

طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز محیطی عمق برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده خودکار زیر آبی

سیدوحید ضیاء^{۱*}، جواد بابایی سوتنه^۲، غلامرضا نادعلی نیاچاری^۳ و میثم علیزاده^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶	
واژگان کلیدی: آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، رونده زیر آبی خودگردان، شبیه‌ساز محیطی عمق، شبیه‌سازی بلادرنگ، کنترل‌کننده دو وضعیتی.	توانایی‌های بالقوه رونده‌های زیر آبی خودگردان در مقایسه با ابزارهای سنتی، منجر به افزایش توجه به آنها در حوزه‌های گوناگون تجاری، نظامی و تحقیقاتی شده است. ساخت و توسعه یک نمونه عملیاتی قابل اطمینان در حوزه دریایی نیاز به طراحی یک سامانه کامل و گران‌قیمت آزمایشگاه دریایی دارد، تا با استفاده از آن بتوان عملکرد سامانه یکپارچه و زیر سامانه‌های آن را مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار داد. مدل‌سازی می‌تواند یک ابزار مقرون به صرفه برای انجام آزمایشات به منظور تأیید و تصدیق عملکرد سخت‌افزار و نرم‌افزار، اجرای مأموریت و در نتیجه کاهش خطاهای بالقوه در مأموریت‌های دریایی باشد. این اهداف از طریق یک شبیه‌سازی نسبتاً دقیق دینامیکی و مدل‌سازی تجهیزات و شرایط محیطی در قالب آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه قابل دستیابی است. هدف این مقاله مدل‌سازی زمان حقیقی و ساخت شبیه‌ساز محیطی عمق مبتنی بر فیزیک یک رونده زیر آبی خودگردان برای تجهیز آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه است. صحت‌سنجی عملکرد مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق در بستر دینامیک شش درجه آزادی یک رونده زیر آبی خودگردان بصورت بلادرنگ انجام پذیرفته است. نتایج بیانگر تطبیق خروجی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق با عمق اندازه‌گیری شده از آزمایش میدانی در دریا و عدم وجود تاخیر و بایاس بین سیگنال واقعی و شبیه‌سازی شده است.

۱- مقدمه

رونده زیر آبی خودگردان، یک وسیله بدون سرنشین بوده که منبع توان خود را حمل می‌کند و برای اجرای یک مأموریت به رایانه در بستر خود تکیه کرده و برخلاف یک رونده کنترل از راه دور زیر آبی، برای ناوبری به پشتیبانی کاربر انسانی نیاز نداشته و از اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرهای مختلف و الگوریتم‌های هدایت، ناوبری و کنترل

استفاده می‌کند. بنابراین حوزه‌های توان، هدایت، ناوبری، کنترل و مدیریت مأموریت سه حوزه حیاتی از نظر تکنولوژیکی برای رونده‌های زیر آبی خودگردان محسوب می‌شوند که باعث خواهد شد محدودیت‌های تحلیلی روی طراحی آنها بسیار سخت‌گیرانه‌تر از رونده‌های کنترل از راه دور باشد. بدون هرگونه وابستگی به انسان، رونده‌های زیر آبی خودگردان باید بتوانند مأموریت‌های پیچیده را

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zia_vahid_amol@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد سیستم هدایت و کنترل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

۲. کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

۳. کارشناسی ارشد مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

۴. کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را به آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه^۲ افزود. آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه 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. بنابراین هدف مدل‌سازی و شبیه‌سازی، ارتقای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با سامانه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری واقعی رونده و انطباق آن با شرایط واقعی است [۲۱].

صحت عملکرد تجهیزات سخت‌افزاری مانند حسگرها و مباحث الگوریتمی برای هدایت، ناوبری و کنترل رونده‌های زیرآبی خودگردان بسیار حیاتی است. تصدیق عملکرد صحیح هریک از آنها به تنهایی و در برهم‌کنش با یکدیگر به آزمایش و مانیتورینگ زمان واقعی^۳ نیاز دارد که در بستر یک میز شبیه‌سازی خوب در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه قابل دستیابی است. به عبارت دیگر وظیفه میز شبیه‌سازی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، ایجاد محیط مجازی برای ارزیابی عملکرد زیرسیستم‌های رونده است. میز شبیه‌سازی باید محیط زیر آب و خود رونده را به دقت مدل‌سازی کند و برای مقایسه و تحلیل، نتایج آن با اندازه‌گیری‌های واقعی مطابقت داشته باشد. میز شبیه‌ساز دقیق با ایجاد بستر مناسب برای تصدیق مباحث سیستمی و معماری کنترلی می‌تواند مرجع مناسبی برای حل گلوگاه‌های حیاتی در طراحی و توسعه رونده‌های زیرآبی خودگردان باشد [۳].

در مرجع [۱] شبیه‌سازی و مدل‌سازی از رونده اقیانوس-شناسی ارائه شده است. در این مرجع 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 سخت‌افزار در حلقه روی Linux ارائه شده است. در مرجع [۲] ابزار Thetis برای شبیه‌سازی مأموریت دریایی ارائه شده است. این ابزار یک شبیه‌ساز زمان حقیقی مرکب از چندین وسیله ناهمگن با مأموریت کاوش و جمع‌آوری اطلاعات در مقیاس مختلف با حسگرهای چندگانه از محیط زیرآبی است. در این پژوهش با توجه به بکارگیری چندین وسیله ناهمگن، روش طبقه‌بندی جدیدی از عوامل موثر در شبیه‌سازی مأموریت ارائه شده است. در روش طبقه‌بندی پیشنهادی

بدرستی اجرا کنند. بنابراین برای انجام موفقیت‌آمیز مأموریت‌ها، این رونده‌ها باید از نظر الکتریکی و مکانیکی نیرومند و قابل اعتماد باشند. بر خلاف محیط‌های هوایی و زمینی، محیط زیردریا نوعاً محدودیت‌های اندازه‌گیری و فیزیکی بسیاری مانند خوردگی، نشستی، تغییرات آکوستیکی و ... را به سامانه تحمیل می‌کند. از سوی دیگر سختی، خسته‌کنندگی و خطرناکی بالقوه آزمایش‌های دریایی، چالش‌های تکنیکی را برای تعقیب و مشاهده مستقیم رونده ایجاد می‌کند. همه این چالش‌ها به علاوه سرمایه‌گذاری مالی و زمانی فراوان در زمینه فعالیت‌های دریایی همگی دلایلی برای توجیه استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌سازی برای توسعه رونده‌های زیرآبی خودگردان، آزمایش و آموزش نفرات محسوب می‌شوند [۱].

