچینگ با تاخیر	-	-	۲۰۰	۱/۲

اعمال تاخیر، خطای ردیابی مسیر و زمان همگرایی AUVها را افزایش داده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل اجماع گروهی از AUVها با توپولوژی ارتباطی سوئیچ‌شونده همراه با تأخیر زمانی عملگرها، بمنظور طراحی آرایش هندسی حرکت شش ضلعی و رهگیری یک مسیر حلزونی سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، از یک عامل انتگرال‌گیر مرتبه دوم برای مدلسازی ریاضی AUVهای راهبر و پیرو استفاده شده و بکمک نظریه گرافها و ماتریس‌های مجاورت، درجه، لاپلاسین و مقادیر ویژه آنها ارتباطات عامل‌ها با یکدیگر مدلسازی می‌گردد. سپس پروتوکل اجماع بگونه‌ای طراحی می‌گردد که موقعیت AUVها را به یک آرایش هندسی شش ضلعی همگرا نماید و ضمن حفظ آن مسیر مرجع رهگیری شود. به‌منظور بررسی صحت و قابلیت همگرایی پروتوکل اجماع پیشنهادی، دو سناریو تست با پیچیدگی مختلف تعریف‌گردید. نتایج نشان می‌دهد که روش کنترل اجماع پیشنهادی، قابلیت همگرا نمودن AUVها به یک آرایش شش ضلعی پیرامون AUV راهبر را دارد. در این روش اجماع، اگرچه موقعیت AUVها در راستای محورهای x، y و z با یکدیگر برابر نیست، اما فاصله و جهت AUVها یکسان بوده و بنابراین، شرط کنترل اجماعی برقرار مانده است. به‌عبارت دیگر، اجماع برای دست‌یابی به یک آرایش مشخص انجام شده است و بنابراین، می‌توان این روش را نوعی کنترل شکل‌دهی- اجماعی دانست. علاوه‌براین، مشاهده شد که تأخیر کم پیشرانه‌ها تأثیر چندانی بر عملکرد اجماعی AUVها ندارد، اما افزایش این زمان به‌ویژه در ساختار سوئیچینگ می‌تواند زمان همگرایی و مسیر حرکت AUVها را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد.

پیوست یک:

جدول ۴: برخی از ضرایب مهم مورد استفاده در مدل دینامیکی شش درجه آزادی ربات مد نظر.

	پارامتر	مقدار	توضیحات
۱	X_g	0.0 mm	مرکز جرم
۲	Y_g	0.0 mm	مرکز جرم
۳	Z_g	15 mm	مرکز جرم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]

مرکز حجم	$0.0\ \text{mm}$	X_b	۴
مرکز حجم	$0.0\ \text{mm}$	Y_b	۵
مرکز حجم	$0.0\ \text{mm}$	Z_b	۶
ممان اینرسی	$27.32\ Kg.m^2$	I_{XX}	۷
ممان اینرسی	$23.458\ Kg.m^2$	I_{YY}	۸
ممان اینرسی	$23.458\ Kg.m^2$	I_{ZZ}	۹
سرعت سرج	$1.534\ {}^{m}/_{\text{sec.}}$	u	۱۰

۶ - مراجع

[1] J. Yang, M. Fečkan, and J. Wang, "*Consensus Problems of Linear Multi-agent Systems involving Conformable Derivative*," Applied Mathematics and Computation, vol. 394, pp. 125809, 2021.

[2] L. Shi, and D. Xie, "*Leader-following consensus of second-order multi-agent systems with time-varying delays and arbitrary weights*," Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 42, no. 16, pp. 3156-3167, 2020.

[3] C. Deng, and G.-H. Yang, "*Leaderless and leader-following consensus of linear multi-agent systems with distributed event-triggered estimators*," Journal of the Franklin Institute, vol. 356, no. 1, pp. 309-333, 2019.

[4] H. Zhao, S. Xu, and D. Yuan, "*An LMI approach to consensus in second-order multi-agent systems*," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 9, no. 6, pp. 1111-1115, 2011.

[5] M. Park, O. Kwon, J. H. Park, S. a. Lee, and E. Cha, "*Randomly changing leader-following consensus control for Markovian switching multi-agent systems with interval time-varying delays*," Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, vol. 12, pp. 117-131, 2014.

[6] Y. Shang, "*Consensus seeking over Markovian switching networks with time-varying delays and uncertain topologies*," Applied Mathematics and Computation, vol. 273, pp. 1234-1245, 2016.

[7] X. Hu, Z. Zhang, C. Li, and L. Li, "*Leader-following Consensus of Multi-agent Systems via a Hybrid Protocol with Saturation Effects*," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 19, no. 1, pp. 124-136, 2021.

[8] Z. Zhang, S.-M. Chen, and Y. Zheng, "*Fully Distributed Scaled Consensus Tracking of High-order Multi-agent Systems with Time Delays and Disturbances*," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021.

[9] X. Zhang, and C. Li, "*Finite-time stability of nonlinear systems with state-dependent delayed impulses*," Nonlinear Dynamics, vol. 102, no. 1, pp. 197-210, 2020.

[10] W. Zhang, J. Zeng, Z. Yan, W. Tian, and Y. Zhang, "*Coordinated Control for Multiple Autonomous Underwater Vehicles Recovery System with Time Delay*." pp. 1-7.

[11] A. ur Rehman, M. Rehan, M. Riaz, M. Abid, and N. Iqbal, "*Consensus tracking of nonlinear multi-agent systems under input saturation with applications: A sector-based approach*," ISA transactions, vol. 107, pp. 194-205, 2020.

[12] G. Zong, H. Ren, and H. R. Karimi, "*Event-triggered communication and annular finite-time H∞ filtering for networked switched systems*," IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 51, no. 1, pp. 309-317, 2020.

[13] T. T. J. Prestero, "*Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle*," Massachusetts institute of technology, 2001.

[14] E. Taheri, M. H. Ferdowsi, and M. Danesh, "*Design boundary layer thickness and switching gain in SMC algorithm for AUV motion control*," Robotica, vol. 37, no. 10, pp. 1785-1803, 2019.

[15] Z. Yan, Z. Yang, L. Yue, L. Wang, H. Jia, and J. Zhou, "*Discrete-time coordinated control of leader-following multiple AUVs under switching topologies and communication delays*," Ocean Engineering, vol. 172, pp. ۳۷۲-۱, ۲۰۱۹.

[16] W. Zhang, J. Zeng, Z. Yan, S. Wei, J. Zhang, and Z. Yang, "*Consensus control of multiple AUVs recovery system under switching topologies and time delays*," IEEE Access, vol. 7, pp. 119965-119980, 2019.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.10.2]