Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Research Article

Design and Implementation of Integrated Virtual Sensor Simulator Unit for Hardware in the Loop Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle

Gholamreza Nadalinia Chare [a], Seyed Vahid Zia [a,*], Tohid Kardgar [a]

[a] *Research Assistant, Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University Of Technology, Tehran, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 20 May 2023
Revised: 26 February 2024
Accepted: 10 March 2024

Keywords:

Virtual sensor simulator,
Hardware in the loop laboratory,
Real time,
Autonomous underwater vehicle.

ABSTRACT

Evaluating performance of the integrated system and its subsystems of the Autonomous Underwater Vehicle (AUV), such as sensors and actuators, requires the maybe expensive hardware in the loop laboratory (HIL). Modeling can be a cost-effective tool for validating hardware and software performance, performing missions, and thus reducing potential errors in marine missions which can be achieved through a relatively accurate dynamic simulation and modeling of equipment and environmental conditions inside the HIL. The purpose of this paper is to manufacturing a real-time virtual simulator unit of sensors used in AUV for to equip HIL. The suggested integrated simulator, simulates the output of the sensors used in the AUV such as pressure, GPS, inertial, magnetic and speed according to the technical characteristics and communication protocols of each sensor and sends to on-board computer. The proposed integrated virtual sensor unit with user-friendly features can be easily added to the HIL, leading to a significant reduction in costs. Evaluation result of the virtual sensor simulator unit in the HIL was performed in real-time that the results indicate the appropriate performance of simulation and its comparability with real tests at sea.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.30633.2454

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: vahidzia@mut.ac.ir

How to cite this article:
Nadalinia Chare, G., Zia, S. V., & Kardgar, T. (2024). Design and Implementation of Integrated Virtual Sensor simulator Unit for Hardware in the Loop Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle. Journal of Modeling in Engineering, 22(78), 233-248. doi: 10.22075/jme.2024.30633.2454

مقاله پژوهشی

طراحی و پیاده‌سازی واحد یکپارچه شبیه‌ساز حسگر مجازی برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه یک رونده هوشمند دریایی

غلامرضا نادعلی‌نیاچاری[۱]، سید وحید ضیاء[۲*]، توحید کاردگر[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

واژگان کلیدی:
شبیه‌ساز حسگر مجازی،
آزمایشگاه سخت‌افزار درحلقه،
بلادرنگ،
رونده زیرآبی خودگردان.

چکیده

ارزیابی عملکرد سامانه یک‌پارچه و زیرسامانه‌های یک رونده زیرآبی خودگردان مانند حسگرها و عملگرها به آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه مجهز و پرهزینه نیاز دارد. مدل‌سازی می‌تواند یک ابزار مقرون به صرفه برای تایید و تصدیق عملکرد سخت‌افزار و نرم‌افزار، اجرای ماموریت و در نتیجه کاهش خطاهای بالقوه در ماموریت‌های دریایی باشد که از طریق یک شبیه‌سازی نسبتا دقیق دینامیکی و مدل‌سازی تجهیزات و شرایط محیطی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه قابل دستیابی است. هدف این مقاله ساخت واحد شبیه‌ساز مجازی بلادرنگ از حسگرهای مورد استفاده در یک رونده زیرآبی برای تجهیز آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه است. شبیه‌ساز یک‌پارچه پیشنهادی، خروجی حسگرهای مورد استفاده در رونده زیرآبی مانند فشار، GPS، ژیروسکوب، مغناطیس و سرعت را مطابق با ویژگی‌های فنی و پروتکل‌های ارتباطی هر حسگر، شبیه‌سازی کرده و برای رایانه در بستر ارسال می‌کند. واحد یک‌پارچه حسگر مجازی پیشنهادی با ویژگی سهولت کاربری، قابلیت اضافه شدن آسان به آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه را داشته و منجر به کاهش چشم‌گیر هزینه می‌شود. ارزیابی عملکرد شبیه‌ساز حسگر مجازی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه بصورت بلادرنگ انجام پذیرفته و نتایج بیانگر عملکرد مناسب شبیه‌سازی و قابل قیاس بودن آن با آزمایش های واقعی در دریا است.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.30633.2454

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱-مقدمه[۱]

شبیه‌سازی و مدل‌سازی[۲] یک روند استاندارد در قالب برنامه ارزیابی و تایید (V&V)[۳] برای طراحی و ساخت سامانه‌های پیچیده اجرا می‌گردد[6]. با اجرای این روند استاندارد، عیب‌یابی سطح سامانه‌ای و ریزاجزا و طراحی ماموریت امکان‌پذیر گردیده که می‌تواند مانع از بروز خسارت‌های بسیار پرهزینه و اتلاف زمان گردد. مدل‌سازی عموما یک توصیف ریاضیاتی از سامانه فیزیکی است در حالیکه شبیه سازی بیانگر چگونگی پیاده‌سازی مدل‌ها در پیکره بندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. هدف از مدل سازی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی برای یک سامانه پیچیده، تکرار دقیق پاسخ سامانه واقعی به ورودی‌ها با گستره مورد انتظار در شرایط محیطی شبه واقعی است که برای مباحث تحلیلی و طراحی ماموریت بسیار مفید خواهند بود. مدل‌سازی و شبیه‌سازی از طریق توسعه شبیه‌سازها در بستر یک آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه (HIL)[۴] محقق می‌گردد که هدف آن آزمایش مباحث سامانه‌ای و معماری کنترلی روی رایانه در بستر[۵] یک ربات در هر دو سطح

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: vahidzia@mut.ac.ir
۱. دستیار پژوهشی، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[2] Simulation & modeling
[3] Verification and Validation
[4] Hardware in the Loop
[5] On-Board Computer

استناد به این مقاله:
نادعلی نیاچاری، غلامرضا، ضیا، سید وحید، و کاردگر، توحید. (۱۴۰۳). طراحی و پیاده سازی واحد یکپارچه شبیه ساز حسگر مجازی برای آزمایشگاه سخت افزار در حلقه یک رونده هوشمند دریایی. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۲۳۳-۲۴۸. doi: 10.22075/jme.2024.30633.2454

سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است بطوریکه نتایج آن با رفتار نمونه اصلی در شرایط واقعی قابل مقایسه باشد. این روال ارزیابی و تایید امروزه برای انواع سامانه‌های پیچیده مانند کاوشگرهای فضایی، ربات‌های هوایی، زمینی و زیرآبی و ... پیش از برگزاری آزمون نهایی اجرا می‌شود و محققان از نتایج مثبت آن برای تدقیق طراحی‌های خود بهره می‌گیرند. رونده زیرآبی خودگردان (AUV)[1] یک سامانه پیچیده متشکل از حسگرها، واحد هدایت، ناوبری و کنترل (GNC)[2] با الگوریتم پیچیده برخط، سامانه تامین توان و واحد مدیریت ماموریت است که تعامل مناسب میان آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در اجرای موفق یک ماموریت دارد. الزام روال ارزیابی، تایید صحت عملکرد کلیه زیرسامانه‌های فوق در شرایط شبه واقعی پیش از آزمون اصلی در محیط آزمایشگاهی است. این مسئله با توجه به مباحث قابلیت اطمینان قابل چشم‌پوشی نیست. حصول این مهم منوط به راه‌اندازی آزمایشگاه HIL به همراه انواع شبیه‌سازها و توسعه بستر مناسب برای ارزیابی عملکرد زیرسامانه‌های سخت‌افزاری مانند حسگرها و پردازنده به تنهایی و در تعامل با الگوریتم‌های در بستر با ساختار تجمیع‌یافته است. بنابراین مدل‌سازی و شبیه‌سازی جز لاینفکی از آزمایشگاه HIL محسوب شده و هدف آن اجرای یک آزمایش بلادرنگ[3] است. همانطور که پیشتر بیان شد، آزمایشگاه HIL می‌تواند به کاهش دوره توسعه، کم کردن هزینه کلی، پیشگیری از خرابی‌های گران و آزمایش یک زیرمجموعه با همه جزئیات قبل از آنکه به سامانه اصلی ملحق شود، کمک کند.