شبیه‌سازی و مدل‌سازی به عنوان یک روند استاندارد در قالب برنامه ارزیابی و تأیید (V&V)^۱ بطور معمول برای طراحی و ساخت کاوشگران زمینی و هوایی نیز اجرا می‌گردد. بدون اجرای این روند استاندارد، عیب‌یابی سطح سامانه‌ای و اجزا و طراحی مأموریت می‌تواند بسیار پرهزینه باشد.

مدل‌سازی عموماً به عنوان یک توصیف ریاضیاتی از سامانه فیزیکی شناخته می‌شود در حالیکه شبیه‌سازی بیانگر چگونگی پیاده‌سازی مدل‌ها در پیکره‌بندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی اغلب در دینامیک رونده پیاده‌سازی می‌شوند که هدف اصلی آن تکرار دقیق پاسخ رونده واقعی نسبت به یک گستره و انواع اختلالات مورد انتظار مانند امواج و جریان‌ها است. بنابراین مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای تحلیل تئوری دینامیک رونده و طراحی مأموریت بسیار مفید خواهد بود. باید تأکید کرد که رونده زیرآبی یک سامانه پیچیده بوده و تعامل و برهم‌کنش بین کنترل، ناوبری و هدایت و وظایف مدیریت اضطراری تعیین‌کننده موفقیت اجرای یک مأموریت است. یک قاعده سرانگشتی برای انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی اطمینان از این است که رفتار سامانه شبیه‌سازی شده بادقت مطلوبی منطبق بر سامانه فیزیکی مشابه باشد. این مسئله با توجه به مباحث قابلیت اطمینان قابل چشم‌پوشی نیست. برای بدست آوردن این پیشرفت، می‌توان بخشی یا همه سامانه

² Hardware in the Loop

³ Real Time

¹ Verification and Validation

مرجع [۵] به معرفی شبیه‌ساز زمان واقعی برای توسعه رونده‌ها پرداخته است. در این شبیه‌ساز ماژول‌های دینامیک رونده، پدیده‌های محیطی و دینامیک عملگرها و حسگرها در نظر گرفته شده است بطوریکه با تولید مدل‌های زمان واقعی از طریق متلب/سیمولینک براحتی قابلیت اضافه شدن به آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه و اجرا را دارد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان بیان نمود که شبیه‌سازی شرایط محیطی اعم از محیط زیر آب، روی آب و یا فضا به منظور ارزیابی و تصدیق صحت عملکرد کلیه زیرسیستم‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مانند حسگرها، عملگرها، رایانه، الگوریتم هدایت، ناوبری و کنترل در قالب آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه لازم و ضروری خواهد بود. با توجه به محیط کاری رونده‌های زیرآبی خودگردان، حسگر فشار یکی از حسگرهای حیاتی در حلقه ناوبری رونده‌های زیرآبی خودگردان است که از آن برای اندازه‌گیری عمق رونده از سطح آب استفاده می‌شود. در این پژوهش طراحی برای ساخت شبیه‌ساز محیطی عمق برای آزمایشگاه سخت-افزار در حلقه یک رونده زیرآبی خودگردان ارائه شده است. هدف از طراحی شبیه‌ساز محیطی عمق، ساخت مکانیزمی برای تولید فشار متناسب با عمقی است که رونده در آن قرار دارد و حسگر نصب شده روی رونده قرار است آن را حس کند. در بخش دوم از این پژوهش به معرفی ساختار آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه و اجزای آن پرداخته شده است. بخش سوم معرف دینامیک یک رونده زیرآبی است. در بخش چهارم استراتژی طراحی و ساخت شبیه‌ساز محیطی عمق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه برای مقایسه با خروجی حسگر فشار در آزمون‌های میدانی در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده

زیرسطحی خودگردان

با توجه به مواردی که پیشتر بیان شد، به دلیل محدودیت‌های فنی، محیطی، مالی، زمانی و ... نمی‌توان بسیاری از سامانه‌ها را بصورت زمان واقعی مورد ارزیابی قرار داد و با توجه به ناشناخته‌ها و عدم قطعیت‌های فراوان، در خصوص

کلیه فعالیت‌ها و عوامل تاثیرگذار در ۷ گروه شبیه‌ساز چندگانه وسایل، ارتباطات بین آنها، موده‌های شبیه‌سازی روی خطی، برون خطی و ترکیبی^۱، پدیده‌های محیطی، محرکه‌های بیرونی، کنترلر و محیط دیداری سه بعدی^۲ دسته‌بندی شده‌اند. مرجع [۳] به توسعه ساختار میز محیط مجازی در آزمایشگاه واقعیت مجازی و چندرسانه‌ای دانشگاه لویزیانا پرداخته است که هدف آن، طراحی مدل ۳بعدی از محیط، رونده‌های زیرآبی و سایر وسایل، جمع‌شدن مدل‌های طراحی شده در یک شبیه‌سازی، برقراری و تصدیق ارتباط میان کاربران و رونده‌های شبیه‌سازی شده و همزمان سازی رونده واقعی با شبیه‌سازی در محیط نرم-افزاری VRML DIS-Java است. DIS^۳ یک پروتکل ارتباطی استاندارد برای انتقال پیام در جهان‌های مجازی با مقیاس بزرگ است. ابزار VRML^۴ هم زبان مدل‌سازی واقعیت مجازی است که امکان نمایش ۳ بعدی از شبیه‌سازی را ایجاد می‌کند.

