

استخراج خط ساحلی به روش طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از تصاویر راداری

مطالعه موردی خلیج چابهار

فاطمه باقری^{*۱}، سعید صادقیان^۲

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: bagheri.fat@gmail.com

چکیده

استفاده از تصاویر راداری به دلیل قابلیت جمع‌آوری اطلاعات در محدوده‌ای وسیع و در زمانی کوتاه، راهکاری مناسب و مؤثر در استخراج مرز خشکی و آب می‌باشد. این موضوع در کشورهایی مانند ایران که دارای مرزها و نواحی آبی گسترده می‌باشد از اهمیت بیشتری برخوردار است. امروزه با توجه به در دسترس قرار گرفتن تصاویر مختلف راداری، استفاده از سنجش از دور در مطالعات دریایی و اقیانوس‌شناسی به منظور توسعه‌ی پایدار بیش از پیش افزایش یافته است. با توجه به اینکه تصاویر راداری در مقایسه با تصاویر اپتیکی مستقل از منبع انرژی خورشید بوده و توانایی تصویربرداری در ساعات مختلف شبانه روز بدون وابستگی به شرایط آب و هوایی دارد، می‌تواند در مطالعات دریایی بسیار به کار گرفته شود. از این رو، سعی بر آن شد از قابلیت تصاویر راداری سنتینل ۱ در استخراج خط ساحلی به روش طبقه‌بندی نظارت شده استفاده گردد. لذا پس از پیش‌پردازش‌های لازم روی تصویر در منطقه مورد مطالعه ابتدا اقدام به قطعه‌بندی تصویر شد. بدین ترتیب که پس از قطعه‌بندی تصویر با روش چند مقیاسه، داده‌های آموزشی در دو کلاس آب و خشکی استخراج و تصویر مورد نظر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) با دقت کلی ۹۱٪ و ضریب کاپا ۰/۸۱ طبقه‌بندی گردید. در ادامه با استفاده از آنالیزهای GIS خط ساحلی که مرز بین دو کلاس آب و خشکی بود با دقت ۹۴٪ استخراج گردید.

کلید واژه: آنالیز GIS، تصاویر راداری، جنگل تصادفی، چابهار، طبقه‌بندی، قطعه‌بندی.

Coastline extraction by supervised classification method using radar images

A case study of Chabahar Bay

Fateme Bagheri^{*1}

Saeed Sadeghian²

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author E-mail: bagheri.fat@gmail.com

Abstract— The use of radar images is a suitable and effective solution for extracting the border of land and water due to the ability to collect information in a wide range and in a short time. This issue is more important in countries like Iran, which has wide borders and water areas. Nowadays, due to the availability of various radar images, the use of remote sensing in marine and oceanographic studies has increased even more for sustainable development. Considering that compared to optical images, radar images are independent of the sun's energy source and have the ability to capture images at different hours of the day and night without depending on weather conditions, so they can be used in marine studies. Therefore, an attempt was made to use the ability of Sentinel 1 radar images to extract the coastline using the supervised classification method. Therefore, after the necessary pre-processing on the image in the study area, the image was segmented first. In this way, after segmenting the image with multi-scale method, training data was extracted into two classes of water and land and the target image was classified using Random Forest algorithm with overall accuracy of 91% and kappa coefficient of 0.81. Next, using GIS analysis, the coastline, which was the border between two classes of water and land, was extracted with 94% accuracy.

Keywords— GIS analysis, Radar Images, Random Forest, Chabahar, Classification, segmentation.

۱. مقدمه

خط ساحلی به خطی گفته می‌شود که در نقشه‌های دریایی و ساحلی نشان‌دهنده مرز بین خشکی و آب است. این خط بر اساس محدوده امواج که در نزدیکی ساحل شکل می‌گیرد، تعیین می‌شود. خط ساحلی ممکن است به دلیل تغییرات طبیعی همچون موج‌ها، جریان‌های دریایی و تغییرات شکل ساحل، در طول زمان تغییر کند (۱). بنابراین، برای مدیریت درست سواحل و طراحی سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب و طوفان‌های ساحلی، لازم است که خط ساحلی به صورت دوره‌ای به‌روز شود. استخراج خط ساحلی از تصاویر راداری و دیگر منابع ماهواره‌ای می‌تواند به مدیریت و توسعه‌ی پایدار سواحل و حفاظت از محیط زیست کمک کند و در راستای طراحی سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب و طوفان‌های ساحلی راهگشا باشد علاوه بر آن می‌تواند در پژوهش‌های علمی و کاربردهای نظامی به منظور ایجاد امنیت در سواحل و حفاظت از مرزها مورد استفاده قرار گیرد (۲).

مطالعات بسیاری در رابطه با استخراج خط ساحلی با استفاده از تصاویر راداری انجام شده است. لیو و همکاران تکنیک طبقه‌بندی تصویر را برای استخراج یک خط ساحلی از مجموعه‌ی تصویر به دست آمده از رادار و اپتیک پیشنهاد کردند (۳). پس از آن الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی تصاویر سنجنش از دور در کار زنگ هانو و همکاران با استفاده از تابع هسته Sigmoid به عنوان طبقه‌بندی کننده بهینه به کار گرفته شد. این مطالعه کاهش قابل توجهی را در خطای طبقه‌بندی برای یک فضای نمونه کوچک نشان داد و دقت خوبی در استخراج خط ساحلی داشت (۴). سپس اکبرزاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ از یک الگوریتم تشخیص لبه مبتنی بر الگوریتم تفکیک فازی برای استخراج خط ساحلی از تصاویر راداری استفاده کردند و از قابلیت این الگوریتم در شناسایی خط ساحلی بهره بردند (۵). در ادامه ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ از یک شبکه‌ی عصبی کاملاً پیچشی برای شناسایی خط ساحلی در تصاویر راداری استفاده کردند (۶).

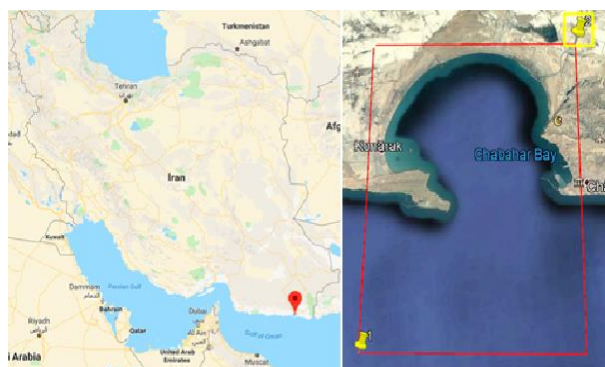
اطلاعات مکانی به هنگام و قابل اطمینان از سواحل در بسیاری از کاربردهای دریایی، محیط زیستی، انتقال خطوط گاز و نفت، کشتیرانی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. از این رو داشتن این اطلاعات مکانی نظیر خط ساحلی امری ضروری در این کاربردها می‌باشد. دستیابی به چنین اطلاعات مکانی از گذشته تا امروز به صورت زمینی و برداشت‌های میدانی هیدروگرافی انجام گرفته است (۷). با ظهور تصاویر سنجنش از دور اپتیکی و راداری امکان دریافت اطلاعات مکانی از هر نقطه سطح زمین در مقیاس‌های مختلف و کاربردهای مختلف با هزینه‌های بسیار پایین و در وسعت گسترده فراهم گردیده است. به همین دلیل این تکنولوژی می‌تواند در استخراج اطلاعات مکانی از دریاها و مناطق آبی کمک شایانی را نماید. با توجه به اینکه اغلب سواحل در طول سال دارای هوای ابری و بارانی می‌باشند، استفاده از تصاویر راداری با روزه مصنوعی (SAR) که مستقل از تغییرات آب و هوایی می‌باشد و در تمام طول شبانه روز امکان تصویر برداری را دارد، می‌تواند برای این منظور مناسب باشد، از این رو می‌تواند اطلاعات مکانی ارزشمندی در ارتباط با خط ساحلی به منظور کاربردهای دریایی فراهم آورد. با توجه به اینکه تصاویر راداری اغلب با نویز همراه است، بنابراین استفاده از پردازش‌های پیکسل مبنا به منظور استخراج اطلاعات از تصاویر راداری اغلب توصیه نمی‌شود (۸). لذا در این پژوهش سعی بر آن شد تا خط ساحلی با رویکرد شیء مبنا به روش طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از پردازش تصویر استخراج شود.

به منظور استخراج خط ساحلی با رویکرد شیء‌گرا به روش طبقه‌بندی نظارت‌شده بر مبنای شیء‌های استخراج شده، ابتدا باید از فرآیند قطعه‌بندی استفاده شود. گروهی از پیکسل‌ها که از نظر ویژگی‌های طیفی و مکانی به هم شباهت داشته باشند را شیء می‌گویند و طبقه‌بندی از دیدگاه شیء‌گرا به معنی اختصاص یک تعداد از اشیاء تصویر به یک کلاس خاص طبق توصیف آن کلاس می‌باشد. در آنالیزهای تصویری شیء‌گرا، واحدهای پردازش، اشیاء تصویر هستند، نه پیکسل‌های مجزا و این عمده‌ترین تفاوت بین آنالیزهای پیکسل مبنا و شیء‌گرا می‌باشد (۹). طبقه‌بندی شیء‌مبنا در سه مرحله‌ی؛ قطعه‌بندی تصویر، انتخاب داده‌های آموزشی و در نهایت طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم انتخابی، انجام می‌شود (۹). در سال‌های اخیر الگوریتم‌های هوشمند مدرن همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین‌های بردار پشتیبان،

درخت تصمیم، جنگل تصادفی نقش مهمی در طبقه‌بندی داده‌های سنجش از دور داشته‌اند (۱۰)، در این پژوهش نیز به منظور طبقه‌بندی از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. که در سال‌های اخیر استفاده‌های بسیاری از آن در زمینه پزشکی، بازی‌های کامپیوتری، پردازش آنلاین و پردازش تصاویر شده است. این روش شامل یک طبقه‌بندی‌کننده با مجموعه‌ای از درخت‌هاست که توسط برمن معرفی شد (۱۱) و در اصل توسعه روش Bagging است با این تفاوت که در انتخاب ویژگی به صورت تصادفی عمل می‌کند. هنگام ساختن یک درخت تصمیم، در هر مرحله از انتخاب انشعاب، RF ابتدا مجموعه‌ای از ویژگی‌ها را به طور تصادفی انتخاب می‌کند و سپس مرحله‌ی انتخاب انشعاب مرسوم را داخل مجموعه‌ی ویژگی ادامه می‌دهد (۱۲)، به همین دلیل طبقه‌بندی‌کننده‌های پایه با انعطاف‌پذیری بالایی را تولید می‌کند. در یک طبقه‌بندی مبتنی بر RF، لازم است کاربر لازم است دو پارامتر، یکی M که زیرمجموعه تصادفی از ویژگی‌هاست و دیگری تعداد درخت‌ها را، مشخص کند (۱۳).