وظیفه شبیه‌سازها (سخت‌افزاری و نرم‌افزاری) در آزمایشگاه HIL، ایجاد شرایط شبه واقعی برای دریافت خروجی حسگرهای حلقه ناوبری برای استفاده در الگوریتم‌های برخط هدایت، ناوبری و کنترل و عملکرد الگوریتم بلادرنگ در سخت‌افزار پردازنده در واحد کنترل ماموریت به همراه دینامیک شبیه‌سازی شده از سامانه اصلی است. در مرجع [۱] یک نرم‌افزار بلادرنگ برای شبیه‌سازی حرکتی رونده زیرآبی Pirajuba به منظور آزمایش سامانه کنترل و با پذیرش مشخصات واقعی سخت‌افزار در بستر مانند حسگرها و عملگرها ارائه شده است. نرم‌افزار شبیه‌سازی شامل تعدادی ماژول برای توصیف دینامیک سامانه، آشفتگی محیطی و دینامیک حسگرها و عملگرها است. برای تجمیع آسان نرم‌افزار شبیه‌ساز به سامانه سخت‌افزار در حلقه، از مدل‌های بلادرنگ تولید شده از طریق ابزار متلب/سیمولینک در محیط توسعه‌ای xPC Target استفاده شده است. شبیه‌سازی و مدل‌سازی از رونده اقیانوس‌شناسی با ارائه مدلی از دینامیک رونده به همراه شرایط محیطی مانند مدل موج، شرایط عمق و شبیه‌سازی حسگرها بصورت مجازی برای اجرای نرم‌افزاری به تنهایی و یا در قالب آزمایشگاه HIL روی Linux در مرجع [۲] ارائه شده است. توسعه ساختار میز محیط مجازی در آزمایشگاه واقعیت مجازی و چندرسانه‌ای دانشگاه لویزیانا در مرجع [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از پیاده‌سازی میز محیط مجازی، طراحی مدل سه بعدی از محیط، رونده‌های زیرآبی و سایر ادوات، تجمیع مدل‌های طراحی شده در یک شبیه‌سازی، برقراری و تصدیق ارتباط میان کاربران و رونده های شبیه‌سازی شده و همزمان‌سازی رونده واقعی با شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری DIS-Java-VRML است. DIS[4] یک پروتکل ارتباطی استاندارد برای انتقال پیام در جهان‌های مجازی با مقیاس بزرگ است. ابزار VRML[5] هم زبان مدل‌سازی واقعیت مجازی است که امکان نمایش سه بعدی از شبیه‌سازی را ایجاد می‌کند.

یک شبیه‌ساز بلادرنگ برای رونده زیرآبی با اجرا در نرم‌افزار MOOS-IvP[6] در مرجع [۴] پیشنهاد شده است. این شبیه‌ساز دارای دو بخش واحد مجازی مدل پایه و کنترل-کننده در بستر است که بترتیب روی رایانه و میکروکامپیوتر Raspberry PI پیاده‌سازی شده‌اند و در نهایت نتایج شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه آن با شبیه‌سازی متلب مقایسه شده‌اند. در مرجع [۵] ابزار Thetis برای شبیه‌سازی ماموریت دریایی ارائه شده است. این ابزار یک شبیه‌ساز بلادرنگ مرکب از چندین وسیله ناهمگن با ماموریت کاوش و جمع‌آوری اطلاعات در مقیاس مختلف با حسگرهای چندگانه از محیط زیرآبی است که روش طبقه‌بندی جدیدی از عوامل موثر در شبیه‌سازی ماموریت را ارائه کرده است. در روش طبقه‌بندی پیشنهادی کلیه فعالیت‌ها و عوامل تاثیرگذار در هفت گروه شبیه‌ساز چندگانه وسایل، ارتباطات

[1] Autonomous Underwater Vehicles
[2] Guidance, Navigation & Cntrol
[3] Real Time
[4] Distributed Interactive Simulation
[5] Virtual Reality Modeling Language
[6] Mission Oriented Operating Suite-Interval Programming software

بین آنها، مودهای شبیه‌سازی روی خطی، برون خطی و ترکیبی[1]، پدیده‌های محیطی، محرکه‌های بیرونی، کنترل-کننده و محیط دیداری سه بعدی دسته‌بندی شده‌اند. این نرم‌افزار شبیه‌سازی به عنوان نمونه روی وسایل زیرآبی خودگردان Taipan2 ساخت مرکز LIRMM[2] فرانسه و Charlie ساخت موسسه ISSIA[3] ایتالیا پیاده‌سازی شده است. مرجع [۶] به چگونگی اجرای برنامه ارزیابی و تایید مریخ‌نورد Curiosity از مرحله ورود به جو مریخ تا لحظه نشست بر سطح آن پرداخته است که کارایی هر یک از زیرسامانه‌های مریخ‌نورد مانند سپر حرارتی، ساز و کار جدایش لاک، سامانه جرثقیل هوایی و نشست روی سطح، چتر نجات، ابزار ارتباطی، سامانه پرواز (زیرمجموعه‌های هدایت، ناوبری و کنترل، حسگرها، عملگرها و رادار) و پیشرانش و موتورها را با لحاظ کردن مدل‌های اتمسفری، گرانش و عوارض سطحی سیاره مریخ روی میز آزمایش شبیه‌سازی تحلیل کنترل CAST[4] مورد بررسی قرار می-دهد. با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد ساخت و ارسال کاوشگر به فضا و همچنین پیشگیری از شکست‌های احتمالی و تبعات اقتصادی، سیاسی و تبلیغاتی آن، اجرای سخت‌گیرانه برنامه ارزیابی و تایید برای کلیه المان‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بصورت منفرد یا در قالب سامانه یکپارچه در معرض شرایط محیطی مشابه مریخ، امری لازم و ضروری است. این ساختار می‌تواند به عنوان یک استاندارد و مرجع برای کلیه سامانه‌های مشابه تحقیقاتی قابل استفاده باشد.

ارائه مدل و پیاده‌سازی شبیه‌ساز محیطی عمق برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده زیرآبی خودگردان با هدف ارزیابی و تایید صحت عملکرد حسگر فشار واقعی مورد استفاده روی AUV ، توسعه آزمایشگاه HIL با شبیه‌ساز محیطی ارزان‌قیمت و نزدیکی هر چه بیشتر شبیه‌سازی به محیط عملکردی واقعی در مرجع [7] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، ساختار آزمایشگاه HIL بلادرنگ به همراه واحد شبیه‌ساز حسگر مجازی (VSSU)[5] برای اجرای سناریوی ماموریتی یک رونده زیرآبی خودگردان ارائه و طرح توسعه آن با افزودن شبیه‌ساز سخت‌افزاری حسگرهای مورد استفاده در AUV معرفی شده است. دینامیک حرکتی وسیله در واحد شبیه‌ساز دینامیکی (DSU)[6] مدل‌سازی می‌شوند. واحد VSSU به عنوان یک واحد مستقل روی پلتفرم پردازنده ARM پیاده‌سازی شده است و وظیفه دو گانه را بر عهده خواهد داشت. در مود کاملا نرم‌افزاری واحد VSSU می‌تواند سیگنال خروجی هر حسگر مورد استفاده در AUV را مطابق با مشخصات فنی/کارکردی و پروتکل ارتباطی واقعی آن تولید کند و برای استفاده در حلقه GNC در اختیار رایانه شناوری قرار دهد. در مود دوم عملکردی، واحد VSSU می‌تواند با واحدهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری هر حسگر به طور مجزا ارتباط برقرار کرده و شرایط را برای تولید سیگنال واقعی این حسگرها ایجاد کند. مهم‌ترین مسئله در این مود، تضمین کارکرد بلادرنگ واحد VSSU در تعامل با واحدهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری حسگرها و رایانه شناوری برای ارزیابی و تایید صحت عملکرد واحد GNC وسیله در شرایط واقعی است. در بخش دوم ساختار آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه و اجزای آن ارائه شده است. بخش سوم معرف دینامیک یک رونده زیرآبی است. در بخش چهارم واحد VSSU و شبیه‌سازهای سخت‌افزاری حسگرهای اندازه‌گیری عمق (فشار)، مغناطیس‌سنج، GPS و ژیروسکوب مورد استفاده روی رونده واقعی ارائه شده است. برای تایید بلادرنگ بودن شبیه‌سازی، نتایج حاصل از آزمایشگاه HIL با نتایج خروجی حسگرهای واقعی یک رونده زیرآبی خودگردان در آزمون‌های میدانی مقایسه و در بخش پنجم ارائه شده است.

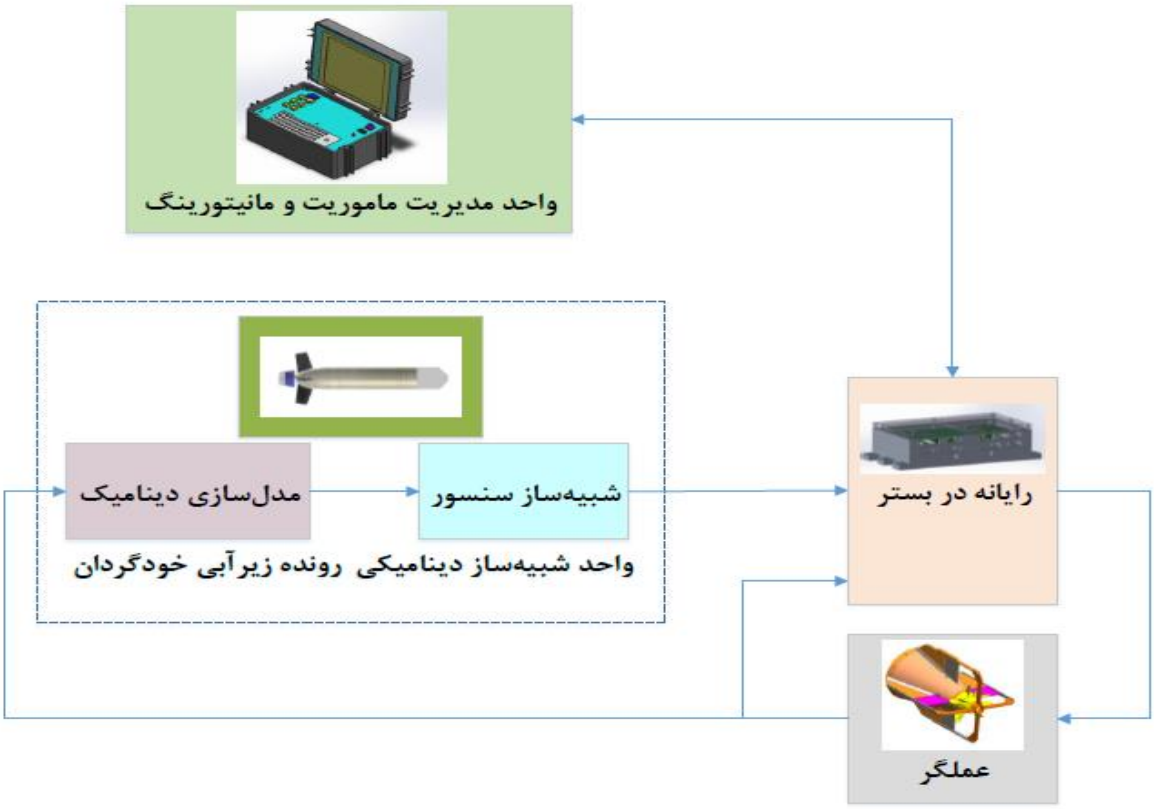
۲-آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده زیرسطحی خودگردان