مرجع [۴] به چگونگی اجرای برنامه ارزیابی و تأیید برای مریخ‌نورد Curiosity از مرحله ورود به جو مریخ تا لحظه نشست بر سطح مریخ پرداخته است. در این پژوهش کارایی یا عدم کارایی هر یک از زیرسیستم‌های مریخ‌نورد مانند سپر حرارتی، مکانیزم جدایش لاک، سیستم جراثقیل هوایی و نشست روی سطح، چتر نجات، ابزار ارتباطی، سیستم پرواز (با زیرمجموعه‌های نرم‌افزار هدایت، ناوبری و کنترل، حسگرها و عملگرها و رادار) و مدل‌های پیش‌رانش و موتورها با لحاظ کردن مدل‌های اتمسفری، گرانش و عوارض سطحی سیاره مریخ روی میز آزمایش شبیه‌سازی تحلیل کنترل (CAST)^۵ در قالب برنامه ارزیابی و تأیید مورد بررسی قرار می‌گیرند. 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 تصدیق برای کلیه المان‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بصورت واحد یا در قالب سیستم یکپارچه در معرض شرایط محیطی مشابه مریخ، امری لازم و ضروری است. این ساختار می‌تواند به عنوان یک استاندارد و مرجع برای کلیه سیستم‌های مشابه تحقیقاتی قابل استفاده باشد.

⁴ Virtual Reality Modeling Language

⁵ Control Analysis Simulation Test-bed

¹ Online, offline, Hybrid, simulator mode

² 3D Display

³ Distributed Interactive Simulation

دیگر پیاده‌سازی شود. به هر حال ساختار آزمایشگاه سخت-افزار در حلقه 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 شناوری شامل سخت‌افزار پردازنده، مدارات جانبی و نرم‌افزار پیاده‌سازی شده در آن است که با دریافت اطلاعات حسگرها، پردازش‌ها را تحت الگوریتم ناوبری انجام داده و با توجه به سناریوی مأموریت، فرامین کنترلی را برای هدایت رونده زیرآبی خودگردان اتخاذ می‌کند. وظیفه عملگر اجرای فرامین کنترلی برای رونده زیرآبی خودگردان است. وظیفه واحد مدیریت مأموریت برقراری ارتباط با رایانه در بستر، بارگذاری اطلاعات مأموریت و نمایش خروجی حسگرها، زیرسامانه‌ها و مکانیزم‌ها برای برگزاری آزمایش-های عملکردی پیش از آغاز مأموریت است.

آزمایشگاه شبیه‌ساز سخت‌افزار در حلقه می‌تواند به کاهش دوره توسعه، کم کردن هزینه کلی، پیشگیری از خرابی‌ها و آزمایش سامانه‌ها و زیرمجموعه‌ها با همه جزئیات قبل از آنکه به سامانه اصلی ملحق شود، کمک کند. بنابراین بخشی یا همه سامانه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را می‌توان به آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه اضافه نمود [۸].

صحت عملکرد آن اظهار نظر نمود. آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه به عنوان یک محیط شبیه‌سازی، امکان بررسی واکنش سامانه به پارامترهای مختلف ورودی و تحلیل نتایج، برهم‌کنش سخت‌افزار و نرم‌افزار، عیب‌یابی سطح سامانه‌ای و اجزای طراحی مأموریت را در حضور بخشی یا همه اجزای سامانه فراهم می‌کند [۵ و ۴].

در شکل (۱) ساختار معمول یک آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه ارائه شده است. آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه بطور معمول شامل زیرمجموعه‌های واحد شبیه‌ساز دینامیکی، واحد شبیه‌ساز حسگر، پردازنده در بستر، عملگرها، واحد کنترل مأموریت و واحد نمایش است [۷ و ۶].

واحد شبیه‌ساز دینامیکی یک مدل ریاضی نسبتاً 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 بروزسانی، تاخیر، نویز، بایاس و ... است، که در واقعیت روی رونده زیرآبی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. براساس نوع طرح‌ریزی آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، واحد شبیه‌ساز حسگر می‌تواند زیرمجموعه‌ای از واحد شبیه‌ساز دینامیکی بوده و یا اینکه دارای ماهیت مستقل باشد و توسط رایانه یا پردازنده



شکل ۱- ساختار آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده زیرآبی خودگردان

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

روابط فوق جهت معرفی محورهای مختصات و ارتباط بین آنها ارائه شده است. اما قبل از استفاده از آنها لازم است معادلات حاکم بر حرکت یک جسم صلب با پارامترهای فوق معرفی شوند. این معادلات بر طبق قانون بقای ممنتوم‌های خطی و زاویه‌ای بدست می‌آیند به گونه‌ای که موقعیت حرکت یک جسم را به همراه بردارهای موقعیت آن نشان دهد. تفکیک این معادلات برای گشتاورهای خطی و زاویه-ای در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} \right) \Big|_I = \left(m_i \cdot \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} \right) \Big|_I \quad (5)$$

$$\sum \vec{M}_i = \frac{d}{dt} (\vec{H}_{Bi}) \Big|_I = \frac{d}{dt} (\vec{H}_{Bi}) \Big|_B + \vec{\omega} \times \vec{H}_{Bi}$$

با بسط و ساده‌سازی رابطه فوق، شش معادله حاکم بر یک جسم صلب شش درجه آزادی حاصل خواهد آمد که در رابطه (۶) ارائه شده است.

$$m[\ddot{u} - v\dot{r} + w\dot{q} - x_G(q^2 + r^2) + y_G(p\dot{q} - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \sum X$$

$$m[\ddot{v} - w\dot{p} + u\dot{r} - y_G(r^2 + p^2) + z_G(q\dot{r} - \dot{p}) + x_G(q\dot{p} + \dot{r})] = \sum Y$$

$$m[\ddot{w} - u\dot{q} + v\dot{p} - z_G(q^2 + p^2) + x_G(r\dot{p} - \dot{q}) + y_G(r\dot{q} + \dot{p})] = \sum Z$$

$$I_x \ddot{\varphi} + (I_{zz} - I_{yy})\dot{q}\dot{r} + m[y_G(\dot{w} - u\dot{q} + v\dot{p}) - z_G(\dot{v} - w\dot{p} + u\dot{r})] = \sum K$$

$$I_y \ddot{\theta} + (I_{xx} - I_{zz})\dot{p}\dot{r} + m[z_G(\dot{u} - v\dot{r} + w\dot{q}) - x_G(\dot{w} - u\dot{q} + v\dot{p})] = \sum M$$

$$I_z \ddot{\psi} + (I_{yy} - I_{xx})\dot{p}\dot{q} + m[x_G(\dot{v} - w\dot{p} + u\dot{r}) - y_G(\dot{u} - v\dot{r} + w\dot{q})] = \sum N \quad (6)$$

در رابطه (۶) مولفه $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]$ موقعیت مرکز جرم را نسبت به مبدأ مختصات بیان می‌کند. قسمت راست معادله (۶) بیانگر مکانیک حاکم بر کپسول می‌باشد که شامل نیروها و گشتاورهای وزن و شناوری (هیدروستاتیک)، هیدرودینامیک (پسا و برا)²، جرم افزوده، سطوح کنترل و

۳- دینامیک رونده زیرآبی خودگردان

مطابق با روش ارائه شده در مرجع [۱۰]، معادلات حرکت شش درجه آزادی یک AUV با بردارهای زیر قابل تعریف است.