۲. داده‌های مورد استفاده و منطقه مطالعاتی

داده مورد استفاده در این تحقیق تصویر راداری Sentinel-1A و منطقه مورد مطالعه بندر چابهار می‌باشد، که در جنوب کشور ایران و استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این بندر در مختصات جغرافیایی ۶۰ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳ ثانیه تا ۶۰ درجه ۳۹ دقیقه و ۱۵ ثانیه شمالی و ۲۵ درجه ۹ دقیقه و ۳۷ ثانیه تا ۲۵ درجه و ۲۶ دقیقه و ۵ ثانیه شرقی قرار گرفته است که در شکل ۱ نشان داده شده است. این بندر به دلیل موقعیت استراتژیک در ترانزیت کالاهای بنادر حوزه خلیج فارس، آسیای میانه و افغانستان، نقش مهمی به لحاظ اقتصادی داشته و تنها بندر اقیانوسی ایران است که قابلیت پهلوگیری کشتی‌های اقیانوس‌پیما را دارد و از مناطق آزاد بازرگانی ایران بشمار می‌رود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳. روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا تصویر مورد نظر به قطعه‌های مختلف تقسیم شد و شیء‌های تصویری ایجاد شد که به این فرآیند قطعه‌بندی تصویر گفته می‌شود. سپس جهت طبقه‌بندی نظارت‌شده از این شیء‌های تصویری داده‌های آموزشی برای دوکلاس خشکی و آب استخراج شد و سپس با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و با استفاده از داده‌های آموزشی، تصویر طبقه‌بندی شد. پس از طبقه‌بندی تصویر، در نهایت با استفاده از آنالیزهای GIS خط ساحلی استخراج شد. در ادامه مراحل انجام کار بیان شده است.

۳-۱. قطعه‌بندی تصویر

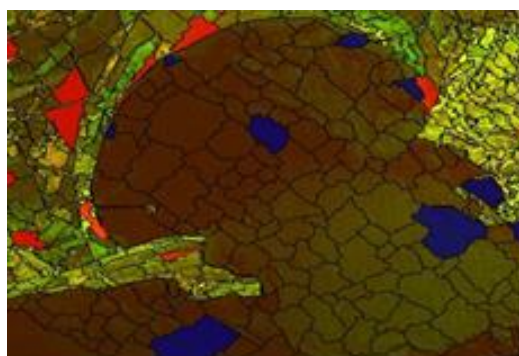
جهت انجام قطعه‌بندی تصویر راداری از الگوریتم قطعه‌بندی چند مقیاسه در محیط نرم‌افزار قدرتمند قطعه‌بندی، eCognition developer استفاده شد. این الگوریتم دارای چندین پارامتر از قبیل فشردگی، نرمی و مقیاس و ناهمگونی طیفی می‌باشد که باید متناسب با هر تصویر تعیین گردد. یکی از مشکلات مهم در قطعه‌بندی، ایجاد قطعه‌بندی یکنواخت است که برای این منظور باید پارامترهای قطعه‌بندی به صورت بهینه انتخاب شود. شاخص فشردگی رابطه مستقیمی با نسبت محیط یک شیء تصویری به تعداد پیکسل‌های تشکیل‌دهنده آن شیء تصویری دارد. هر چه شکل شیء از حالت مربعی خارج شود مقدار ناهمگونی افزایش می‌یابد. برای کنترل این ناهمگونی، وزن بیشتری به شاخص فشردگی اختصاص داده می‌شود. پارامتر عدد مقیاس نیز میزان همگنی ابعاد شیء‌های تصویری را کنترل می‌کند و انتخاب بهینه‌ی آن موجب ایجاد تمایز بین عوارض مختلف می‌شود. به‌کارگیری پارامتر ناهمگونی ساختاری با وزن زیاد، لزوم کاهش فاکتور مقیاس به همان نسبت را ایجاد می‌کند تا به نوعی از ادغام عوارض مجاور جلوگیری گردد. پروسه‌ی انتخاب پارامترهای قطعه‌بندی باید به گونه‌ی باشد که تمامی این مؤلفه‌ها، همزمان و به‌صورت موازی با یکدیگر انتخاب شوند تا شیء‌های متناسب با منطقه موردنظر ایجاد گردد. بمنظور قطعه‌بندی تصویر راداری مورد نظر پس از ارزیابی بصری در نهایت مقادیری که در جدول ۱ آورده‌شده برای پارامترهای قطعه‌بندی چند مقیاسه انتخاب گردید و تصویر قطعه‌بندی شد.

جدول ۱- پارامترهای قطعه‌بندی چند مقیاسه برای تصویر راداری

نرمی	فشردگی	ناهمگونی طیفی	مقیاس	پارامترهای قطعه‌بندی
۰/۵	۰/۵	۰/۶	۱۵۰	مقدار

۳-۲. استخراج داده‌های آموزشی

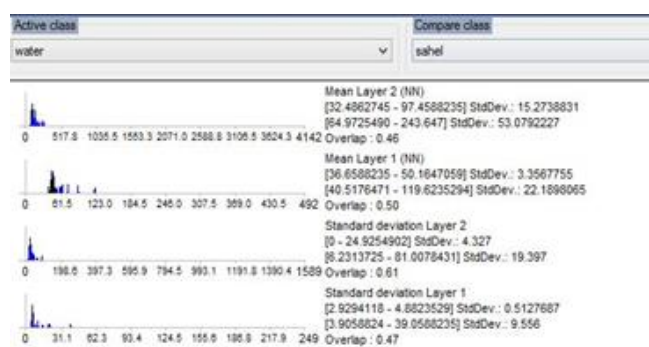
برای طبقه‌بندی تصاویر قطعه‌بندی شده احتیاج به داده‌های آموزشی می‌باشد. با توجه به اینکه هدف فقط استخراج خط ساحلی منطقه مورد مطالعه بود، بنابراین فقط از دو کلاس آب و خشکی استفاده شد و داده‌های آموزشی برای آن دو کلاس استخراج گردید. انتخاب این داده‌های آموزشی با توجه به دانش فرد خبره انجام شد. سپس قطعه‌های آموزشی برای آموزش کلاس‌ها به منظور طبقه‌بندی به روش جنگل تصادفی معرفی شدند. این داده‌های آموزشی در شکل ۲ نمایش داده‌شده‌است.



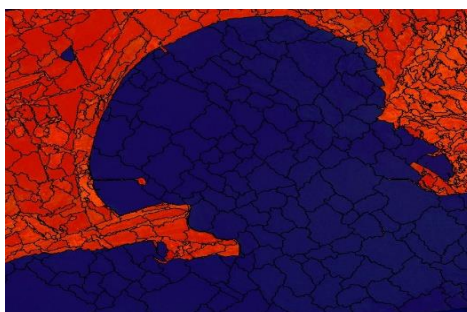
شکل ۲- داده‌های آموزشی

۳-۳. طبقه بندی به روش جنگل تصادفی

بعد از قطعه بندی تصویر با استفاده از نمونه های آموزشی که به عنوان نقشه موضوعی به نرم افزار معرفی شد، تصویر قطعه بندی شده متناسب با منطقه مورد نظر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه بندی شد. با توجه به این که در طبقه بندی شیء گرا، ویژگی ها نقش بسیار مهمی در نتایج طبقه بندی دارند، در انتخاب آن ها باید دقت شود. در این راستا با توجه به متفاوت بودن مقدار طیف رادیومتریکی پیکسل های تشکیل دهنده اشیا در کلاس های آب و خشکی، از ویژگی، میانگین طیفی بازگشتی و همچنین انحراف معیار اشیا تشکیل شده در آب و خشکی جهت تفکیک ساحل از دریا، استفاده شد. برای انتخاب ویژگی های مناسب جهت تفکیک دوبه دوی کلاس ها با دقت بالا، از روش همپوشانی تابع توزیع نرمال مربوط به داده های آموزشی دو کلاس بر مبنای ویژگی مورد نظر استفاده شد. به طور مثال، همان طور که در شکل ۳ مشاهده می گردد، برای دو کلاس آب و خشکی، پس از رسم تابع توزیع نرمال داده های آموزشی انتخاب شده بر مبنای میانگین و انحراف معیار آن ها بر اساس ویژگی های میانگین هر لایه، انحراف معیار، میزان پوشش مشترک داده های آموزشی به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۵۰، ۰/۶۱ و ۰/۴۷ می باشند. که این مقادیر به دست آمده برای پوشش های مشترک، بیانگر این است که ویژگی انتخاب شده برای تفکیک دو کلاس مناسب است. بدیهی است که هر چه این مقدار به صفر نزدیک تر باشد، ویژگی مورد نظر جهت تفکیک دو کلاس مناسب تر است و هر چه به عدد یک نزدیک تر باشد، آن ویژگی نمی تواند گزینه مناسبی برای تفکیک دو کلاس مورد نظر باشد. پس از استخراج ویژگی های مناسب، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد تا شیء های حاصل از قطعه بندی، برچسب گذاری شده و طبقه بندی گردد. همان طور که اشاره شد از مهمترین پارامترهای این الگوریتم تعداد درخت و تعداد ریشه های درخت می باشد، که در این تحقیق تعداد درخت ۱۰۰ و ۵ ریشه برای آن در نظر گرفته شد. شکل ۴ تصویر طبقه بندی شده حاصل از این الگوریتم می باشد. لازم به ذکر است پارامترهای ارزیابی طبقه بندی انجام گرفته به ترتیب برابر با ۰/۹۱ در صد برای دقت کلی و ۰/۸۱ ضریب کاپای آن بدست آمد.