به دلیل محدودیت‌های فنی، محیطی، مالی، زمانی نمی‌توان آزمون‌های ارزیابی عملکرد بسیاری از سامانه‌ها را بصورت واقعی برگزار و با توجه به ناشناخته‌ها و عدم قطعیت‌های فراوان، در خصوص صحت عملکرد آن اظهار نظر نمود. آزمایشگاه HIL به عنوان یک محیط شبیه‌سازی، امکان بررسی واکنش سامانه به پارامترهای مختلف ورودی، برهم کنش سخت‌افزار و نرم‌افزار، عیب‌یابی سطح سامانه‌ای و زیر-اجزا و طراحی ماموریت را در حضور بخشی یا همه اجزای سامانه فراهم می‌کند.

[1] Online, offline, Hybrid, simulator mode
[2] laboratory Informatics, Robotic, Microelectronic Montpellier
[3] Institute Study System Intelligent per Automation
[4] Control Analysis Simulation Test-bed
[5] Virtual Sensor Simulation Unit
[6] Dynamic Simulation Unit

در شکل (۱) ساختار معمول یک آزمایشگاه HIL ارائه شده است. آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه بطور معمول شامل واحد شبیه‌ساز دینامیکی، واحد شبیه‌ساز حسگر، پردازنده در بستر، عملگرها، واحد کنترل ماموریت[۱] و واحد نمایش[۲] است[۴].

واحد شبیه‌ساز دینامیکی یک مدل ریاضی نسبتا دقیق از رونده زیرآبی خودگردان در قالب معادلات شش درجه آزادی غیرخطی ارائه می‌دهد که با توجه به فرکانس کاری سامانه در هر گام محاسبه می‌شوند. وظیفه واحد شبیه‌ساز حسگر، تولید اطلاعات خروجی حسگرها مطابق با پروتکل ارتباطی و مشخصات فنی آنها مانند نرخ بروزرسانی، تاخیر، نویز، بایاس و ... است، که در واقعیت روی رونده زیرآبی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. براساس نوع طرح‌ریزی آزمایشگاه HIL، واحد شبیه‌ساز حسگر می‌تواند زیرمجموعه‌ای از واحد شبیه‌ساز دینامیکی بوده و یا اینکه دارای ماهیت مستقل باشد و توسط رایانه یا پردازنده دیگر پیاده‌سازی شود. به هرحال ساختار آزمایشگاه HIL به هر گونه‌ای که باشد، وظیفه واحد شبیه‌ساز حسگر، دریافت اطلاعات خام مدل دینامیکی رونده زیرآبی از خروجی معادلات واحد شبیه‌ساز دینامیکی و اعمال مشخصات فنی حسگرها مانند تاخیر، نویز و بایاس مطابق با پروتکل ارتباطی آنها است. رایانه در بستر شامل سخت‌افزار پردازنده، مدارات جانبی و نرم‌افزار در بستر است که با دریافت اطلاعات حسگرها، پردازش‌ها را تحت الگوریتم ناوبری[۳] انجام داده و با توجه به سناریوی ماموریت، فرامین کنترلی را برای هدایت[۴] رونده زیرآبی خودگردان اتخاذ می‌کند. وظیفه عملگر[۵] اجرای فرامین کنترلی برای رونده زیرآبی خودگردان است. وظیفه واحد مدیریت ماموریت برقراری ارتباط با رایانه در بستر، بارگذاری اطلاعات ماموریت و نمایش خروجی حسگرها، زیرسامانه‌ها و ساز و کارها برای برگزاری آزمایش‌های عملکردی پیش از آغاز ماموریت است.



شکل ۱- ساختار آزمایشگاه HIL رونده زیرآبی خودگردان [7]

[1] Management Control Unit
[2] Monitoring Unit
[3] Navigation
[4] Guidance
[5] Actuator

۳- دینامیک رونده زیرآبی خودگردان

مطابق با روش ارائه شده در مرجع [۱و۲]، معادلات حرکت شش درجه آزادی یک AUV با بردارهای زیر قابل تعریف است.

$$\eta=\begin{bmatrix}\eta_1\\ \eta_2\end{bmatrix} \quad \eta_1=\begin{bmatrix}x\\ y\\ z\end{bmatrix} \quad \eta_2=\begin{bmatrix}\phi\\ \theta\\ \psi\end{bmatrix}$$
$$v=\begin{bmatrix}v_1\\ v_2\end{bmatrix} \quad v_1=\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \quad v_2=\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \qquad (۱)$$
$$\tau=\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} \quad \tau_1=\begin{bmatrix}X\\ Y\\ Z\end{bmatrix} \quad \tau_2=\begin{bmatrix}K\\ M\\ N\end{bmatrix}$$

در روابط (۱)، η_1 و η_2 بترتیب معرف موقعیت و زوایای اویلر در دستگاه مختصات اینرسی، v_1 و v_2 بترتیب سرعت خطی و زاویه‌ای در دستگاه بدنی و τ_1 و τ_2 بترتیب نیروها و گشتاورهای واردشونده به AUV است. پارامترهای فوق طبق جدول (۱)، شش درجه آزادی حرکت یک جسم در زیر سطح را نشان می‌دهند.

جدول ۱- شش درجه آزادی حرکت یک جسم

درجه آزادی	حرکت	نیرو و گشتاور	سرعت خطی و زاویه‌ای	موقعیت و زوایای اولر
۱	انتقالی در جهت x	X	U	x
۲	انتقالی در جهت y	Y	V	y
۳	انتقالی در جهت z	Z	W	z
۴	چرخش حول محور x	K	P	φ
۵	چرخش حول محور y	M	Q	θ
۶	چرخش حول محور z	N	R	ψ

این رابطه برای پارامترهای خطی و زاویه‌ای بطور جداگانه نوشته می‌شود [۲].

$$\dot{\eta}_1=J_1(\eta_2)v_1 \qquad \dot{\eta}_2=J_2(\eta_2)v_2 \qquad (۲)$$

ارتباط بین پارامترها در دستگاه‌های اینرسی و بدنی از طریق ماتریس دوران ناشی از سه چرخش به اندازه زوایای اویلر حول محورهای سه‌گانه مطابق با روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شود.

$$J_1(\eta_2)=\begin{bmatrix}\cos\theta\cos\psi & -\sin\psi\cos\phi+\cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi+\cos\psi\cos\phi\sin\theta\\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi+\sin\phi\sin\psi\sin\theta & -\cos\psi\sin\phi+\sin\theta\sin\psi\cos\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

$$J_2(\eta_2)=\begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

خروجی معادلات فوق، مولفه‌های خام دینامیکی رونده اعم از زوایای اویلر، سرعت خطی، سرعت زاویه‌ای و شتاب‌ها در دستگاه‌های مختصات است که به همراه پارامترهای کمکی دیگر مانند موقعیت برای VSSU ارسال می‌شوند. در ادامه ساختار VSSU و شبیه‌سازی هر یک از حسگرها با ویژگی ها و پروتکل‌های ارتباطی منحصربفرد ارائه خواهد شد.

۴- واحد شبیه‌ساز حسگر مجازی

میزهای شبیه‌سازی با درجه آزادی مختلف یا کارت‌های مبدل شبیه‌ساز حسگر ناوبری در قبال افزایش دقت شبیه‌سازی، بار مالی سنگینی را در پیاده‌سازی آزمایشگاه HIL تحمیل می‌کنند. برای کاهش هزینه‌ها می‌توان از شبیه‌سازهای نرم‌افزاری استفاده نمود. وظیفه واحد شبیه‌ساز نرم‌افزاری حسگر مجازی با نام اختصاری VSSU، در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، شبیه‌سازی خروجی حسگر واقعی مورد استفاده در سامانه ناوبری یک AUV است.