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad \tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

در روابط (۱)، η_1 و η_2 بترتیب معرف موقعیت و زوایای اولر 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. این رابطه برای پارامترهای خطی و زاویه‌ای بطور جداگانه نوشته می‌شود [۲].

پارامترهای فوق طبق جدول ۱، شش درجه آزادی حرکت یک جسم در زیر سطح را نشان می‌دهند. رابطه برای پارامترهای خطی و زاویه‌ای به طور جداگانه نوشته خواهد شد که در رابطه ۲ ارائه شده است.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad \dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2)$$

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

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & -\sin\psi \cos\phi & \sin\psi \sin\phi \\ \cos\psi \sin\theta \sin\phi & +\cos\psi \cos\phi \sin\theta & +\cos\psi \cos\phi \sin\theta \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\phi & -\cos\psi \sin\phi \\ +\sin\phi \sin\psi \sin\theta & +\sin\theta \sin\psi \cos\phi & \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

² Drag & Lift

¹ Autonomous Underwater Vehicle

سامانه رانش می‌باشد. با توجه به اینکه اکثر رونده‌های دریایی بصورت ذاتی در کانال غلتش^۱ پایدارند و نوسانات اندکی حول صفر دارند، می‌توان برای ساده‌سازی معادلات، زاویه رول را صفر فرض نمود. از سوی دیگر به منظور مستقل نمودن معادلات از یکدیگر به ترتیب زاویه $\theta = 0$ و $\psi = 0$ در نظر گرفته می‌شود. با اعمال این فرضیات، معادلات دینامیکی در صفحه افقی X-Y نسبت به صفحه عمودی X-Z مستقل خواهند شد و از پیچیدگی معادلات کاسته می‌شود. در نتیجه معادلات (۲) به تفکیک برای صفحه افقی و صفحه قائم به صورت روابط (۷) و (۸) قابل بازنویسی است.

می‌گردد، فشار ناشی از ارتفاع سیال آب بالای محل نصب حسگر را اندازه می‌گیرد.



شکل ۲- حسگر فشار (دیافراگم سرامیکی) آنالوگ جریانی

جدول ۲- مشخصات فنی حسگر فشار

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	سیگنال	دو سیمه ۴ تا ۲۰ میلی
	ال خروجی	آمپر
۲	انتخابی	سه سیمه ۰ تا ۱۰ ولت
	دقت	$\pm 0.5\%$ FSO
۳	نرخ اندازه‌گیری	1 kHz
۴	محدوده اندازه‌گیری	0-10 Bar

قائم به صورت روابط (۷) و (۸) قابل بازنویسی است.

$$\dot{\eta}_1|_{\phi, \theta=0} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\dot{\eta}_2|_{\phi, \theta=0} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

اگر بخواهیم آنچه را که در واقعیت رخ می‌دهد برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه پیاده‌سازی کنیم، با توجه به عمق حرکتی رونده، به یک استخر یا مخزن بزرگ با ارتفاع زیاد نیاز خواهیم داشت که برای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با توجه به فضای محدود آن امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین باید روش را تغییر داد، یعنی مکانیزمی 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 مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق را با ابعاد کوچکتر و هزینه بسیار کمتر برای تجهیز آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه طراحی و پیاده‌سازی کرد.

تفکیک معادلات به سهولت طراحی سیستم هدایت و کنترل^۲ برای دو صفحه افقی و قائم کمک خواهد کرد.

۴- شبیه‌ساز محیطی حسگر عمق

برای طراحی شبیه‌ساز محیطی عمق ابتدا باید مفروضات و ورودی‌های طراحی را شناخت. تنها مفروض طراحی، نوع حسگری است که برای اندازه‌گیری فشار (عمق) در رونده زیرآبی خودگردان استفاده شده است. این حسگر از نوع حسگر فشار (دیافراگم سرامیکی) آنالوگ جریانی است که در شکل (۲) نمایی از آن قابل مشاهده است. مشخصات فنی حسگر در جدول ۲ آورده شده است. هنگامی که این حسگر روی بدنه رونده زیرآبی نصب

² Guidance & Control System

¹ Roll

حرکت رفت و برگشتی در آن حالت انبساط و انقباض فشار را ایجاد می‌کند.

برای ایجاد حرکت رفت و برگشتی پیستون می‌توان از جک الکتریکی با حرکت خطی استفاده نمود. ساختار داخلی این عملگر الکتریکی به گونه‌ای است که با استفاده از چرخ‌دنده حرکت دورانی موتور را به حرکت خطی تبدیل می‌کند بنابراین می‌تواند یک بازو یا پیستون را با طول کورس معین باز و بسته کند. نمایی از جک الکتریکی خطی در شکل (۳) و مشخصات فنی آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳- عملگر الکتریکی

جدول ۲- مشخصات فنی عملگر الکتریکی

مقدار	پارامتر	نوع								
۱۲	ولتاژ (V)	۱								
۱	۳	۷	۱۰	۱۴	۲۰	۲۳	۳۰	سرعت (mm/s)	۲	
۱	۳	۷	۱۰	۱۴	۲۰	۲۳	۳۰	نیرو (N)	۳	
۸۰۰ ~ ۲۰									پیستون	۴
۱۰۰ ~ ۰									کورس (mm)	۵

این جک خطی با تغذیه ۱۲ ولت کار می‌کند و با استفاده از سیگنال پالس مربعی قابلیت کنترل دارد و طول کورس آن ۱۰ سانتی‌متر است. با انتخاب نوع عملگر و با توجه به مشخصات فیزیکی مانند قطر و طول کورس بازوی متحرک و همچنین الگوبرداری از سامانه سیلندر و پیستون می‌توان مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق را طراحی نمود که در شکل (۴) قابل مشاهده است.