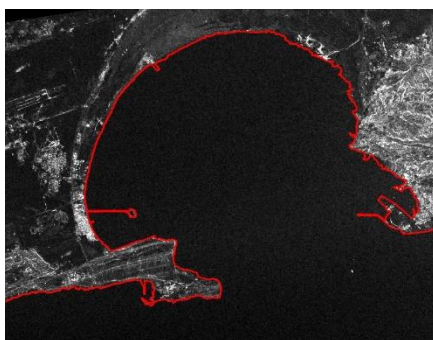
شکل ۳- مقایسه نمونه های آموزشی دو کلاس خشکی و آب در فضای ویژگی جهت طبقه بندی تصویر راداری



شکل ۴- تصویر طبقه بندی شده حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی

۳-۴. استخراج و ارزیابی خط ساحلی

پس از طبقه‌بندی تصویر در دو کلاس آب و خشکی باید مرز بین دو کلاس استخراج گردد. بنابراین با استفاده از آنالیزهای GIS ابتدا شیء‌های طبقه‌بندی شده که به صورت جداگانه برچسب‌گذاری شده بودند، در دو کلاس آب و خشکی با یکدیگر تلفیق شده و هر کدام از این کلاس‌ها تشکیل یک پلیگون واحد با مرز مشخص با پلیگون همسایه را می‌دهد که می‌توان مرز بین این دو کلاس را به عنوان پلی‌لاین، که همان خط ساحلی می‌باشد، استخراج کرد. در نهایت خط ساحلی با استفاده از آنالیزهای GIS استخراج شد که در شکل ۵ بر روی تصویر ماهواره ای مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۵ - خط ساحلی استخراج شده

به منظور ارزیابی خط ساحلی به دست آمده، از تصویر راداری به صورت بصری مرز بین دو کلاس آب و خشکی رقومی گردید و برای ارزیابی دقت از آن استفاده شد. بدین صورت که اختلاف طول کلی بین مرز رقومی شده به صورت بصری و خط ساحلی استخراج شده حاصل از پردازش، به عنوان خطای روش پیشنهادی در نظر گرفته شد و برای محاسبه دقت این روش از نسبت این اختلاف به مقدار کل خط ساحلی رقومی شده به عنوان شاخصی برای ارزیابی دقت خط ساحلی استخراج شده در نظر گرفته شد که در مجموع $9686/13805$ متر خطا برآورد شده است و از آنجایی که طول کل خط ساحلی رقومی شده برابر با 157707 متر می‌باشد. نسب این دو مقدار که برابر با ۴ درصد از کل طول خط ساحلی می‌باشد به عنوان خطای روش پیشنهادی ارائه شد. برای بیان این خطا به صورت دقت از رابطه زیر استفاده گردید.

$$Accuracy = \frac{A}{B} = \frac{157707 - 9686.13805}{157707} * 100 = 94\%$$

۴. نتیجه گیری

با در دسترس قرار گرفتن تصاویر راداری سنتینل ۱ دامنه کاربردهای تصاویر راداری در مطالعات محیطی و اقیانوس‌شناسی افزایش یافته است. در طرف دیگر توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین این امکان را برای محققین سنجش از دور فراهم کرده است که از این الگوریتم‌ها به عنوان ابزاری برای تفسیر و پردازش تصاویر راداری استفاده نمایند. بنابراین در این مطالعه سعی بر آن شد که با استفاده از تصاویر راداری و به کارگیری روش جنگل تصادفی به استخراج خط ساحلی منطقه مورد مطالعه پرداخته شود. جهت نیل به این هدف پس از پیش پردازش‌های انجام گرفته بر روی تصاویر راداری، تصویر مورد نظر را با استفاده از الگوریتم قطعه‌بندی چند مقیاسه به شیء‌های کوچکتر تقسیم‌بندی شد. پس از ایجاد این شیء‌های تصویری در دو کلاس آب و خشکی داده‌های آموزشی انتخاب گردید و تصویر مورد نظر با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی طبقه‌بندی شد. با توجه به اینکه مرز بین دو کلاس آب و خشکی به عنوان خط ساحلی تعریف می‌گردد، برای استخراج این خط ساحلی پس از برچسب



گذاری شیء‌های تصویری و تلفیق آنها به دو کلاس آب و خشکی از آنالیزهای GIS استفاده گردید تا مرز بین این دو کلاس به عنوان خط ساحلی استخراج گردد و نتایج نشان از قابلیت مناسب تصاویر راداری در استخراج خط ساحلی دارد.

۵. منابع:

1. Boak, E.H., Turner, I.L., 2005, Shoreline definition and detection: A review, *Journal of Coastal Research*, Vol. 21 (4), pp. 688–703, DOI:10.2112/03-0071.1.
2. Alesheikh, A. A, Ghorbanali, A & Nouri, N, 2007, Coastline change detection using remote sensing, *Int. J. Science Technology*, v 4 (1): pp. 61-66.
3. Liu, H.X.; Jezek, K.C., 2004, A complete high-resolution coastline of antarctica extracted from orthorectified Radarsat SAR imagery, *Photogramm. Eng. Rem. Sens.*, 70, 605–616.
4. Hannv Z, Qigang J, jiang Xu, 2013, Coastline Extraction Using Support Vector Machine from Remote Sensing Image, *Journal of multimedia*, 8(2), 175-182.
- 5- *International Journal of Remote Sensing*, 38:2, 355-370, DOI: 10.1080/01431161.2016.1266104.
- 6- Shuangshang Z, Qing Xu, and Xiaofeng Li, Automatic Waterline Extraction of Large-Scale Tidal Flats from SAR Images Based on Deep Convolutional Neural Networks Artificial Intelligence Oceanography, https://doi.org/10.1007/978-981-19-6375-9_14.
- 7- Guariglia, A.; Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M.L., Zaccagnino, A. & Colangelo, A, 2006, A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes, *Ann. Geophys*, 49, 295–304.
- 8- Liu Z; Li F; N, Li N, Wang R, Zhang H, 25 January 2016, A Novel Region-Merging Approach for Coastline Extraction From Sentinel-1A IW Mode SAR Imagery, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3):324-328, DOI:10.1109/LGRS.2015.2510745.
- 9- Al-Ruzouq R, Shanableh A, Gibril B & Kalantar B, 2019, "multi-scale correlation-based feature selection and random forest classification for LULC mapping from the integration of SAR and optical Sentinel images", *Proc. SPIE 11157, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments IV*, 111570B (2 October 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2533123>.
- 10- Pech-May, F.; Aquino-Santos, R.; Delgadillo-Partida, J., 2023, Sentinel-1 SAR Images and Deep Learning for Water Body Mapping. *Remote Sens*, 15, 3009. <https://doi.org/10.3390/rs15123009>
- 11- Breiman.L, 1996, Bagging predictors. *Machine learning* 24, 123-40.
- 12- Breiman.L, 2001, Random forests. *Machine learning* 45, 5-32.
- 13- Lien Loosvelt (UGent) , Jan Peters (UGent) , Henning Skriver, Bernard De Baets (UGent) and Niko Verhoest (UGent) (2012) *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. 50(10). p.4185-4200.

آنالیز هارمونیک منطقه مکران

آناهیتا روشنی ممقانی^{۱*}، محمد اکبری صفی آبادی^۲

۱. دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲. رییس مرکز آبنگاری و اقیانوس شناسی سازمان نیروجغرافیایی مسلح، تهران، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: Anahitaroshani5@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله آنالیز هارمونیک منطقه مکران توسط دامنه و فاز مولفه های جزر و مدی می باشد. در این مقاله دامنه و فاز مولفه جزر و مدی به عنوان یکی از مولفه های ژئودینامیکی منطقه مکران مورد بررسی قرار می گیرد. دامنه مولفه جزر و مد، میزان تغییر ارتفاع سطح آب در هنگام جزر و مد را نشان می دهد. فاز مولفه جزر و مد نیز به زمان بروز جزر و مد اشاره دارد. این دو مولفه از اهمیت بسیاری برای حمل و نقل کالاها و انرژی از طریق دریا برخوردارند، زیرا تغییرات ارتفاع سطح آب و زمان بروز آنها می تواند بر توسعه بندر و بنادر دریایی، حمل و نقل دریایی و حفظ امنیت دریایی تأثیرگذار باشد. بنابراین، بررسی دامنه و فاز مولفه جزر و مد در آنالیز ژئودینامیکی منطقه مکران از اهمیت بالایی برخوردار است.

کلید واژه: منطقه مکران-آنالیز هارمونیک-دامنه و فاز.

۱- مقدمه

منطقه مکران به عنوان یکی از مسیرهای تجاری اصلی در آسیا شناخته می شود. این منطقه به دلیل واقع شدن در نزدیکی دریای عمان و دریای عرب، دارای اهمیت بسیار زیادی از نظر تجاری و بین المللی است. این منطقه به عنوان یک مسیر اصلی برای تجارت بین کشورهای خاورمیانه، آسیا و اروپا استفاده می شود. منطقه مکران به عنوان یکی از مسیرهای ترانزیتی اصلی در جنوب شرق آسیا و خاورمیانه دارای اهمیت بسیار زیادی است. این منطقه به عنوان یک نقطه ترانزیتی برای حمل و نقل کالاها و انرژی از خلیج فارس به آسیا و اروپا اهمیت دارد. همچنین، نزدیکی این منطقه به دریای عرب و دریای هند واقع شده، که این منطقه را به یک مسیر ترانزیتی برای حمل و نقل دریایی تبدیل کرده است.

مکران دارای بندر مهمی مانند بندرعباس در ایران و گوادر در پاکستان است که به عنوان نقاط ورود و خروج کالاها و کشتی ها به و از منطقه، اهمیت زیادی دارند. همچنین، منطقه مکران دارای منابع طبیعی غنی از جمله نفت، گاز طبیعی، معادن و منابع دریایی است که تأثیر بسیار زیادی بر تجارت و اقتصاد منطقه دارد.