واحد VSSU پیشنهادی در این پژوهش، یک برد الکترونیکی با هسته میکروکنترلر ARM بوده که دارای دو مود عملکردی کاملا متفاوت است. در مود عملکردی اول، وظیفه واحد VSSU شبیه‌سازی کاملا نرم‌افزاری سیگنال‌های الکتریکی حسگرهای حلقه ناوبری مانند واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU)[1]، حسگر فشار، گیرنده GPS، حسگر مغناطیس‌سنج، و حسگر سرعت با لحاظ کردن ویژگی‌های

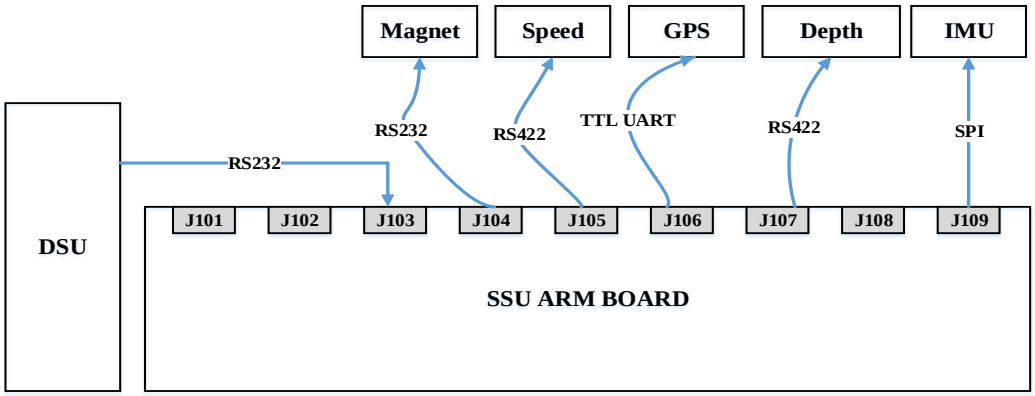
[1] Inertial Measurement Unit

فنی و پروتکل‌های ارتباطی هر یک از آنها است. هر یک از این حسگرها وظیفه اندازه‌گیری یک یا چند پارامتر فیزیکی را برعهده دارند. حسگر ناوبری اینرسی برای اندازه‌گیری نرخ‌های زاویه‌ای و شتاب‌ها، حسگر فشار برای اندازه‌گیری عمق از سطح، گیرنده GPS برای تعیین مختصات جغرافیایی، حسگر مغناطیس‌سنج برای تعیین موقعیت مکانی و حسگر سرعت برای اندازه‌گیری سرعت طولی مورد استفاده قرار می‌گیرند. واحد VSSU پیشنهادی، کمیت‌های موردنیاز و کاربردی هر یک از حسگرها را بر اساس پروتکل سریال RS232 از رایانه واحد شبیه‌ساز دینامیکی دریافت می‌کند و در پورت‌های خروجی خود سیگنال‌های الکتریکی حاوی این کمیت‌ها را متناسب با هر حسگر تولید می‌کند. سیگنال‌های مجازی تولیدی نیز در نهایت توسط رایانه شناوری AUV برای مقاصد هدایت، ناوبری و کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مود عملکردی دوم برای واحد VSSU زمانی قابل بهره برداری است که از واحدهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری و حسگرهای واقعی در ساختار آزمایشگاه HIL استفاده شده است. در این وضعیت واحد VSSU به عنوان واسطه، وظیفه برقراری ارتباط بین رایانه شبیه‌ساز دینامیکی و واحدهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری را برعهده دارد. واحدهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری، شرایط را برای تولید سیگنال حسگرهای واقعی مورد استفاده در AUV فراهم می‌آورند که در نهایت توسط رایانه شناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۲) نمایی از واحد VSSU توسعه داده شده با خروجی‌های مجزا قابل مشاهده است.

شکل ۲- واحد شبیه‌ساز نرم‌افزاری حسگر مجازی

نمودار بلوکی عملکردی شبیه‌ساز حسگر مجازی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار بلوکی عملکردی شبیه‌ساز حسگر مجازی

یکی از اهداف محققان در حوزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی، شباهت هر چه بیشتر آزمایشگاه به محیط واقعی است. بنابراین همواره تلاش‌ها در جهت وارد کردن سیستم‌ها، حسگرها و تجهیزات واقعی به حلقه شبیه‌سازی در آزمایشگاه HIL بوده است. هدف از این پژوهش نیز توسعه آزمایشگاه HIL رونده زیرآبی خودگردان با شبیه‌سازهای سخت‌افزاری حسگرهای مورد استفاده در شرایط واقعی مانند حسگر فشار، گیرنده GPS، مغناطیس‌سنج، حسگر سرعت و ژیروسکوب است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۴-۱- شبیه‌ساز حسگر عمق

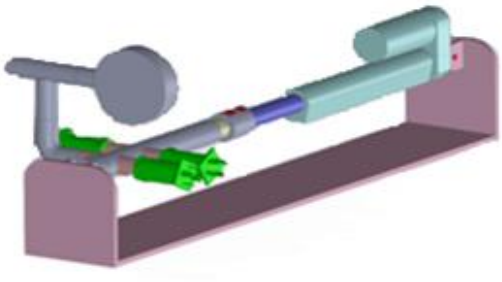
برای طراحی شبیه‌ساز مجازی حسگر عمق[1] ابتدا باید ورودی‌های طراحی را شناخت. حسگر اندازه‌گیر عمق از نوع حسگر فشار (دیافراگم سرامیکی) آنالوگ است. (شکل ۴)

شکل۴- حسگر فشار (دیافراگم سرامیکی) آنالوگ جریانی [7]

[1] Depth Sensor Simulator

هنگامی‌که این حسگر روی بدنه رونده زیرآبی نصب می گردد، فشار ناشی از ارتفاع سیال آب بالای محل نصب حسگر را اندازه می‌گیرد. اگر بخواهیم آنچه را که در واقعیت رخ می‌دهد برای آزمایشگاه HIL پیاده‌سازی کنیم، با توجه به عمق حرکتی رونده، به یک استخر یا مخزن بزرگ با ارتفاع زیاد نیاز خواهیم داشت که برای آزمایشگاه HIL با توجه به فضای محدود آن امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین باید روش را تغییر داد، یعنی ساز و کاری را طراحی نمود که بتواند برای فضای داخلی یک مخزن فشار تولید کند و حسگر، فشار وارده بر جداره داخلی مخزن را اندازه‌گیری کند. با این شیوه می‌توان ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق را با ابعاد کوچکتر و هزینه بسیار کمتر برای تجهیز آزمایشگاه HIL طراحی و پیاده‌سازی کرد.

برای ایجاد فشار داخل یک مخزن می‌توان از ساختار سیلندر و پیستون خودرو الگوبرداری کرد. مخزن همانند سیلندر حاوی سیال مرکب هوا و آب است که پیستون با حرکت رفت و برگشتی در آن حالت انبساط و انقباض فشار را ایجاد می‌کند. برای ایجاد حرکت رفت و برگشتی پیستون با طول کورس معین می‌توان از جک الکتریکی خطی استفاده نمود. ساختار ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق در شکل (۵) قابل مشاهده است.

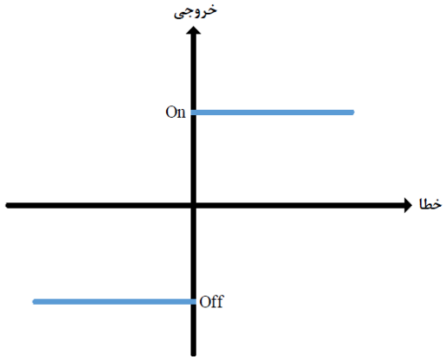


شکل۵- ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق [7]

روی سیلندر چهار دریچه برای نصب انواع حسگر فشار در نظر گرفته شده است. برای ثابت کردن ساز و کار و پیشگیری از حرکت‌های جانبی، مجموعه چک، پیستون و سیلندر با استفاده از پیچ‌های نگهدارنده در قاب فلزی قرار داده می‌شود. با استفاده از ساز و کار فوق می‌توان حسگر فشار واقعی را بطور مستقیم به حلقه آزمایشگاه HIL وارد نمود. نمودار بلوکی آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز محیطی عمق در شکل (۶) ارائه شده است. شبیه‌ساز محیطی عمق وظیفه دارد فشار متناسب با عمق خروجی از معادلات دینامیکی شش درجه آزادی را در هر لحظه برای حسگر فشار نصب شده روی سیلندر (رونده زیرآبی) ایجاد نماید. برای شبیه‌سازی شرایط محیطی عمق، ابتدا مقدار عمق با توجه به فرکانس پیاده‌سازی معادلات در واحد شبیه‌ساز دینامیکی محاسبه و برای پردازشگر شبیه‌ساز محیطی عمق ارسال می‌شود. پردازشگر شبیه‌ساز محیطی عمق با توجه به اختلاف جبری بین عمق اندازه‌گیری شده از حسگر مرجع و مقدار دینامیکی عمق، سیگنال PWM مناسب را برای کنترل جک الکتریکی تولید می‌کند تا خطای شبیه‌ساز محیطی عمق را به کمینه برساند. جابجایی پیستون ناشی از حرکت بازوی جک الکتریکی منجر به تغییر فشار در محفظه سیلندر می‌شود. رایانه شناوری از طریق حسگری که روی بدنه سیلندر نصب است، مقدار فشار را قرائت کرده و در الگوریتم هدایت، ناوبری و کنترل از آن استفاده می‌کند. این روال در هر سیکل اجرای نرم‌افزار بصورت بلادرنگ انجام می‌شود. برای دستیابی به اهداف فوق، پردازنده شبیه‌ساز محیطی عمق از میکروکنترلر با هسته ARM انتخاب شده است.