نگهداری راحت و ساده، ضعف‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: سامانه پنوماتیک به تجهیزات جانبی آماده‌سازی و واحد کنترل و مراقبت از هوا نیاز دارد. به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری هوا، سامانه پنوماتیک دقت زیادی در جابجایی، کنترل سرعت ثابت و فشار دقیق ندارد. علاوه بر این به هنگام تخلیه هوای فشرده با سر و صدای زیاد همراه است.

از دیگر عملگرهای متداول در صنعت، سامانه‌های هیدرولیک هستند که از سیال روغن استفاده می‌کند. سامانه هیدرولیک در کنار مزایای همچون قدرت بالا، کنترل دقیق موقعیت، حرکت بسیار یکنواخت و کم صدا بودن، ضعف‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: امکان نشتی و آتش‌سوزی روغن در سامانه‌های هیدرولیکی وجود دارد که با عدم رعایت استاندارد می‌تواند خطرآفرین باشد. از سوی دیگر دقت عملکرد سامانه هیدرولیک به دما وابسته است. سومین عملگر متداول و پرکاربرد در صنعت، موتورهای الکتریکی هستند که از انرژی الکتریکی به عنوان نیرو محرکه استفاده می‌کند. از مزایای عملگرهای الکتریکی می‌توان به محدوده وسیع دور و گشتاور با وجود گیربکس، ثبات وضعیت خوب، کنترل-پذیری، تأمین آسان انرژی و تنوع آنها در ابعاد اشاره نمود. در کنار مزایای فوق می‌توان گرانی این عملگرها و اختلال در عملکرد در صورت قطع برق را به عنوان ضعف‌های آن دانست.

با توجه به توضیحاتی که در خصوص انواع عملگرها، مزایا و معایب آنها بیان شد، عملگرهای الکتریکی برای سامانه‌ها و فرآیندهای الکتریکی که نیاز به کنترل دقیق دارند، به عنوان مثال در محیط‌های آزمایشگاهی و میزهای شبیه-سازی با فضای محدود، انتخاب مناسبی خواهد بود، تعمیر و نگهداری آنها آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود و از نظر مصرف انرژی بازده بالاتری دارند. بنابراین می‌توان از عملگر الکتریکی برای طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز محیطی عمق استفاده نمود.

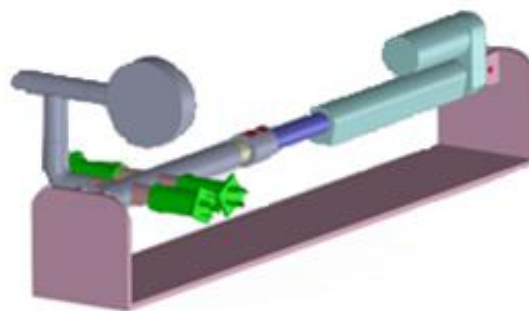
یکی از ساده‌ترین، ارزان‌ترین و در عین حال کارآمدترین ایده‌ای که می‌توان برای ساخت شبیه‌ساز محیطی عمق به کار گرفت، الگوبرداری از ساختار سیلندر و پیستون خودرو است. با الگوبرداری از این ساختار، می‌توان مخزن فشار برای شبیه‌ساز محیطی عمق را طراحی نمود. مخزن همانند سیلندر حاوی سیال یا سیال‌هایی است که پیستون با

متناسب با عمق خروجی از معادلات دینامیکی شش درجه آزادی را در هر لحظه برای حسگر فشار نصب شده روی 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 راه‌اندازی و کنترل عملگر تولید می‌کند تا خطای شبیه‌ساز محیطی عمق را به حداقل برساند.

جهت چرخش موتور استفاده نمود. راه‌انداز L298 با دو کانال مجزا برای راه‌اندازی مستقل دو موتور DC و جریان-دهی ۱ آمپر در هر کانال یکی از پرکاربردترین راه‌اندازهای موتور است. این راه‌انداز قابلیت تغییر جهت حرکت موتور را با توجه به سیگنال PWM خروجی پردازنده دارد. در شکل (۶) ماژول راه‌انداز L298 برای تأمین توان موردنیاز جک خطی قابل مشاهده است.

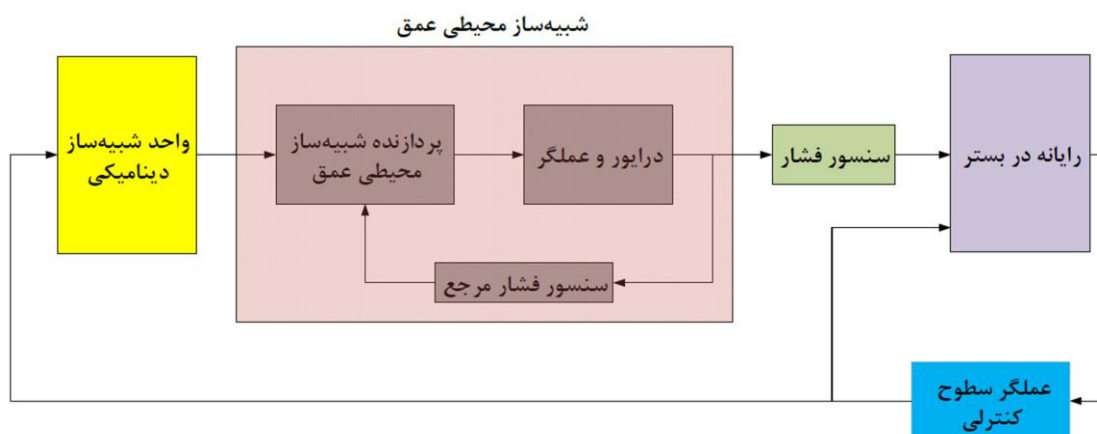
جابجایی پیستون ناشی از حرکت بازوی عملگر منجر به تغییر فشار در محفظه سیلندر می‌شود. رایانه در بستر از طریق حسگری که روی بدنه سیلندر نصب است، مقدار فشار را قرائت کرده و در الگوریتم هدایت، نوبری و کنترل از آن استفاده می‌کند. این روال در هر سیکل اجرای نرم‌افزار بصورت بلادرنگ^۱ انجام می‌شود. برای دستیابی به اهداف فوق، پردازنده شبیه‌ساز محیطی عمق از



شکل ۴- مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق

مکانیزم شامل یک سیلندر به طول تقریبی ۲۵ سانتیمتر با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر با پیستونی به طول ۱۰ سانتی‌متر است. روی سیلندر ۴ دریچه برای نصب انواع حسگر فشار در نظر گرفته شده است. پیستون با اتصال به محور جک قابلیت حرکت به جلو و عقب و در نتیجه تغییر فشار سیال داخل سیلندر را خواهد داشت. لازم به ذکر است سیال داخل مخزن مخلوطی از هوا و آب است. این مکانیزم با استفاده از اورینگ آب‌بند شده و قابلیت تحمل حداکثر فشار ۳ بار (عمق ۳۰ متری) را دارد. در نهایت برای ثابت کردن مکانیزم و پیشگیری از حرکت‌های جانبی، مجموعه جک، پیستون و سیلندر با استفاده از پیچ‌های نگهدارنده در قاب فلزی قرار داده می‌شود.