بنابراین، منطقه مکران به عنوان یک مسیر حیاتی برای تجارت بین المللی و تأمین انرژی برای کشورهای مختلف، اهمیت بسیار زیادی دارد و همواره مورد توجه قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی و استراتژیک دریای مکران به دلیل قرار گرفتن در خارج از محدوده خلیج فارس و تنگه هرمز باعث می شود که کمتر در معرض تنش های منطقه ای و بین المللی قرار بگیرد. بر خلاف محیط زیست خلیج فارس، دریای عمان و اقیانوس هند با پیوند دادن ما به آب های آزاد این امکان را فراهم می سازند که توان تحرک میان آب های اقیانوسی ایران افزایش یابد. آب های این منطقه به دلیل عمق استراتژیک ممتازی که دارند قدرت ایران را در برخورد با چالش های ژئواستراتژیک ارتقا می دهند؛ عمق استراتژیک که برخی از کشورهای منطقه از آن برخوردار نیستند. به همین دلیل است که در آینده ای نزدیک بیشتر از مکران خواهیم شنید.

نباید از اهمیت ژئواکونومیک مکران غفلت کرد، پایش منطقه مکران از نظر علم هیدروگرافی و نقشه برداری بسیار اهمیت دارد. این علوم به وسیله تجزیه و تحلیل اطلاعات دریایی، شناخت و تصویرسازی زیر آبی و ساحلی منطقه، اطلاعاتی ارائه می‌دهند که برای حفظ امنیت دریایی، تجارت بین‌المللی، مدیریت منابع دریایی و اقتصاد دریایی بسیار حائز اهمیت هستند. این اطلاعات شامل عوامل مختلفی مانند عمق آب، جریان‌ات دریایی، شکل زیر آبی ساحل و ... می‌شود که برای نقشه برداری و برنامه ریزی مناسب برای استفاده از منابع دریایی و تجارت، بسیار حائز اهمیت هستند. به عنوان یک مسیر تجاری اصلی، پایش و نقشه برداری دقیق منطقه مکران می‌تواند به بهبود تجارت بین‌المللی و اقتصاد منطقه کمک کند و همچنین به حفظ محیط زیست در این منطقه کمک کند. از نظر نظامی، منطقه مکران به عنوان یک ناحیه حساس در خاورمیانه شناخته می‌شود. این منطقه به عنوان یک نقطه استراتژیک برای کشورهای جنوب شرق آسیا و خاورمیانه اهمیت دارد و به عنوان یک ناحیه مورد توجه برای نظامیان و سیاستمداران جهان شناخته می‌شود. این منطقه دارای اهمیت استراتژیک برای کنترل منابع انرژی، تأمین امنیت دریایی و همچنین برای تأمین امنیت ملی کشورهای این منطقه است.

بنابراین، پایش و نقشه برداری دقیق منطقه مکران از نظر ترانزیت و نظامی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند به تأمین امنیت دریایی، حفظ حدود ملی و همچنین به بهبود تجارت بین‌المللی و اقتصاد منطقه کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

داده‌های مشاهده شده در سطح آب توسط مولفه‌های هارمونیک دامنه و فاز می‌توانند بیان شوند. قبل از تجزیه و تحلیل هارمونیک و پیش‌بینی، دانش در مورد دامنه پتانسیل نجومی، سرعت زاویه‌ای و فاز برای تمام امواج در نظر گرفته شده در تجزیه و تحلیل مورد نیاز است. به منظور انجام آنالیز هارمونیک جزر و مد، برنامه World-Tides توسط بون در سال ۲۰۰۴ توسعه داده شده است. این برنامه توسط زبان متلب برنامه‌نویسی شده و هدف آن آنالیز و پیش‌بینی مولفه‌های جزر و مدی با استفاده از آنالیز هارمونیک کمترین مربعات می‌باشد. به طور کلی از فرمول‌های زیر به منظور برآورد مولفه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

$$h(t) = h_0 + \sum_{i=1}^m f_j H_j \cos(\omega_j t + u_j - K_j^*)$$

$$\sum_{t=1}^n [h_t - h(t)]^2 = \min$$

$$h(t) = A_0 + \sum_{j=1}^m A_j \cos \omega_j t + \sum_{j=1}^m B_j \sin \omega_j t$$

$$A_0 = h_0, R_j = \sqrt{A_j^2 + B_j^2} = f_j H_j, \text{ and } \phi_j = \tan^{-1}\left(\frac{B_j}{A_j}\right) = k_j^* - u_j$$

ماتریس A_0, A_j, B_j از طریق روش تقریب کمترین مربعات بدست می‌آید.

آنالیز هارمونیک جزر و مدی به منظور بررسی تأثیرات این پدیده‌ها بر روی سواحل و دریاهاى مختلف انجام می‌شود. این آنالیز شامل تعیین فرکانس، دوره، ارتفاع و فاز جزر و مدی است. برای منطقه مکران، پارامترهای جزر و مدی به شکل زیر است:

با توجه به این پارامترها، می توان نتایج زیر را برای جزر و مدی منطقه مکران استنتاج کرد:

- جزر و مدی منطقه مکران دارای فرکانس نسبتاً بالایی است که حدود ۱/۸۶۶ دور در روز است. این فرکانس برای تولید انرژی دریایی قابل استفاده است.
- دوره جزر و مدی در منطقه مکران حدود ۱۲/۴ ساعت است که نشان می دهد که این پدیده هر روز دو بار رخ می دهد.
- ارتفاع جزر و مدی در منطقه مکران حدود ۲/۵ متر است که نسبت به بعضی مناطق دیگر کمتر است. با این حال، این ارتفاع همچنان قابل استفاده برای تولید انرژی دریایی است.
- فاز جزر و مدی در منطقه مکران حدود ۱۸۰ درجه است که نشان می دهد که این پدیده همزمان با جزر و مدی در سواحل شرقی ایران و غرب پاکستان رخ می دهد.

به طور کلی، جزر و مدی منطقه مکران دارای پارامترهای مناسبی برای تولید انرژی دریایی است. با این حال، نیاز به بررسی دقیق تر و تحلیل عوامل دیگری مانند شدت باد، جهت جریان دریا و دمای آب در منطقه نیز وجود دارد.

با توجه به نرم افزار پیش بینی متلب، مولفه های جزر و مدی زیر برای منطقه جاسک که یکی از مهم ترین مناطق منطقه مکران می باشد در جدول (۱) آمده است. دامنه و فاز با نرم افزار پیش بینی متلب به صورت جدول (۲) برآورد شدند.

جدول ۱- مولفه های جزر و مدی به دست آمده در مطالعه برای منطقه جاسک

PARAMETRS	MSL	MHWS	MHWN	MLWS	MLWN
Jask station	2.2025	3.2010	2.6438	1.2039	1.7611

جدول ۲- دامنه و فاز جزر و مدی پیش بینی شده با متلب

	M2	S2	K1	O1
Amplitude	0.7199	0.2786	0.4048	0.2184
Phase	158.9872	-170.8302	-17.9841	-17.3846

۳- نتیجه گیری

منطقه مکران دارای جزر و مدی با فرکانس حدود ۱/۸۶۶ دور در روز، دوره ۱۲/۴ ساعت، ارتفاع ۲/۵ متر و فاز ۱۸۰ درجه است. این پارامترها نشان می دهند که جزر و مدی در منطقه مکران دارای فرکانس و دوره مناسبی برای تولید انرژی دریایی هستند. با این حال، ارتفاع جزر و مدی در منطقه مکران کمتر از بعضی مناطق دیگر است، اما همچنان قابل استفاده برای تولید انرژی است. همچنین، فاز جزر و مدی در منطقه مکران همزمان با جزر و مدی در سواحل شرقی



ایران و غرب پاکستان رخ می‌دهد. به طور کلی، برای تحلیل دقیق تأثیرات جزر و مدی در منطقه مکران، نیاز به بررسی عوامل دیگری مانند شدت باد، جهت جریان دریا و دمای آب در منطقه وجود دارد.

۴- منابع

- Madah, Fawaz A. "The amplitudes and phases of tidal constituents from Harmonic Analysis at two stations in the Gulf of Aden." *Earth Systems and Environment* 4.2 (2020): 321-328.
- Guo, Zheng, et al. "A harmonic analysis method adapted to capturing slow variations of tidal amplitudes and phases." *Continental Shelf Research* 164 (2018): 37-44
- Heath, R. A. "Phase distribution of tidal constituents around New Zealand." *New Zealand journal of marine and freshwater research* 11.2 (1977): 383-392.

بررسی کاربرد های بلاک چین در اینترنت اشیا زیر آب

فاطمه قیّم، محمد اسماعیل دوست*، مقداد محمدی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: m_doust@kmsu.ac.ir

چکیده

اینترنت اشیا زیر آب¹ (IOU) با توجه به کاربرد های آن در زمینه محیط زیست، مدیریت منابع زیر آب، مباحث نظامی و بهره برداری و اکتشافات زیر آب در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. امنیت داده ها در زیر آب و سنسورهای حاوی اطلاعات دارای اهمیت قابل توجهی هستند و حفظ امنیت اطلاعات در این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار است. بلاک چین ها بدلیل ساختاری که دارند منجر به سهولت تامین این نیاز اساسی می گردند. امضای دیجیتال یکی از اجزای مهم در معماری بلاک چین است. به این گونه که کاربر دارای دو کلید است: کلید عمومی و کلید خصوصی. معاملات با امضای کلید خصوصی تضمین می شوند و این معامله امضا شده دیجیتالی در کل شبکه به اشتراک گذاشته می شود. کلید عمومی برای دسترسی به داده های موجود در معامله توسط کاربر مجاز استفاده می شود. از این رو، تولید امضای دیجیتال یک فرایند دو مرحله ای است که شامل فرایند امضا و تایید است. در این مقاله ضمن بررسی ارتباطات زیر آب و ساختار کلی بلاک چین، کاربردهای بلاک چین در ارتباطات زیر آب مورد بررسی قرار می گیرد.