در شکل (۷) نمایی از ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق به همراه میکروکنترلر آن قابل مشاهده است.

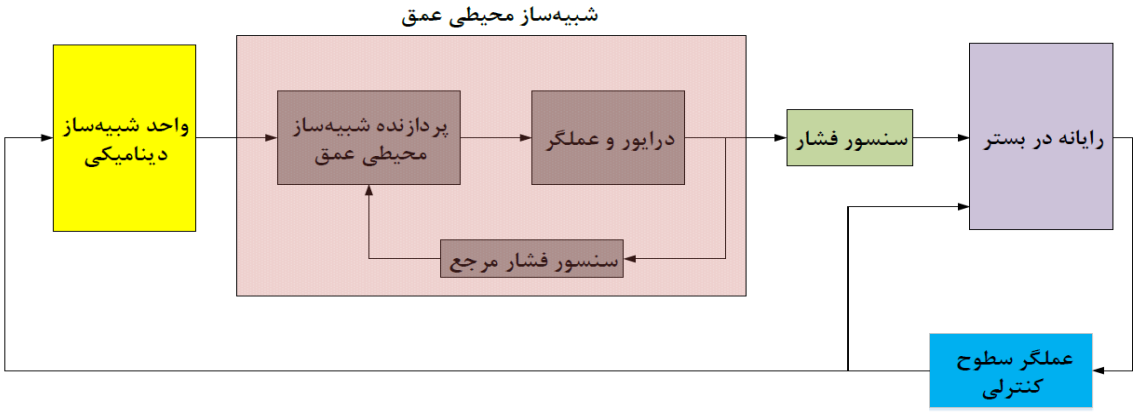
شکل۷- ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق [7]



شکل۸- نمودار عمکردی کنترل‌کننده On/Off [7]

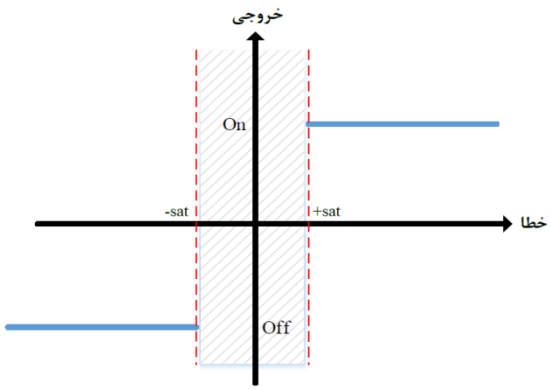
وظیفه میکروکنترلر، روشن و خاموش کردن جک الکتریکی

است. یکی از ساده‌ترین روش‌های کنترلی قابل پیاده‌سازی روی ساز و کار شبیه‌ساز، روش کنترل دو وضعیتی On/Off است. در این حالت خروجی کنترل‌کننده برحسب مقدار ورودی که معمولا خطاست، تنها در دو حالت خاموش و روشن می‌تواند قرار بگیرد. نمودار ۸ بیانگر رفتار این کنترل-کننده است.



شکل ۶- نمودار بلوکی آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز محیطی عمق[7]

با تعریف یک آستانه مشخص (باند معینی از خطا بین فشار قرائت شده از حسگر مرجع و حسگر نوعی مورد استفاده در رونده)، می‌توان از کارکرد زیاد عملگر در ساز و کار شبیه‌ساز محیطی عمق کاست بطوریکه در صحت عملکرد شبیه‌ساز محیطی برای تولید عمق مربوطه خللی وارد نشود. در نتیجه نمودار عملکردی کنترل‌کننده به صورت شکل (۹) قابل تعریف خواهد بود.



شکل۹- نمودار عمکردی کنترل‌کننده On/Off با سطح اشباع [7]

۴-۲- شبیه‌ساز حسگر موقعیت‌یاب جهانی

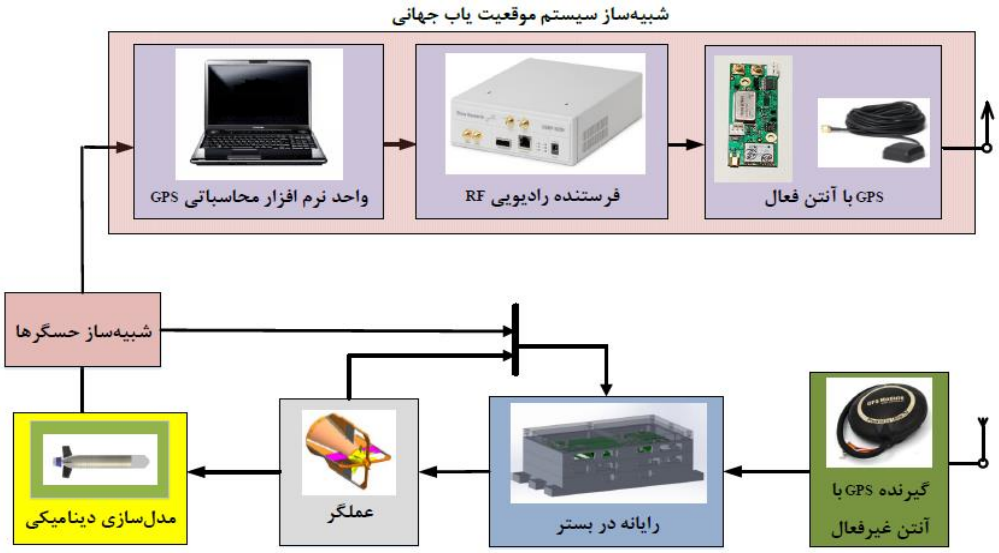
کاربرد حسگر موقعیت‌یاب جهانی[1] برای هنگامی‌که رونده زیرآبی خودگردان روی سطح آب قرار می‌گیرد، بسیار حیاتی است زیرا با استفاده از اطلاعات سامانه مرجع موقعیت‌یاب جهانی می‌تواند موقعیت دقیق خود را تعیین و برای مقاصد ناوبری مورد استفاده قرار دهد. حسگرهای موقعیت‌یاب جهانی با توجه به پیکره‌بندی و نوع آنتن قادر خواهند بود اطلاعات یک یا چند سامانه موقعیت‌یابی را مانند GPS، GLONASS، Galileo و ... را به صورت منفرد یا تلفیقی دریافت نمایند. گیرنده‌های GPS اطلاعاتی از قبیل طول و عرض جغرافیایی، سرعت و سمت حرکت و ... را در کنار اطلاعات سامانه‌ای خود مانند ساعت، تعداد ماهواره‌های شناسایی شده در منطقه، معتبر بودن اطلاعات و پارامترهای دیگر را در اختیار کاربر قرار می‌دهند.

وظیفه واحد شبیه‌ساز GPS، بازتولید و انتشار سیگنال ماهواره‌های مجازی در محیط است. در شکل (۱۰) ساختار آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز حسگر GPS ارائه شده است.

شبیه‌ساز حسگر GPS از سه بخش تشکیل شده است. وظیفه واحد نرم‌افزار محاسباتی GPS، شبیه‌سازی ماهواره های مجازی حاضر در فضای منطقه، انجام محاسبات برای سنکرون‌سازی ماهواره‌ها، محاسبات هندسی برای موقعیت‌دهی و ایجاد تاخیرهای مناسب برای ارسال سیگنال‌های رادیویی با توجه به فاصله مجازی نسبت به گیرنده است. این فرآیند با دریافت بسته اطلاعات قراردادی از واحد شبیه‌ساز دینامیکی آغاز می‌شود. پارامترهای اساسی موردنیاز برای انجام محاسبات، مولفه های سرعت در دستگاه مختصات جغرافیایی (V_N,V_E,V_D) است که با مشتق‌گیری از مولفه‌های موقعیت (X,Y,Z) در راستای محورهای سه‌گانه حاصله از