بنابراین با استفاده از مکانیزم فوق می‌توان حسگر فشار واقعی را بطور مستقیم به حلقه آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه وارد نمود. بلوک دیاگرام آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز محیطی عمق در شکل (۵) ارائه شده است. شبیه‌ساز محیطی عمق وظیفه دارد فشار



شکل ۵- بلوک دیاگرام آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه با محوریت شبیه‌ساز محیطی عمق

^۱ Real-Time

شبیه‌ساز محیطی عمق که به عنوان واسطه بین واحد شبیه‌ساز دینامیکی و رایانه در بستر شناسایی قرار خواهد گرفت، نباید تاخیری به روند اجرای شبیه‌سازی وارد نماید. همانطور که پیشتر بیان شد، وظیفه پردازنده ARM دریافت عمق دینامیکی رونده از واحد شبیه‌ساز دینامیکی به عنوان فرمان عمق و تولید فشار معادل در مخزن است. برای این منظور در هر سیکل مقدار فرمان عمق را با مقدار عمق اندازه‌گیری شده توسط حسگر فشار مرجع روی مکانیزم مقایسه می‌نماید و سپس سیگنال PWM با عرض پالس مناسب را جهت حداقل شدن اختلاف آن‌ها و تغییر فشار مخزن ساخته و به درایور اعمال می‌کند تا جریان لازم را برای راه‌اندازی جک تأمین نماید. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف فشار به صفر برسد یا در محدوده مجاز قرار بگیرد.

حسگر فشار مرجع نصب شده روی مکانیزم از نوع آنالوگ جریانی است. برای قرائت هر چه دقیق‌تر خروجی آن از مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی پردازنده ARM استفاده شده است. با استفاده از روابط زیر می‌توان خروجی حسگر را به ولتاژ و سپس عمق معادل تبدیل نمود.

$$Voltage_{digital} = \left(\frac{Voltage_{analog}}{4096} \right) \times 3.3 \quad (9)$$

$$p = \frac{1000}{250} \times (Voltage_{digital} - 1) \quad (10)$$

$$p = \frac{p_{max} \times p}{16} \quad (11)$$

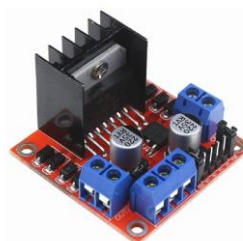
مقدار p_{max} حداکثر فشار قابل اندازه‌گیری توسط حسگر است. فشار در عمق به ازای هر ده متر به میزان یک بار تغییر می‌کند بنابراین با تقسیم عدد فشار بر ده می‌توان عمق را محاسبه نمود.

$$depth = \frac{p}{10} \quad (12)$$

هدف برد پردازنده روشن (باز و بسته) و خاموش کردن جک است. برای این منظور می‌توان انواع روش‌های کنترلی را روی آن پیاده‌سازی نمود. یکی از ساده‌ترین روش‌های کنترلی قابل پیاده‌سازی روی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق، روش کنترل دو وضعیتی On/Off است. در این حالت خروجی کنترل‌کننده برحسب مقدار ورودی که معمولاً خطاست، تنها در دو حالت خاموش و روشن می‌تواند قرار بگیرد. دیاگرام (۹) بیانگر رفتار این کنترل‌کننده است.

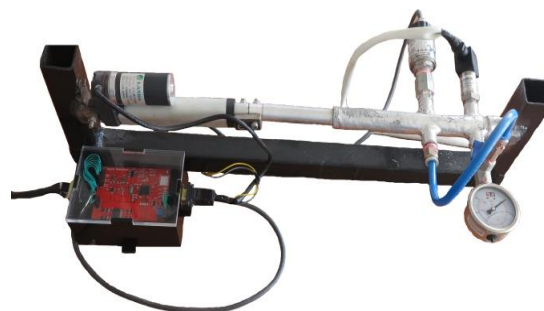
میکروکنترلر با هسته ARM انتخاب شده است که بدلیل امکانات سخت‌افزاری جانبی مانند مبدل آنالوگ به دیجیتال، واسطه سریال و مبدل دیجیتال به آنالوگ، یکپارچگی و پیشرفت سریع‌تر را امکان‌پذیر می‌کند.

میکروکنترلر به تنهایی قادر به تأمین توان موردنیاز جک نخواهد بود. برای حل این مشکل می‌توان از مدارهای ترانزیستوری یا آی‌سی‌های راه‌انداز موتور با قابلیت جریان-دهی بالا و کنترل جهت چرخش موتور استفاده نمود. راه-انداز L298 با دو کانال مجزا برای راه‌اندازی مستقل دو موتور DC و جریان‌دهی ۱ آمپر در هر کانال یکی از پرکاربردترین راه‌اندازهای موتور است. این راه‌انداز قابلیت تغییر جهت حرکت موتور را با توجه به سیگنال PWM خروجی پردازنده دارد. در شکل (۶) ماژول راه‌انداز L298 برای تأمین توان موردنیاز جک خطی قابل مشاهده است.



شکل ۶- راه‌انداز موتور L298

با توجه به توضیحات فوق، مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق با پردازنده مبتنی بر ARM و جک خطی با ابعاد کوچکتر و هزینه بسیار اندک در مقایسه با نمونه‌های موجود طراحی و پیاده‌سازی شد. در شکل (۷) نمایی از مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق به همراه کنترل‌کننده آن قابل مشاهده است.