کلید واژه: ارتباطات زیر آب، بلاک چین، ارتباط امن، قابلیت اعتماد، اکو سیستم دریایی

۱. مقدمه

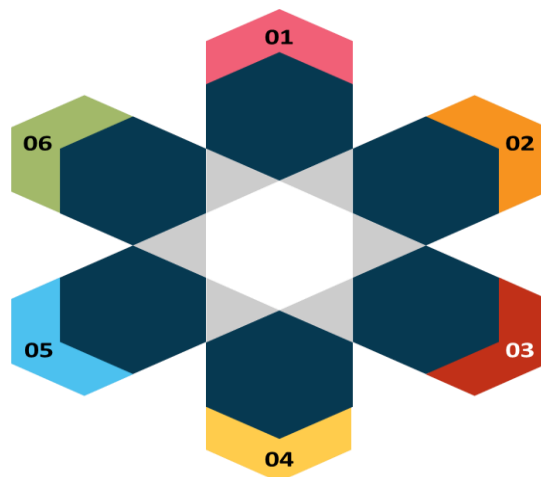
قابل اعتماد بودن دستگاه های هوشمند اینترنت اشیا زیر آب با رشد قابل توجهی از تکنولوژی² IoT، دستگاه های سنسور بیشتر و بیشتر معرفی می شوند که برای ساخت شبکه ارتباطات داده استفاده می شود. همانند اینترنت اشیا، اینترنت اشیا زیر آب دارای چندین دستگاه هوشمند تعبیه شده با سنسورها است. این سنسورها که شبکه حسگر بی سیم زیر آب نامیده می شوند برای ارتباطات داده در زیر آب توسعه یافته و مورد استفاده قرار می گیرند. داده های تولید شده از این دستگاه های حسگر بی سیم زیر آب ممکن است برای برنامه های مهم مانند دفاع بسیار حساس باشد. الگوریتم اجماع فرایند تصمیم گیری برای گروهی از گره های فعال در شبکه ارتباطی است در حالی که معاملات قابل اعتماد در بلاک چین را ایجاد می کند (۱).

در دسترس بودن داده ها در بلاک چی از مکانیسم تحمل خطا استفاده می کند و یک شبکه موثر برای در دسترس بودن داده های منتقل شده از طریق دستگاه های IoU ایجاد می کند. ساختار غیر متمرکز و توزیع شده بلاک چین یک ویژگی بسیار مهم برای تایید در دسترس بودن داده ها به طور مداوم است. این ویژگی بلاک چین برای در دسترس قرار دادن داده ها برای اقیانوس شناسان برای انجام تجزیه و تحلیل تحقیقات و تحقیقات خود در راحتی آنها حیاتی است. فروشگاه های سیستم غیر متمرکز اطلاعات در سراسر جهان پخش می شود به طوری که هیچ نقطه ای از شکست وجود ندارد. این با ذخیره سازی داده های بلاک چین در میلیون ها دستگاه در شبکه توزیع شده گره ها به دست می آید. از این رو، داده ها و شبکه در برابر هر گونه حمله مخرب یا نقص فنی در شبکه بسیار مقاوم هستند. به همین دلیل، در دسترس بودن داده ها در شبکه ارتباطی اینترنت اشیا زیر آب ادغام شده با بلاک چین امکان پذیر است.

¹ Internet of Underwater Things

² Internet of Things

همچنین حریم خصوصی داده ها در اینترنت اشیاء زیر اب یکی دیگر از مهم ترین دلایل این ادغام است چراکه منجر به این شده که مهاجمان نتوانند از داده ها سوء استفاده کرده یا آن ها را به دست آورند، همچنین کاربران می توانند داده های خود را با کلیدهای خصوصی و عمومی در یک معامله بلاک چین کنترل کنند، در نتیجه مالکیت بر داده ها مکان پذیر می شود. صاحبان داده ها می توانند کنترل کنند که چه زمانی، چگونه و تا چه حد شخص ثالث می تواند به داده ها دسترسی داشته باشد. بنابراین حریم خصوصی داده های تولید شده از دستگاه های اینترنت اشیاء زیر اب می تواند با تکنولوژی بلاکچین حفظ شود.



شکل ۱- ویژگی های برجسته تکنولوژی بلاکچین

۲. مرور بلاک چین

در این بخش به مرور کلی بلاک چین و بررسی ویژگی های آن می پردازیم (۷). بلاک چین یک شبکه دائمی و غیر قابل تغییر است که هیچ شانس برای تغییر گره ها در شبکه وجود ندارد. شبکه بلاک چین دارای چندین گره است که به یکدیگر زنجیر شده اند و هر گره یک کپی از دفتر کل دیجیتال را در شبکه حفظ می کند. از این رو، هر معامله ای که در شبکه آغاز می شود، تایید و تایید می شود که در دفتر کل گنجانده شود. در نتیجه، دستکاری داده های ذخیره شده در هر معامله بسیار غیرممکن است، زیرا آنها به شدت توسط گره های شبکه داده شده محافظت می شوند. این باعث می شود شبکه بسیار شفاف و امن باشد و معاملات موفق را با اجماع تمام گره های شبکه ایجاد کند. بنابراین، به هر کسی اجازه می دهد تا معاملات را مشاهده کند، اما دسترسی به ویرایش یا تغییر داده ها در معاملات را نمی دهد.

۱. **تمرکز زدایی:** چارچوب تحت یک مقام واحد عمل نمی کند؛ در عوض، مجموعه ای از گره ها در مدیریت و نگهداری شبکه بلاک چین دخیل است. این شبکه در یک شبکه همتا به همتا مستقر شده است و هر گره را قادر می سازد تا بر خلاف سیستم بانکی معمولی، یک کپی از دفتر کل دیجیتال داشته باشد. از این رو، هزینه هک کردن چنین شبکه غیر متمرکز گران تر است و آن را به یکی از مهمترین ویژگی های تکنولوژی بلاک چین تبدیل می کند.

۲. **قراردادهای هوشمند:** بلاک چین معاملات را با استفاده از اصل قرارداد هوشمند سریعتر انجام می دهد. قراردادهای هوشمند دیجیتال را اجرا کنید قراردادهایی که به صورت خودکار معاملات را اجرا می کنند زمانی که شرایط و توافق نامه های خاصی برای معامله فعلی برآورده می شود.

۳. پروتکل اجماع مکانیسم: تحمل خطا است که در آن گره ها در شبکه همتا به همتا به یک توافق مشترک در مورد وضعیت فعلی معاملات در شبکه می افزایند. این امر قابلیت اطمینان داده ها و قابل اعتماد بودن معاملات را در میان گره های بلاک چین تضمین می کند. پروتکل اثبات کار، پروتکل اجماع قدرتمند است که به طور گسترده در خدمات بانکی و سایر برنامه ها استفاده می شود. این پروتکل تضمین می کند که بلوک جدید با حل پازل های پیچیده و محاسباتی برای جلوگیری از معاملات غیر قابل اعتماد ایجاد می شود.
۴. شفافیت: شبکه بلاک چین شفافیت بی نظیری را ارائه می دهد که راه حل های پیشرفته امنیت داده ها را تضمین می کند. از این رو، هر معامله ای که در شبکه غیر متمرکز انجام می شود توسط اکثر گره های شبکه تایید می شود. بنابراین، هر معامله به روز شده می تواند توسط کاربر در هنگام مدیریت شفافیت در شبکه مشاهده شود.

۳. کاربردهای بلاکچین در اینترنت اشیا زیر آب

۳-۱. نظارت بر محیط زیست

نظارت بر کیفیت آب شامل نقش سنسورهای اینترنت اشیا زیر آب در انتقال داده ها به عنوان تغییرات صدا است. سیگنال های صوتی که برای ارتباطات زیر آب استفاده می شود، تاخیر انتشار بالا و نرخ خطای بالا را مصرف می کند. علاوه بر این، سنسورها در یک محیط متضاد مستقر می شوند که بدون مراقبت باقی می ماند و ارتباطات زیر آب را در برابر حملات خارجی آسیب پذیرتر می کنند. به منظور ایمن سازی سنسورها از قرار گرفتن در معرض چنین حملاتی، یک معماری سلسله مراتبی چند لایه مبتنی بر بلاک چین استفاده میشود این معماری فرایند نظارت و مدیریت داده های اینترنت اشیا زیر آب را ساده کرد. بر اساس سر خوشه انرژی باقی مانده، گره های سنسور خوشه ای و سازمان یافته بودند. ردیابی گره ها و سر خوشه ها توسط یک فیلتر بلوم انجام شد و از دو کلید برای برقراری ارتباط استفاده شد. کلید مخفی استاندارد برای دروازه ها برای برقراری ارتباط استفاده شد و یک کلید مخفی خاص برای برقراری ارتباط برای سر خوشه ها فعال شد. علاوه بر این، دفتر کل بلاک چین به ذخیره داده های مسیردار کمک کرد. چارچوب سبک وزن بلاکچین به مشروعیت منابع داده کمک میکند. سنسورهای مستقر در زیر آب برای نظارت بر کیفیت مستعد حملات هستند و احتمال نشت اطلاعات وجود دارد. این در درجه اول به دلیل عدم وجود ویژگی های امنیتی در محیط زیر آب است. یک معماری سلسله مراتبی چند لایه، امنیت را به گره های اینترنت اشیا زیر آب ارائه می دهد. این سیستم به طور قابل توجهی در حفاظت از سنسورهای مستقر در زیر آب، تامین امنیت انتقال داده ها و سازماندهی شبکه ها در محیط زیر آب کمک می کند. (۱ و ۲).

از آنجا که اینترنت اشیا زیر آب به سنسورهای زیر آب برای مصرف اطلاعات اقیانوس در زمینه اقیانوس های هوشمند متکی هستند اطلاعات اقیانوسی به دست آمده از گروه سنسورها برای انجام تجزیه و تحلیل هایی مانند نظارت بر کیفیت آب، نظارت بر اکوسیستم دریایی، نظارت بر الودگی آب نیکار می رود. از این رو، ایجاد و ارائه یک پلت فرم که به کاربران اجازه بدهد تا به طور موثر داده های اینترنت اشیا زیر آب را در محیط های ناامن به اشتراک بگذارند و ذخیره کنند، بسیار مهم است.