[1] Global Positioning System

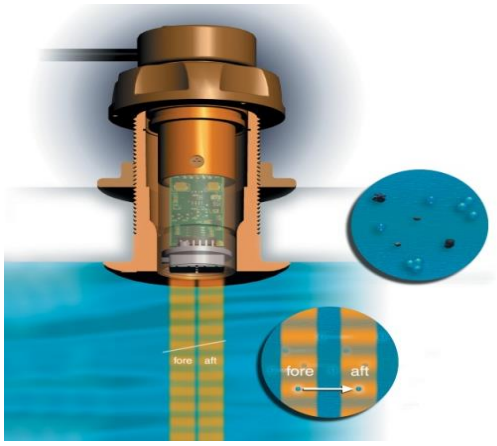
معادلات دینامیکی بدست می‌آید. سیگنال ماهواره‌های مجازی با تاخیر زمانی مشخص برای ارسال به واحد فرستنده رادیویی RF داده می‌شود. برای انتشار سیگنال رادیویی در محیط از یک آنتن فعال GPS استفاده خواهد شد. با انتشار سیگنال رادیویی ماهواره‌ها در محیط، هر گیرنده GPS حاضر در این فضا قادر به دریافت اطلاعات ماهواره‌های مجازی و انجام محاسبات برای استخراج موقعیت خواهد بود. مسئله حائز اهمیت برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، حفظ ویژگی بلادرنگی آن است. بنابراین تاخیر شبیه‌ساز GPS برای دریافت اطلاعات، انجام محاسبات و ارسال سیگنال نباید اختلالی در محاسبات حلقه بسته آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه ایجاد کند. در اکثر گیرنده‌های تجاری، کاربر قادر است تا فرکانس ۲۰ هرتز (هر ۰.۰۵ ثانیه) اطلاعات را از گیرنده دریافت کند ولی مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که نرخ انجام محاسبات و بروزرسانی مختصات ۱ الی ۲ هرتز (۰.۵ الی ۱ ثانیه) است. بنابراین با انتخاب فرکانس ۲۰ هرتز، گیرنده اطلاعات تکراری زیادی را بدون بروزرسانی مختصات برای کاربر ارسال می‌کند. این مسئله بدان معناست که تاخیر ۰.۵ الی ۱ ثانیه‌ای شبیه‌ساز GPS در عملکرد آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه اختلالی ایجاد نخواهد کرد.



شکل ۱۰- ساختار آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز حسگر GPS

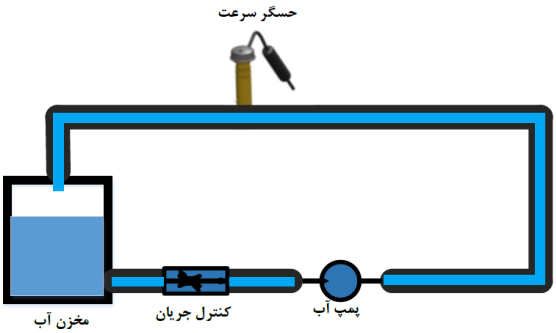
۴-۳- شبیه‌ساز حسگر سرعت

اندازه‌گیری سرعت محوری در AUV توسط حسگر التراسونیک[1] انجام می‌گیرد. فرآیند اندازه‌گیری سرعت براساس اندازه‌گیری بازه زمانی بین ارسال صوت و دریافت انعکاس آن از محیط بنا شده است. در شکل (۱۱) نمایی از این حسگر و عملکرد ان قابل مشاهده است. حسگر سرعت بصورت عمود بر بدنه AUV نصب شده بطوریکه سر حساس آن مماس با سطح بدنه خارجی و در تماس مستقیم با آب قرار داشته باشد. با حرکت رونده به سمت جلو، آب از روی سطح رونده و به تبع آن از روی بخش حساس حسگر سر می‌خورد. با توجه به این فرآیند، برای پیاده‌سازی شبیه‌ساز حسگر سرعت باید شرایط مشابهی را فراهم نمود. طرح پیشنهادی برای ساز و کار شبیه‌ساز حسگر سرعت، در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- عملکرد حسگر سرعت

[1] Ultrasonic



شکل۱۲- ساز و کار شبیه‌ساز محیطی حسگر سرعت

ساز و کار شامل یک مخزن ذخیره آب، واحد کنترل دبی جریان، پمپ آب و یک مسیر لوله‌کشی حلقه بسته است. کنترل جریان آب توسط واحد پردازنده شبیه‌ساز حسگر سرعت انجام می‌شود. واحد پردازنده شبیه‌ساز حسگر سرعت مقدار سرعت راستای طولی رونده (U) استخراج شده از واحد DSU را دریافت کرده و با توجه به جدول تجربی، میزان جریان آب را تعیین و کنترل می‌کند. حسگر سرعت نصب شده روی لوله، عبور جریان را حس و سرعت عبور سیال از مقابل صفحه حساس خود را اندازه‌گیری می کند. در شکل (۱۳) نمایی از ساز و کار شبیه‌ساز حسگر سرعت به همراه واحد پردازنده آن قابل مشاهده است.

شکل۱۳- ساز و کار شبیه‌ساز حسگر سرعت

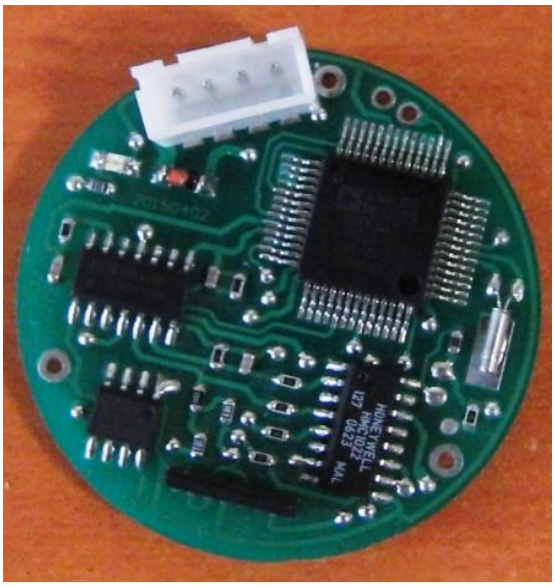
۴-۴- شبیه‌ساز حسگر اینرسی

برای شبیه‌سازی شتاب‌ها و نرخ‌های زاویه‌ای از میزهای شبیه‌سازی در مدل‌های تک، دو و سه محوره با دقت متنوع موجود در بازار می‌توان استفاده نمود. میز شبیه‌ساز مقادیر نرخ‌های زاویه‌ای و زوایای حرکتی وسیله را که توسط رایانه شبیه‌ساز دینامیکی محاسبه می‌شود، تولید می‌کند. حسگر اینرسی که بر روی میز قرار دارد، مقادیر نرخ زاویه‌ای و شتاب‌ها را در راستای سه محور حس می‌کند. خروجی حسگر اینرسی توسط رایانه شناوری قرائت شده و در الگوریتم ناوبری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۱۴) نمونه‌ای از میز سه محوره قابل مشاهده است.

شکل ۱۴- میز شبیه‌سازی سه درجه آزادی

۵-۴- شبیه‌ساز حسگر مغناطیس‌سنج

حسگرهای مغناطیسی[1] برای درک میدان مغناطیسی طراحی شده و برای مصارفی مانند قطب‌نما، سامانه‌های ناوبری، سنجش مغناطیسی کاربرد دارند. در شکل (۱۵) نمایی از ماژول حسگر مغناطیس نشان داده شده است.

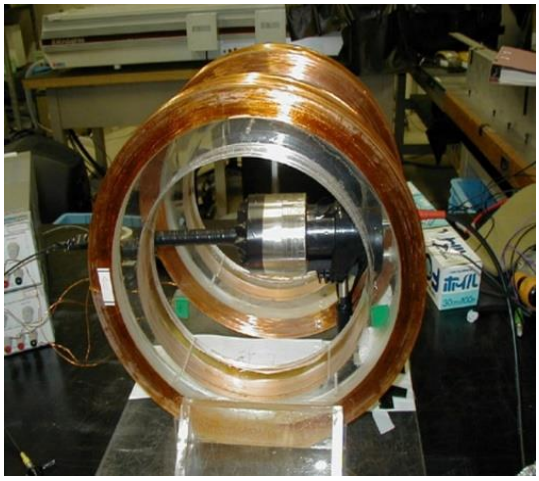


شکل ۱۵- ماژول حسگر مغناطیس

هر نقطه از کره زمین در دستگاه مختصات جغرافیایی دارای ۳ مولفه مغناطیسی (M_N,M_E,M_D) است که می‌توان آنها را با توجه به طول و عرض جغرافیایی از روی مدل مرجع

[1] Magnetic Sensor

مغناطیسی کره زمین استخراج نمود. مولفه‌های مغناطیسی در دستگاه مختصات جغرافیایی با استفاده از ماتریس انتقال قابل انتقال به دستگاه مختصات بدنی با مولفه‌های (M_x,M_y,M_z) است. در شبیه‌ساز مغناطیس، بردار مغناطیسی زمین با استفاده از سیم‌پیچ‌های چندگانه شبیه سازی می‌شود. حسگر مغناطیس در وسط چمبر مغناطیسی قرار داده می‌شود. در شکل (۱۶) نمایی واحد شبیه‌ساز بردار مغناطیسی زمین مبتنی بر سیم‌پیچ هلمهولتز[1] قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- واحد شبیه‌ساز حسگر مغناطیس (چمبر یا سیم‌پیچ مغناطیس هلمهولتز)