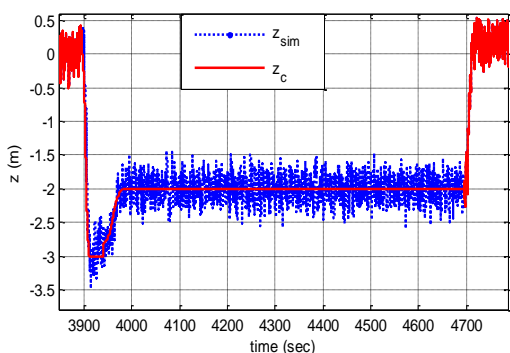


شکل ۷- مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق

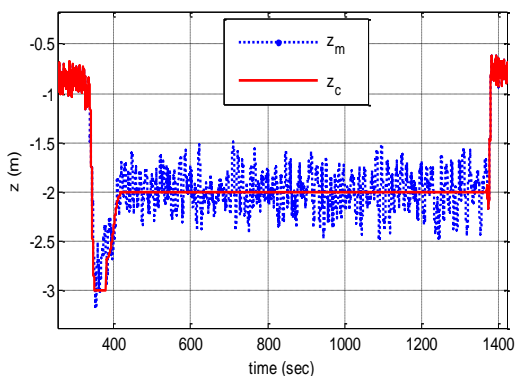
در شکل (۸) آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه یک رونده زیرآبی خودگردان با محوریت شبیه‌ساز محیطی عمق قابل مشاهده است. با توجه به اهمیت فراوان موضوع بلادرنگی در روند شبیه‌سازی آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، مکانیزم

فاز عمق کروز و فازهای گذرای غوص به عمق و صعود به سطح اجرا شده است. در شکل (۱۱) سیگنال فرمان و خروجی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق قابل مشاهده است. خط قرمز پیوسته نشانگر سیگنال فرمان عمق و خط آبی نقطه‌چین، خروجی اندازه‌گیری شده از حسگر فشار آنالوگ نصب شده روی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق است.

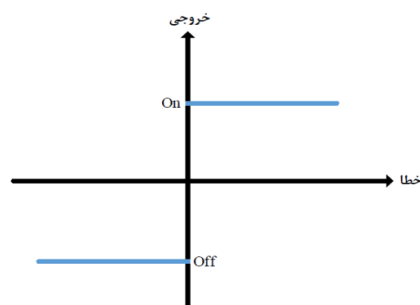
برای مقایسه بهتر از عملکرد مکانیزم مذکور، نمودار عمق اندازه‌گیری شده از حسگر فشار واقعی نصب شده روی رونده زیرآبی خودگردان برای اجرای مانور مشابه در آزمایش میدانی در دریا نیز در شکل (۱۲) ارائه شده است. در شکل (۱۲) خط قرمز پیوسته نشانگر سیگنال فرمان عمق اعمال شده به رونده زیرآبی خودگردان در سه وضعیت حرکت سطحی، حرکت کروز زیرسطحی و حالت گذرای غوص و صعود است. همچنین خط آبی نقطه‌چین، خروجی اندازه‌گیری شده از حسگر فشار آنالوگ نصب شده روی رونده زیرآبی خودگردان است.



شکل ۱۱- عمق اندازه‌گیری شده از حسگر فشار با مکانیزم شبیه‌ساز محیطی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه (خط قرمز پیوسته: سیگنال فرمان عمق و خط آبی نقطه‌چین: عمق شبیه‌سازی شده توسط مکانیزم شبیه‌ساز عمق)

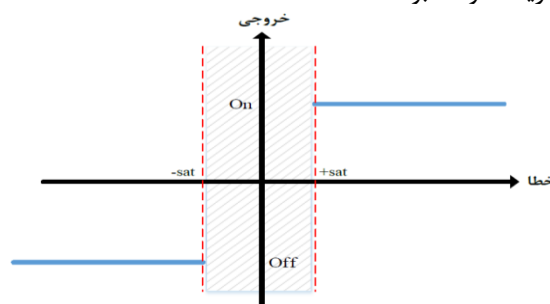


شکل ۱۲- عمق اندازه‌گیری شده از حسگر فشار در آزمایش دریایی (خط قرمز پیوسته: سیگنال فرمان عمق و خط آبی نقطه‌چین: عمق اندازه‌گیری شده توسط حسگر آنالوگ فشار)



شکل ۹- دیاگرام عملکردی کنترل کننده On/Off

پیاده‌سازی این کنترل کننده برای شبیه‌ساز محیطی عمق با اندکی تغییر ماهیت براحتی قابل اجراست. در شبیه‌ساز محیطی عمق، خطا از نوع عمق و برحسب متر است. هنگامی که اختلاف فرمان عمق و عمق اندازه‌گیری شده بزرگتر از صفر باشد، برای افزایش فشار مخزن، فرمان باز شدن جک صادر می‌شود. در مقابل هنگامیکه اختلاف فرمان عمق و عمق اندازه‌گیری شده کوچکتر از صفر باشد، برای کاهش فشار مخزن، فرمان جمع شدن جک صادر می‌شود. به عبارت دیگر در این سامانه فرمان‌های روشن و خاموش جای خود را به باز و جمع شدن جک عملگر داده‌اند که این تغییر جهت حرکت عملگر با توجه به قابلیت درایور عملگر براحتی قابل دستیابی است. البته با تعریف یک آستانه مشخص و با صرفنظر کردن از باند معینی از خطا بین فشار قرائت شده از حسگر مرجع و حسگر نوعی مورد استفاده در رونده، می‌توان از کارکرد زیاد عملگر در مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق کاست بطوریکه در صحت عملکرد شبیه‌ساز محیطی برای تولید عمق مربوطه خللی وارد نشود. در نتیجه دیاگرام عملکردی کنترل کننده به صورت شکل (۱۰) قابل تعریف خواهد بود.