۳-۲ مدیریت بحران

گردانندگان اورژانس یک فاجعه را در چهار مرحله اداره می کنند: آمادگی، پاسخ، کاهش و بهبودی. حوادثی که در آب رخ می دهد بسیار خطرناک است. این ممکن است منجر به از دست دادن زندگی انسان و سایر موجودات زنده در آب شود (۳)



برنامه های اینترنت اشیا زیر اب نقش مهمی در هر چهار مرحله از چنین شرایط اضطراری ایفا می کنند. همچنین این تکنولوژی توانایی حس کردن مکان ها در شرایط زیر اب را نیز دارد. ابه دین صورت که می تواند داده ها را به صورت محلی پردازش کرده و همان را از طریق یک مرکز ارتباطی زیر اب موجود در اینترنت اشیا زیر اب به ایستگاه پایه منتقل کند. سنسورهای لرزه ای را می توان در زیر اب برای تشخیص حرکت زمین در هنگام هر گونه اختلال تکان داد. اطلاعات دریافت شده از سنسورهای زیر اب باید به اندازه کافی قابل اعتماد برای تجزیه و تحلیل بیشتر و فعالیت های کمتر باشد. تمام اقدامات در یک فاجعه به اطلاعاتی که توسط سنسور منتقل می شود بستگی دارد. اینترنت اشیا زیر اب از سیگنال های صوتی برای ارتباطات زیر اب استفاده می کند. در محیط ها و شرایط طبیعی، صدای منتشر شده تحت تاثیر دمای زیر اب، تراکم پوشش گیاهی، رطوبت و صداهای مختلف دیگر منتشر شده توسط موجودات زنده در زیر اب قرار می گیرد. علاوه بر عوامل فوق، فعالیت های انسانی مانند صنعتی شدن و صداهای کشتی ها نیز می تواند بر سیگنال تاثیر بگذارد. این امر منجر به شکست ارتباطات یا شکست در پیش بینی یک فاجعه می شود. از این رو، این ارتباط باید به اندازه کافی امن باشد که در آن اطلاعات منتقل شده توسط دستگاه ها به موقع و بدون اصلاح ناخواسته به ایستگاه پایه می رسد. در نتیجه پژوهشگران پیشنهاد استفاده از توابع اساسی بلاک چین مانند اضافه کردن بلوک ها، اعتبار سنجی بلوک و اجرای طولانی ترین قانون زنجیره ای را پیشنهاد کردند. هر زنجیره ای که با بلاک چین ایجاد می شود شامل یک سیستم دفتر کل برای ذخیره اطلاعات است. دفتر کل یک ساختار بلوک فقط ضمیمه است که به هیچ اجازه نمی دهد بلوک را پس از اضافه شدن به زنجیره حذف یا اصلاح کند. از طریق بلاک چین، ارتباطات زیر اب می تواند قابل اعتماد باشد و اقدامات فوری برای جلوگیری از بلایای طبیعی انجام شود. بنابراین یکپارچگی اطلاعات تولید شده توسط سنسورهای زیر اب می تواند با استفاده از راه حل های مبتنی بر بلاک چین حفظ شود. این امر به انجام اقدامات درست با پیش بینی بلایایی که می تواند در محیط اقیانوسی رخ دهد، کمک می کند. (۴)

۳-۳. محلی سازی

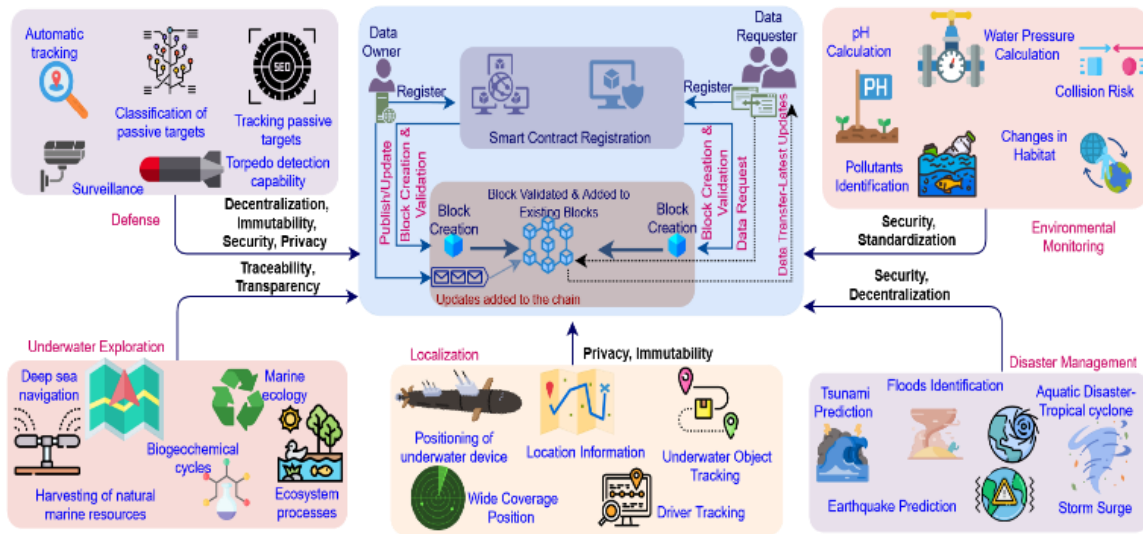
قرار دادن دستگاه های زیر اب و سایر منابع داده یک نیاز کلیدی برای هر برنامه زیر اب مبتنی بر مکان است. از آنجا که پارامترهای محیط های زمینی و زیر اب در جنبه های مختلف متفاوت است، سیستم های اتخاذ شده برای محلی سازی اشیا زمینی ممکن است به خوبی متناسب با نیازهای سیستم های زیر اب نباشد. تحقیقات گسترده ای در زمینه محلی سازی اشیا زیر اب انجام شده است. اثر طبقه بندی و ویژگی های تحرک، محلی سازی گره های سنسور زیر اب را به یک کار چالش برانگیز برای رسیدن به آن تبدیل می کند. به غیر از این، امنیت و حریم خصوصی چالش های کلیدی مرتبط با محلی سازی گره های زیر اب است، به ویژه به دلیل شرایط سخت محیطی. از آنجا که اکثر طرح های محلی سازی برای محیط های مناسب طراحی شده اند، احتمال نقض حریم خصوصی وجود دارد که ممکن است منجر به عواقب جدی، به ویژه در برنامه های مهم مأموریت شود. بلاک چین را می توان به عنوان یک راه حل موثر برای مقابله با جنبه های حریم خصوصی مربوط به محلی سازی در محیط های زیر اب به دلیل ویژگی های منحصر به فرد آن مانند تمرکز زدایی، اجماع و امنیت در نظر گرفت. مشارکت شخص ثالث می تواند به طور کامل حذف شود اگر تکنولوژی بلاک چین بتواند با اینترنت اشیا زیر اب ادغام شود. این امکان را فراهم می کند که داده ها به طور ایمن و بدون نیاز به هیچ واسطی ذخیره شوند. داده های تولید شده از طریق دستگاه ها به اینترنت اشیا زیر اب ارسال و با کمک مکانیسم های بلاک چین پردازش و تایید می کنند. مسائل مربوط به حریم خصوصی داده ها مربوط به موقعیت دستگاه های زیر اب می تواند به طور موثر با کمک تکنولوژی بلاک چین حل شود. تمرکز زدایی، اجماع و جنبه های امنیتی بلاک چین در درجه اول اطمینان حاصل می کند که حریم خصوصی داده ها مورد سوال قرار نمی گیرد. این امر برنامه های مبتنی بر مکان را قادر می سازد تا بلاک چین را در سیستم موجود اتخاذ کنند. طرف مقابل استفاده از بلاک چین در شبکه های سنسور زیر اب، تقاضای بی پایان آن برای قدرت، حافظه و محاسبات است. بلاک چین می تواند با موفقیت با که اینترنت اشیا زیر اب ادغام شود تنها در صورتی که گره های سنسور زیر اب قادر به ارائه جنبه های فوق با هزینه کم باشند.

۴-۳. دفاع

دفاع دریایی یکی از این بخش‌هایی است که با روی گشاده‌مزایای که اینترنت اشیا زیر اب را پذیرفته است. که اینترنت اشیا زیر اب یک سیستم به هم پیوسته از دستگاه‌های محاسباتی است که به بهبود بهره‌وری و کارایی داده‌های ارتباطی بین وسایل نقلیه مبتنی بر اب مانند کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، هواپیماهای بدون سرنشین و سایر کشتی‌های ابی کمک می‌کند. ارتباطات از مناطق دور افتاده بین که اینترنت اشیا زیر اب و پهپاد می‌تواند تهدیدات آسیب‌پذیری را تسهیل می‌کند، که در آن مجرمان سایبری دسترسی غیر مجاز به شبکه‌ها و دستگاه‌های متصل را به دست می‌آورند و در نتیجه داده‌های مهم را افشا می‌کنند. ماهیت ارتباطات توزیع شده شبکه اقیانوس، کاربران غیر مجاز را قادر می‌سازد تا با پیروی از شیوه‌های غیر اخلاقی به داده‌ها و اطلاعات دسترسی داشته باشند. معماری متمرکز اینترنت اشیا زیر اب در چنین مواردی در ارائه راه حل‌های امن و کارآمد کافی نیست. بلاک چین یک تکنولوژی پیشرفته است که برای تامین امنیت و ردیابی برنامه‌های کاربردی در زمان واقعی و داده‌های آنها استفاده می‌شود. این یک تکنولوژی امیدوارکننده است که از فرایند به اشتراک‌گذاری اطلاعات و دسترسی استفاده می‌کند جنبه تبادل داده‌ها در میان گروه‌های شرکت‌کننده در محیط اینترنت همچنین امن و تغییرناپذیر بودن اطلاعات در این محیط این اطمینان را حاصل می‌کند که این اطلاعات بدون ذره‌ای تغییر و دقیق به پایگاه اطلاع‌رسانی انتقال یابد همچنین در محیط IOUT فعال شده با بلاک چین، ساختار غیر متمرکز بلاک چین استفاده می‌شود، که در آن تمام گروه‌های شرکت‌کننده یک کپی از معامله را به اشتراک می‌گذارند و از این رو شفافیت حفظ می‌شود. علاوه بر این، ویژگی‌های رمزنگاری مانند هش، امضای دیجیتال و کلیدهای عمومی و خصوصی، بلوک داده را قادر می‌سازد تا به طور ایمن با بلوک‌های دیگر ارتباط برقرار کند و بنابراین تغییرناپذیری داده‌ها را تضمین می‌کند. یکی دیگر از جنبه‌های مهم ارتباطات زیر اب در دفاع، ردیابی است. هر دستگاه یا وسیله نقلیه در شبکه با یک شناسه مرتبط است که کاربر را قادر می‌سازد معاملات را ردیابی کند و قراردادهای هوشمند تولید کند. قراردادهای هوشمند در میان دستگاه‌ها و زیر سیستم‌های مختلف در برنامه به اشتراک گذاشته می‌شوند. هر وظیفه در سیستم عملیات خود را با استفاده از قراردادهای هوشمند انجام می‌دهد. مزایای IOUT یکپارچه شده با بلاک چین در کاربردهای دفاعی در اقیانوس‌ها چند برابر است.