۵- آزمون ارزیابی

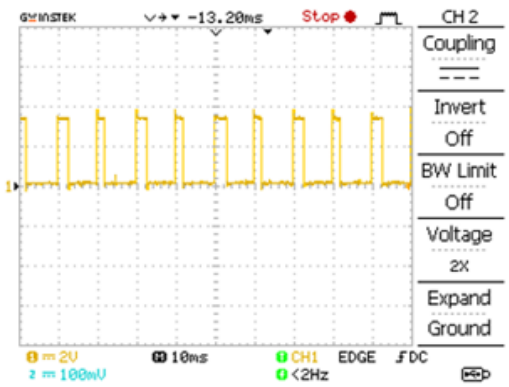
مجموعه تجمیع‌یافته آزمایشگاه HIL یک رونده زیرآبی خودگردان متشکل از واحد شبیه‌ساز دینامیکی، واحد تغذیه و تامین توان، رایانه شناوری دربستر، شبیه‌ساز سطوح کنترلی، واحد شبیه‌ساز مجازی و انواع شبیه‌سازهای سخت‌افزاری حسگرهای مورد اشاره فوق در نمودار (۱۷) قابل مشاهده است که هدف آن شبیه‌سازی سناریوی ماموریتی AUV پیش از برگزاری آزمون‌های میدانی واقعی به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد کلیه زیرسیستم‌ها و احیانا عیب‌یابی آنها است. تایید صحت عملکرد VSSU و شبیه‌سازهای سخت‌افزاری حسگرها در بطن آزمایشگاه HIL، از دو جنبه قابل ارزیابی است. جنبه اول بررسی بلادرنگ بودن عملکرد VSSU و شبیه‌سازهای سخت-افزاری است. با توجه به فرکانس شبیه‌سازی، فرآیند اجرای شبیه‌سازی دینامیکی، اخذ اطلاعات توسط واحد VSSU، تولید سیگنال توسط شبیه‌سازهای سخت‌افزاری و دریافت اطلاعات توسط رایانه شاوری در یک سیکل باید کمتر از ۱۰ میلی ثانیه باشد.

برای بررسی بلادرنگی اجرای شبیه‌سازی یکی از پایه‌های پردازنده ARM رایانه شناوری به عنوان خروجی دیجیتال پیکره‌بندی شده بطوریکه با شروع اجرای هر سیکل، با یک منطقی (ولتاژ ۳.۳ ولت) مقداردهی می‌شود و در انتهای سیکل مقدار صفر منطقی به خود می‌گیرد. به این ترتیب با اجرای برنامه یک پالس مربعی تولید می‌شود که با یک مرجع بیرونی مانند اسیلوسکوب قابل مشاهده است. برای بلادرنگ بودن، مدت زمان بالا بودن[2] (یا همان یک بودن) این پالس که نشانگر زمان اجرای توابع هر سیکل است، در سراسر بازه شبیه‌سازی باید کمتر از ۱۰ میلی ثانیه باشد. در نمودار (۱۸) پالس مربعی ناشی از اجرای هر سیکل شبیه‌سازی آزمایشگاه HIL قابل مشاهده است.

شکل ۱۷- مجموعه تجمیع‌یافته آزمایشگاه HIL یک رونده زیرآبی خودگردان

[1] Helmholtz Coil

[2] High Level



شکل ۱۸- نمودار زمانی اجرای توابع هرسیکل شبیه‌سازی

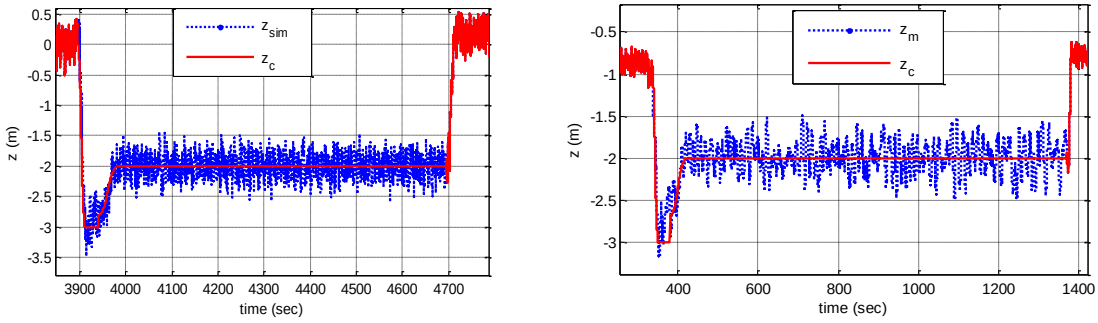
گام دوم برای تایید صحت عملکرد واحد شبیه‌ساز حسگر مجازی و شبیه‌سازهای سخت‌افزاری، مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش واقعی رونده در دریا است. به همین منظور یک سناریوی غوص و صعود برای رونده زیرآبی خودگردان تعریف شده است. در نمودارهای ۱۹ بترتیب نتایج حاصل از انجام آزمایش میدانی و شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه ارائه شده است. زاویه سمت شبیه‌سازی شده نسبت به شمال جغرافیایی و زاویه سمت اندازه‌گیری شده از GPS در آزمون واقعی دریایی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. با توجه به سناریو غوص و صعود، هنگامی‌که رونده در زیرسطح در حال حرکت است، به دلیل قطع بودن سیگنال GPS، کلیه پارامترهای مربوط به GPS مقدار صفر خواهند داشت. این مسئله در نمودار (۲۰) قابل مشاهده است.

مولفه‌های مغناطیسی تولید شده توسط شبیه‌ساز حسگر مغناطیسی و اندازه‌گیری شده در آزمون واقعی دریا در نمودار (۲۱) ارائه شده است.

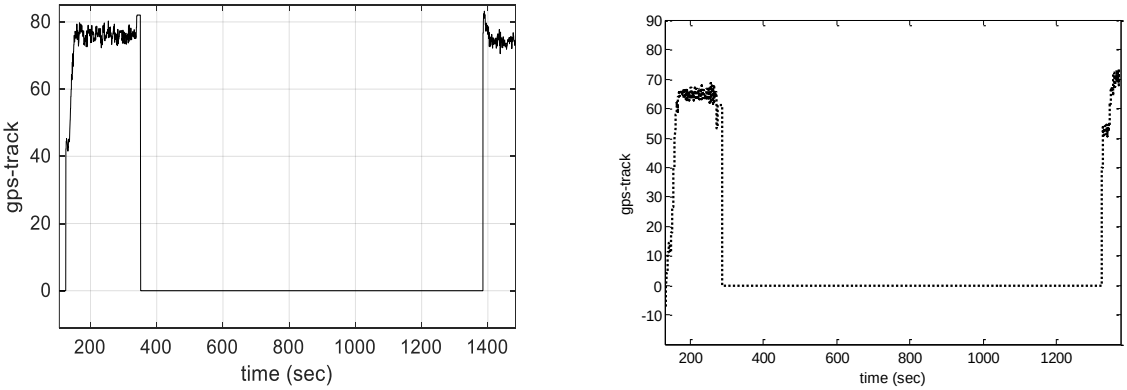
در نمودارهای (۲۲) و (۲۳) بترتیب مولفه‌های شتاب و نرخ های زاویه‌ای شبیه‌سازی شده توسط واحد شبیه‌ساز حسگر IMU و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمون میدانی ارائه شده است.

در نمودار (۲۴) سرعت طولی شبیه‌سازی شده توسط واحد شبیه‌ساز حسگر سرعت و سرعت طولی اندازه‌گیری شده در آزمون دریایی ارائه شده است

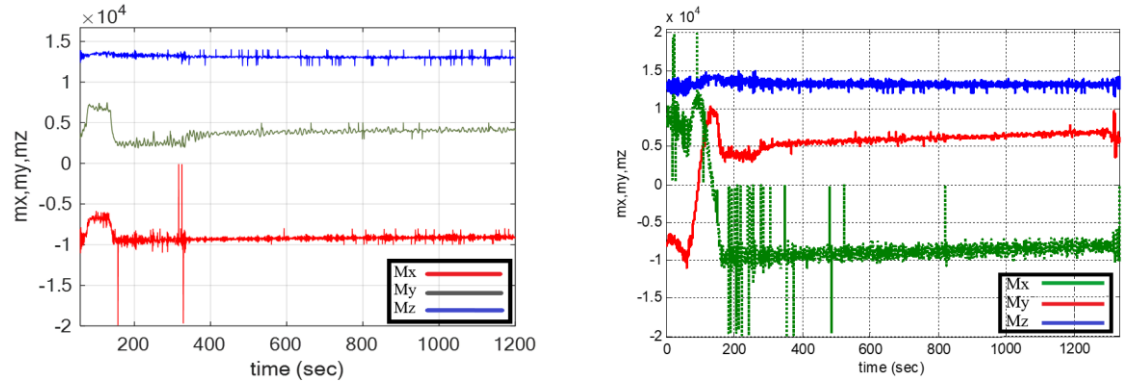
.