شکل ۱۰- دیاگرام عملکردی کنترل کننده On/Off با سطح اشباع

۴- شبیه‌سازی

برای آزمایش و ارزیابی عملکرد شبیه‌ساز محیطی عمق در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه رونده زیرآبی خودگردان، مجموعه‌ای از مانورهای عملیاتی شامل فاز حرکت سطحی،

فشار واقعی نصب شده روی رونده زیرآبی خودگردان در یک محدوده مشخص در حال نوسان است (ناشی از طبیعت آنالوگ بودن حسگر یا ناشی از جابجایی‌های واقعی خود رونده و یا تاثیر امواج و ...)، بنابراین مسئله عدم تثبیت خروجی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق نه تنها قابل توجیه بوده، بلکه بخشی از اهداف این طراحی دستیابی به چنین رفتاری بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

این کار ارائه‌دهنده روشی برای توسعه و ارتقای آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه یک رونده زیرآبی خودگردان با رعایت همه الزامات آن است. ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق در بستر دینامیک شش درجه آزادی یک رونده زیرآبی خودگردان بصورت بلادرنگ انجام پذیرفته است. نتایج بیانگر تطبیق خروجی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق با عمق اندازه‌گیری شده از آزمایش میدانی در دریا است. مهم‌ترین حسن بکارگیری مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق، وارد کردن حسگر فشار واقعی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه و عدم دخل و تصرف در مشخصات فنی و تکنیکی آن مانند پروتکل ارتباطی، نویز، بایاس و ...، اطمینان از صحت عملکرد و قابلیت اطمینان حسگر فشار پیش از نصب روی رونده در طی برگزاری آزمایش‌های متعدد آزمایشگاهی و کاهش تعداد و در نتیجه هزینه آزمایش‌های میدانی در دریا برای شناسایی حسگر است.

با مقایسه نمودارهای (۱۱) و (۱۲) می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱) دامنه نوسان عمق شبیه‌سازی شده در مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق در محدوده دامنه نوسان خروجی حسگر واقعی نصب شده روی رونده زیرآبی خودگردان در آزمایش دریایی است.

۲) افست یا مقدار میانگین عمق شبیه‌سازی شده در مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق و خروجی حسگر واقعی نصب شده روی رونده زیرآبی خودگردان با هم یکسان بوده و فاقد بایاس است.

۳) با توجه به دینامیک کند رونده زیرآبی خودگردان و از سوی دیگر سرعت مناسب عملگر مورد استفاده در مکانیزم شبیه‌ساز عمق، مسئله تاخیر زمانی مشاهده نشده است.

۴) نوسانات در عمق شبیه‌سازی شده برخاسته از طبیعت کنترل‌کننده دو وضعیتی On/Off است که برای مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق لحاظ شده به طوریکه به هر خطای خارج از محدوده بسرعت واکنش نشان می‌دهد. البته این نوسانات با طراحی کنترل‌کننده‌های معمول مانند PID و استفاده از ترم انتگرالی با مصالحه بین مولفه‌های پاسخ زمانی و خطا قابلیت کاهش دارد.

۵) از سوی دیگر هدف از طراحی و پیاده‌سازی مکانیزم شبیه‌ساز محیطی عمق، ایجاد آنچه که در واقعیت در حال رخ دادن است، می‌باشد. با توجه به اینکه خروجی حسگر

مراجع

- [1] F. Song, P. E. An, and A. Folleco, "Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Vehicles: Design and Implementation", Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Oceanic Engineering, Vol. 28, No. 2, APRIL 2003.
- [2] B. Jouvencel, L. Lapierre, and O. Parodi, "Hardware-in-the-loop simulators for multiple vehicle scenario: survey on existing solutions and proposal of a new architecture", Intelligent Robots and Systems, Oct 2009, St. Louis, MO, United States. institute of electrical and electronics engineers, 2009, pp.225-230.
- [3] D. Gracanin, K. P. Valavanis, and Maja Matijasevic, "Virtual Environment Testbed for Autonomous Underwater Vehicles", Control Engineering Practice, Vol. 6, 1998, pp. 653-660.
- [4] 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, Vol. 51, No. 4, July–August 2014.
- [5] J. L. D. Dantas, and E. A. D. Barros, "A Real-Time Simulator for AUV Development," 20th International Congress of Mechanical Engineering November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brazil.
- [6] S. Louis, D. Andreu, K. G. Dejean, and L. Lapierre, "HIL Simulator for AUV with Contract", Control Architectures of Robots, Jun 2015, Lyon, France.

[7] D. P. Brutzman, Y. Kanayama and M. J. Zyda, "Integrated Simulation for Rapid Development of Autonomous Underwater Vehicles", Presented at the Institute of Electrical and Electronics Engineers Oceanic Engineering Society Autonomous Underwater Vehicle (AUV) 92 Conference, Washington DC, June 4-5, 1992, pp. 3-10.

[8] H. C. Brown, A. Kim, and R. M. Eustice, "An Overview of Autonomous Underwater Vehicle Research and Testbed at PeRL", Marine Technology Society Journal, May 2009.

[9] 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, Book edited by: Alexander V. Inzartsev, ISBN 978-953-7619-49-7, pp. 582, December 2008, I-Tech, Vienna, Austria.

[10] A. Vasilijevic, B. Borovic, and Z. Vukic, "Underwater Vehicle Localization with Complementary Filter: Performance Analysis in the Shallow Water Environment", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 68, 2012, pp.373-386.

[۱۱] بهروز مراد حاصل، وهاب دهلقی، محمدتقی عیوضی و مصطفی تقی پور، "مدلسازی آزمایشگاهی سیستم انتقال حرارت تیوب رادیولوژی با نانوسیال کربنی چند دیواره و بررسی بهبود ضریب انتقال حرارت"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۴۵-۵۸.

[۱۲] مهرداد بزاززاده، مجتبی دهقان منشادی، امین نظریان شهرابکی و علی شهریاری، "طراحی کنترلکننده بهینه فشار در یک تونل باد فراصوت دمشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۵۵-۱۶۹

[۱۳] سجاد صدر، داود عرب خابوری و مصطفی نمازی، "مدلسازی سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۵۵-۲۶۶

[14] G. Liu, G. Chen, J. Jiao, and R. Jiang, "Dynamics Modeling and Control Simulation of an Autonomous Underwater Vehicle", Journal of coastal research, special Issue No. 73, 2015.

[15] R. D. Hernandedz, P. A. Mora, "modeling and simulation of AUV using Hardware in the loop", international journal of applied engineering research, Vol. 11, No. 8, January 2016, pp. 5700-5703.

[16] M. oddone, A. bruzzone, E. Coelho, D. Cecchi, and B. garau, "An underwater buoyancy -driven glider simulator with modeling & simulation as a service architecture", proceeding of the international defense and homeland security simulation workshop, 2017.

[17] A. C. Dubey and V. A. Subramanian, "Hardware-in-the-loop simulation and control design for defense science journal, Vol. 70, No.4, July 2020, pp. 469-476.