۵-۳. اکتشاف زیر اب

اکتشاف زیر اب یک موضوع جالب و چالش برانگیز است که به مدیریت، حفظ، تنظیم و استفاده از منابع اقیانوس کمک می‌کند که به ویژه برای اقتصاد کشور و رفاه شهروندان مهم است. با ادغام تکنولوژی بلاک چین و اینترنت اشیا زیر اب می‌توان اکتشاف منابع زیر اب را به شیوه‌ای امن، شفاف و قابل ردیابی امکان پذیر می‌کند. ویژگی تغییرناپذیری بلاک چین در درجه اول تضمین می‌کند که داده‌ها، هنگامی که ابلود می‌شوند، نمی‌توانند دستکاری شوند. این امر به ویژه به تضمین اینکه منابع زیر اب کشف شده مورد سوء استفاده قرار نمی‌گیرند، کمک می‌کند. برای مثال ویژگی‌های ردیابی و شفافیت بلاک چین ان را به یک انتخاب بهینه حتی برای ردیابی ماهی تن تبدیل می‌کند. ماهیگیری غیرقانونی و گزارش نشده را می‌توان تا حد زیادی با کمک تکنولوژی بلاک چین کاهش داد. حتی اگر اکتشافات زیر اب در مقیاس بزرگ به اقتصاد کشورها کمک کند، تحقیقات در مورد ادغام فن‌آوری‌های پررونق مانند بلاک چین و اینترنت اشیا زیر اب همچنان در حال بررسی و مطالعه است. شکل ۲ موارد استفاده اینترنت اشیا زیر اب ادغام شده با بلاک چین را نشان می‌دهد.



شکل ۲- موارد استفاده بلاک چین در اینترنت اشیا زیر آب

۴. نتیجه گیری

از آنجایی که بلاک چین بخش عمده ای از آینده اینترنت جهان را در بر دارد، میتوان در نظر گرفت که پتانسیل تغییر نحوه کار سیستم های اقتصادی و اجتماعی فعلی را نیز دارد. ویژگی های منحصر به فرد بلاک چین به حفاظت از دارایی ها، پذیرش ارزش های رمزنگاری شده، قراردادهای هوشمند، رای گیری و غیره کمک می کند و این ثابت می کند که در اکوسیستم اینترنت اشیا زیر آب نیز سودمند است. این مقاله زمینه مربوط به اینترنت اشیا زیر آب و بلاکچین را معرفی کرد و توضیح داد که چنین ادغامی چه کاربردهایی را در بر دارد.

۵. منابع

- (1) Sweta Bhattacharya, et al., 2022, "Blockchain for Internet OF Underwater Things: State-of-the-Art, Applications, Challenges, and Future Directions", 14, 1-21.
- (2) Schinckus, C. A Nuanced perspective on blockchain technology and healthcare. *Technol. Soc.* 2022, 71, 102082
- (3) Uddin, M.A.; Stranieri, A.; Gondal, I.; Balasurbramanian, V. A lightweight blockchain based framework for underwater iot. *Electronics* 2019, 8, 1552.
- (4) Razzaq, A. *Blockchain-Based Secure Data Transmission for Internet of Underwater Things*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; SSRN 4127827.
- (5) Higuchi, A. Toward more integrated utilizations of geostationary satellite data for disaster management and risk mitigation. *Remote Sens.* 2021, 13, 1553.
- (6) Wang, Q.; Guo, S.; Yiu, K.F.C. Distributed Acoustic Beamforming with Blockchain Protection. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 7126–7135.
- (7) Abdelmaboud, A.; Ahmed, A.I.A.; Abaker, M.; Eisa, T.A.E.; Albasheer, H.; Ghorashi, S.A.; Karim, F.K. Blockchain for IoT Applications: Taxonomy, Platforms, Recent Advances, Challenges and Future Research Directions. *Electronics* 2022, 11, 630.

بررسی میزان کاهش تولید آلاینده های دیزل در یک کشتی با نصب پنل خورشیدی و شبیه سازی به کمک نرم افزار HOMER

احسان عباسیان*، محسن عنایتی راد

۱. سازمان صنایع دریایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: Ehsan.abbasian@gmail.com

چکیده

بیشترین هزینه در یک کشتی که بیش از ۵۰ درصد کل هزینه ها را به خود اختصاص می دهد مربوط به هزینه سوخت آن کشتی است. به عنوان مثال یک کشتی نفتکش ۳۲۰ هزار تنی روزانه بالغ بر ۱۰۰ تن سوخت مصرف می کند در نتیجه کاهش هزینه سوخت نیز نقش بسزایی در کاهش هزینه کشتی خواهد داشت. در این مقاله یک کشتی نفتکش که دارای پنل های خورشیدی، اتاق باتری و دیزل می باشد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از این رو طی یک سناریو بررسی می گردد که اگر شناور دارای پنل های خورشیدی باشد در مقایسه با زمانی که فاقد پنل خورشیدی مقدار تولید آلاینده های سالانه چقدر تاثیر خواهد داشت.

کلید واژه: کشتی هیبریدی، کشتی سولار، کشتی خورشیدی، پنل های خورشیدی، بهینه سازی برق کشتی ها.

۱. مقدمه

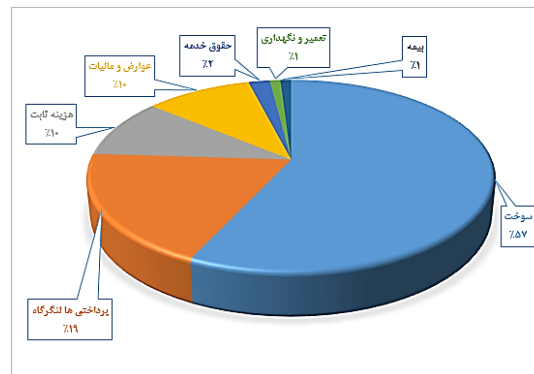
استفاده از انرژی خورشید؛ ممکن است که هزینه سرمایه گذاری را افزایش دهد و سیستم قدرت را به دلیل عدم اطمینان در تولید دائمی از انرژی خورشیدی، ناپایدار کند، ولی استفاده از یک اتاق باتری در کنار آن یکی از موثرترین راه حل ها برای بالابردن قابلیت اطمینان این چنین سیستم هایی است. در این سیستم هیبریدی، باتری ها توسط پنل های خورشیدی شارژ می گردند و در زمان مورد نیاز برای مصرف کننده ها، استفاده می گردند. پنل خورشیدی نیز میتواند در طول روز باتری را شارژ کرده تا در زمانی دیگر بتوان از انرژی آن باتری ها بهره برداری کرد.

۱-۲. بیان مساله

مطابق شکل (۱) هزینه سوخت و سایر هزینه های یک کشتی تجاری و نفتکش ۵۰ هزار تنی را نسبت به کل هزینه های جاری آن نشان داده میشود. همان گونه که دیده میشود بیشترین هزینه در یک کشتی که بیش از ۵۰ درصد کل هزینه ها را به خود اختصاص می دهد مربوط به هزینه سوخت آن است که کاهش این هزینه نیز نقش بسزایی در کاهش هزینه کل آن خواهد داشت.

۱-۳. داده های محاسباتی

تحقیقات انجام شده در این مقاله بر روی این کشتی نفتکش (با ابعادی مطابق کشتی نفتکش ایرانی داور) صورت گرفته است. این نفتکش دو جداره، ۳۳۳ متر طول، ۶۰ متر عرض، ۳۰/۵ متر ارتفاع، ۲۱ متر آبخور و معادل دو میلیون بشکه ظرفیت دارد؛ متوسط سرعت این کشتی در زمان بار ۱۶ نات است؛ فضای قابل نصب پنل خورشیدی دک باز در این کشتی حدوداً ۲۰۰۰ مترمربع در نظر گرفته می شود.



شکل ۱- نسبت هزینه سوخت و سایر هزینه های یک کشتی تجاری و نفتکش ۵۰ هزار تنی نسبت به کل هزینه های جاری

سناریو حرکتی کشتی به این صورت مفروض است که تردد این کشتی از مبدا (خلیج فارس تنگه هرمز - جزیره هرمز) به مقصد (کشور کویت) صورت پذیرد. این تردد در مجموع (رفت و برگشت) به مدت یک ماه به طول می انجامد. همچنین مفروض است این کشتی چهار بار در سال (در هر فصل در طول یک ماه^۱) این مسیر را طی می کند. در این صورت، مجموع کل ساعات شبیه سازی که کشتی در حالت عملیاتی و فعال می باشد شامل ۲۸۸۰ ساعت در سال است. در سایر ساعات فصول مفروض است که کشتی در لنگرگاه توقف کرده باشد از برق شهری یا اصطلاحاً برق ساحل استفاده می کنند. در نتیجه هیچ توانی از تولید کنندگان انرژی در کشتی مانند دیزل ژنراتور، باتری یا پنل های خورشیدی اخذ نمی شود. همچنین فرض می گردد زمان حرکت کشتی از هر ایستگاه به ایستگاه بعدی ۳ روز به طول انجامد. با توجه به محاسبات و بررسی انجام شده میزان مجموع انرژی ماهانه تابشی در بازه ۱۰ ساله در این مسیر حرکتی، تقریباً یکنواخت بوده است و تغییرات کمی را داشته است. از این رو اطلاعات سالانه مربوط به پارامترهای جوی و تابشی خورشید را در یکی از سال ها را به عنوان نمونه در ادامه مورد استفاده قرار می دهیم.