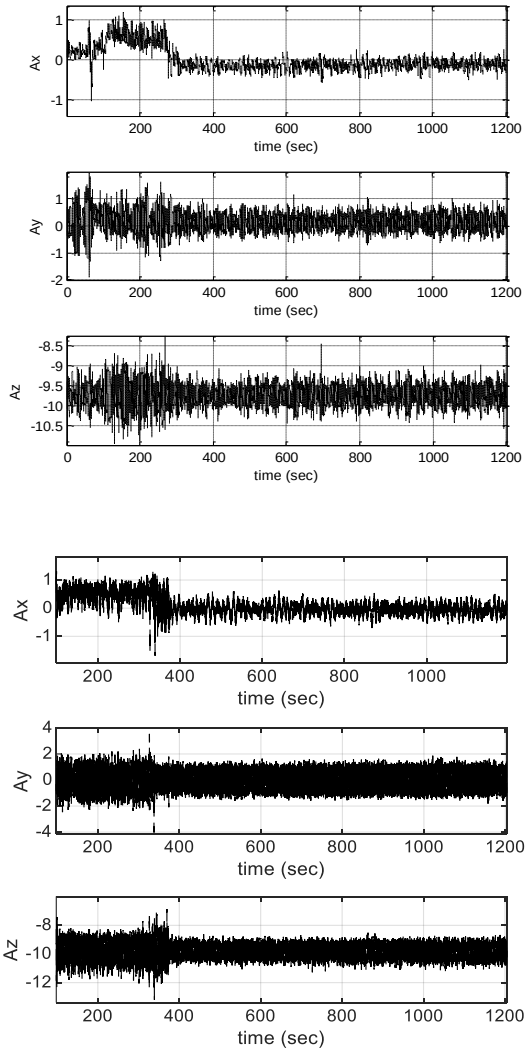
شکل۱۹- عمق شبیه‌سازی شده توسط ساز و کار شبیه‌ساز عمق (راست) و عمق اندازه‌گیری شده از حسگر فشار در آزمون دریایی (چپ)
(خط قرمز پیوسته: سیگنال فرمان عمق و خط آبی نقطه‌چین: عمق شبیه‌سازی شده و عمق اندازه گیری شده واقعی)



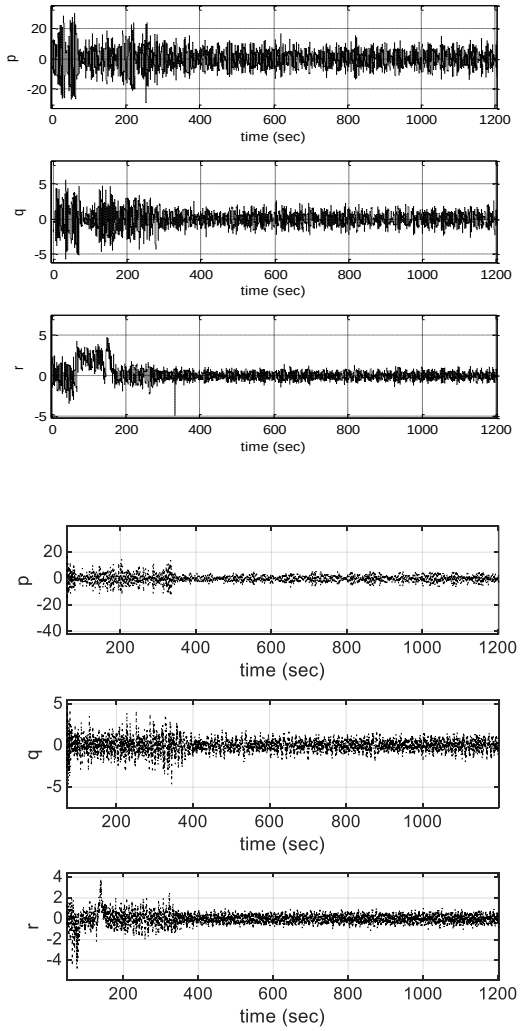
شکل ۲۰- شبیه‌سازی زاویه سمت نسبت به شمال جغرافیایی (راست) و زاویه سمت اندازه‌گیری شده از GPS در آزمون واقعی دریایی (چپ)



شکل ۲۱- شبیه‌سازی مولفه‌های میدان مغناطیسی (راست) و مولفه‌های میدان مغناطیسی در آزمون واقعی دریا (چپ)



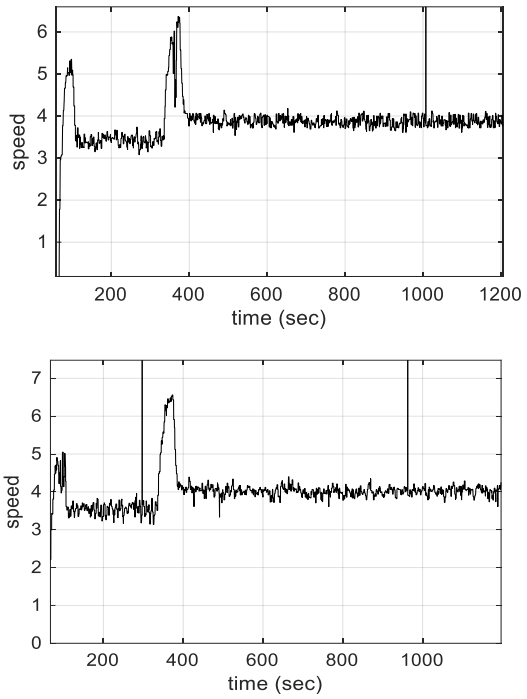
شکل ۲۲- شبیه‌سازی مولفه‌های شتاب (راست)، مولفه‌های شتاب در آزمون واقعی (چپ)



شکل ۲۳- شبیه‌سازی مولفه‌های نرخ زاویه‌ای (راست)، مولفه‌های نرخ زاویه‌ای در آزمون واقعی (چپ)

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق طراحی و پیاده‌سازی ساز و کار شبیه‌ساز حسگر مجازی در بستر دینامیک شش درجه آزادی یک رونده زیرآبی خودگردان بصورت بلادرنگ انجام پذیرفته است و صحت عملکرد آن در آزمایشگاه HIL و در قیاس با آزمون میدانی تایید شده است. این کار ارائه‌دهنده روشی برای توسعه و ارتقای آزمایشگاه HIL یک رونده زیرآبی خودگردان با رعایت همه الزامات آن است. نتایج تجربی بیانگر تطبیق عملکرد رونده زیرآبی خودگردان در اجرای مانورها با نتایج خروجی از شبیه‌سازی‌ها است. واحد شبیه ساز حسگر مجازی با ساختار تجمیع‌یافته، قابلیت افزودن راحت به آزمایشگاه HIL را داشته و منجر به کاهش هزینه‌ها، افزایش دقت و سرعت پیاده‌سازی آزمایشگاه HIL می‌شود.



شکل ۲۴- شبیه‌سازی سرعت طولی (راست)، اندازه‌گیری سرعت طولی در آزمون واقعی (چپ)

۶- مراجع

[1] J.L.D. Dantas, and E.A. Barros. "A real-time simulator for AUV development." *In ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. 4, pp. 538-549. 2010.

[2] F. Song, P.E. An, and A. Folleco. "Modeling and simulation of autonomous underwater vehicles: design and implementation." *IEEE journal of Oceanic Engineering* 28, no. 2 (2003): 283-296.

[3] D. Gračanin, K.P. Valavanis, and M. Matijašević. "Virtual environment testbed for autonomous underwater vehicles." *Control Engineering Practice* 6, no. 5 (1998): 653-660.

[4] D. Bao, R. Yang, Y. Ma, B. Clement, A. Mansour, D. Hou, and M. Li. "Hardware-in-the-loop simulation applied to auv control." *In 2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 1009-1013. IEEE, 2018.

[5] O. Parodi, L. Lapierre, and B. Jouvencel. "Hardware-in-the-loop simulators for multi-vehicles scenarios: survey on existing solutions and proposal of a new architecture." *In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 225-230. IEEE, 2009.

[6] R.P. Kornfeld, R. Prakash, A.S. Devereaux, M.E. Greco, C.C. Harmon, and D.M. Kipp. "Verification and validation of the Mars Science Laboratory/Curiosity rover entry, descent, and landing system." *Journal of Spacecraft and Rockets* 51, no. 4 (2014): 1251-1269.

[7] S.V. Zia, J. Babei, G. Nadalinia Chare, M. Alizadeh. "design and implementation of depth environmental simulator for hardware in the loop laboratory of autonomous underwater vehicle." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 65 (2021): 41-52. (in Persian)

[8] S. Louis, D. Andreu, K.G. Dejean, and L. Lapierre. "HIL Simulator for AUV with ContrACT." *Control Architectures of Robots* (2015).

[9] D.P. Brutzman, Y. Kanayama, and M.J. Zyda. "Integrated simulation for rapid development of autonomous underwater vehicles." *In Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 3-10. IEEE, 1992.

[10] H.C. Brown, A. Kim, and R.M. Eustice. "An overview of autonomous underwater vehicle research and testbed at PeRL." *Marine Technology Society Journal* 43, no. 2 (2009): 33-47.

[11] J.Y. Park, B.H. Jun, P.M. Lee, and J. Oh. "Development of test-bed AUV ISiMI and underwater experiments on free running and vision guided docking." *Underwater Vehicles* (2009): 371.

[12] A. Vasilijevic, B. Borovic, and Z. Vukic. "Underwater vehicle localization with complementary filter: Performance analysis in the shallow water environment." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 68 (2012): 373-386.