مفروض می باشد که زاویه نصب پنل ها به نحوی می باشد که حداکثر توان را جذب می کند. این عمل در واقعیت با نصب MPPT^۲ محقق می گردد. این اطلاعات از طریق داده های ماهواره ای یا اندازه گیری های منطقه ای گردآوری میشوند. این داده ها به طرق مختلف و الگوریتم های متفاوت اندازه گیری می شوند [۱] و اطلاعات تابشی را در دیتابیس هایی ذخیره می کنند. نرم افزارهایی همچون HOMER از طریق ارتباط با این نوع دیتابیس ها نیز اطلاعات را دریافت و شبیه سازی می کنند. با توجه به ابعاد کشتی غول پیکر نفتکش، فضای قابل دسترس بر روی عرشه ی این کشتی جهت نصب پنل خورشیدی ۲۰۰۰ متر مربع محاسبه شده است. مساحت هر پنل خورشیدی بر اساس اطلاعات مندرج در کاتالوگ پنل به شرح ذیل قابل محاسبه است:

$$A_{pv} = L_{mm} * W_{mm} = 1956 * 992 * 10^{-6} = 1.94m^2$$

تعداد پنل قابل نصب ۱۰۰۰ عدد و طبق رابطه ذیل ۳۵۰ وات محاسبه می گردد. پس پنل خورشیدی مد نظر جهت نصب بر روی کشتی از برند شرکت SHARP و مونو کریستال و با توان 340 وات انتخاب می گردد.

$$P_{pv(t)} = Y_{pv} f_{pv} \left(\frac{G_{T(t)}}{G_{T.STC}} \right) \left[1 + \alpha_P (T_{C(t)} - T_{C.STC}) \right]$$

^۱ ماه های خرداد - شهریور - آذر - اسفند مفروض شده اند

^۲ Maximum power point tracking

با توجه به میزان پروفیل بار مصرفی کشتی که بین ۵۰۰ تا ۱۷۵۰ کیلو وات در ساعت متغیر می باشد محاسبه میشود که تعداد باتری های کشتی ۵۰۶ شاخه موازی باتری است که در هر شاخه ۲ عدد باتری سری شده است در نتیجه کل باتری های کشتی که به تعداد ۱۰۱۲ عدد باتری می باشد قادر خواهد بود حدوداً ۳.۵ ساعت حداقل بار مصرفی کشتی را که معادل ۵۰۰ کیلووات می باشد را به تنهایی تغذیه کنند فرض می گردد باتری ها بیشتر از ۷۵٪ تخلیه نشوند^۱ یا اینکه فرض می گردد همیشه باتری ها دارای حداقل ۲۵٪ شارژ باشند^۲.

$$\min c_{battery} = \frac{P^{wh/day} * day}{v_{battery} * DOD} = \frac{(500000 * 24) * \frac{3.5}{24}}{24 * 0.75} = 97222Ah$$

$$n_{parallel battery} = \frac{c^{total}}{c_{battery}} = \frac{97222}{192} = 506$$

$$N_{total battery} = 506 * 2 = 1012 \text{ عدد}$$

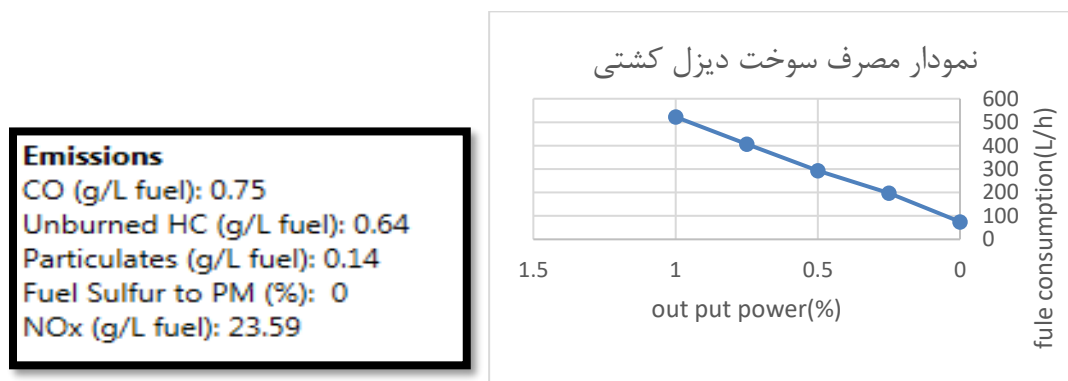
کل توان خروجی باتری ها بر حسب KWh به شرح ذیل محاسبه می گردد:

$$\begin{aligned} energy_{total battery} &= (Max capacity_{Ah} * n_{parallel battery}) * (V_{battery} * n_{series battery}) \\ &= 192 * 506 * 12 * 2 = 2331kwh \end{aligned}$$

توان قابل استحصال از باتری ها به شرح ذیل می باشد:

$$P_{min.battery} < P_{battery} < P_{max.battery} = 583kwh < P_{battery} < 2331kwh$$

دیزل ژنراتور مورد استفاده در این کشتی مدل Cat® C175-16(DM8721) می باشد. مطابق داده های فوق، منحنی مصرف سوخت دیزل و میزان آلاینده های تولیدی آن مطابق شکل (۲) نمایش داده می شود.



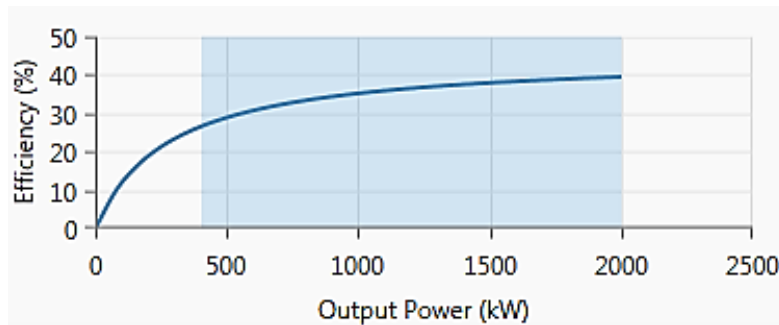
شکل ۲- منحنی مصرف سوخت دیزل و میزان آلاینده های تولیدی آن

منحنی راندمان دیزل ژنراتور بر اساس اطلاعات شرکت سازنده مطابق شکل (۳) می باشد. همانگونه که در این منحنی دیده می شود راندمان ژنراتور در کمتر از ۲۰٪ بار نامی مقرون به صرفه نمی باشد. لذا در کل مراحل شبیه سازی فرض

¹ depth of discharge (DOD)

² State of charge (SOC)

بر این است که ژنراتور برای بارهای کمتر از ۲۰٪ خاموش شود مگر اینکه با کمبود تولید مواجه شویم که دیزل روشن شود و به شارژ باتری کمک کند. [۲]



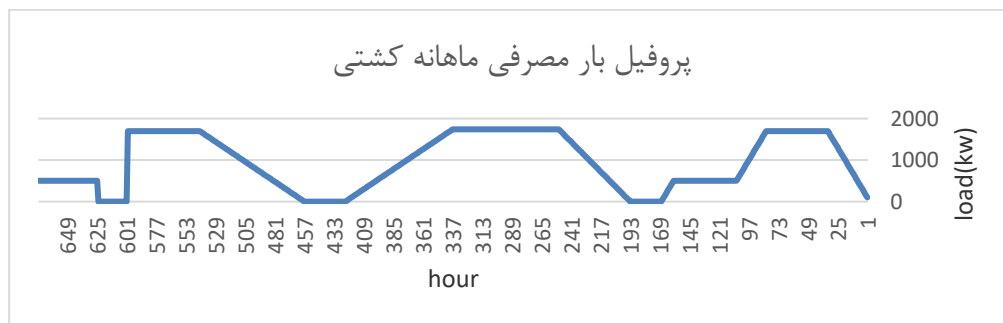
شکل ۳- منحنی راندمان دیزل ژنراتور

در نتیجه توان قابل استحصال از دیزل ژنراتور به شرح رابطه ی ذیل می باشد.

$$P_{min.diesel} < P_{diesel} < P_{max.diesel} = 400kw < P_{battery} < 2000kw$$

با توجه به توان خروجی باتری ها و پنل های خورشیدی اینورتر و کانورتر با حداکثر توان خروجی ۱.۳ مگا وات و راندمان ۹۵ درصد فرض می گردد.

بار کشتی در طول مسیر نیز به دلایل مختلف از جمله لنگر انداختن ، قرار گرفتن در مد تعمیرات، رفتن روی داک، پهلو گرفتن، حرکت یکنواخت در طول مسیر، افزایش سرعت به حاکت ماکزیمم، در مدار قرار گرفتن روشنایی و جک ها و پمپ ها و ... ممکن است دائما در حال تغییر باشد [۳]. شکل (۴) میزان بار مصرفی کشتی را نشان می دهد.



شکل ۴- میزان بار مصرفی کشتی

۲. تجزیه و تحلیل داده ها

داده های فوق را مطابق دو سناریو ذیل ، به کمک نرم افزار HOMER شبیه سازی می کنیم.

۲-۱. سناریو اول

در این حالت کلیه بار مصرفی در شناور، توسط دیزل ژنراتور تامین می گردد و هیچ یک از انرژی های باتری و خورشیدی در مدار نخواهند بود.

طبق کاتالوگ و مشخصات فنی دیزل ژنراتور مدل Cat® C175-16(DM8721) به ازای هر لیتر سوخت حاصل از گازوئیل ، گازهای سمی و مضر با مقادیر ذیل تولید می شوند:

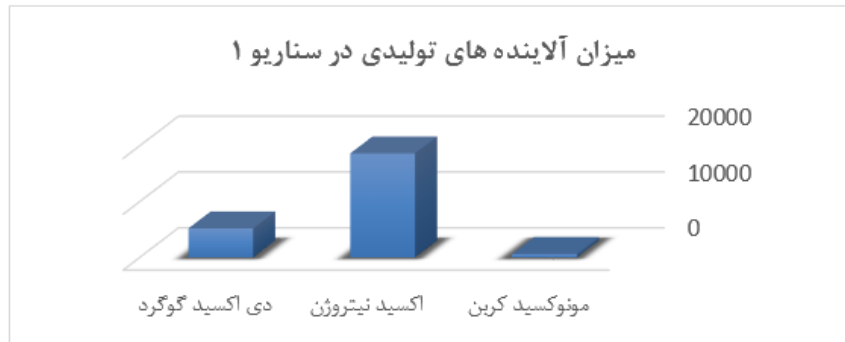
0.75 گرم بر لیتر گاز مونوکسید کربن (CO) - 23.59 گرم بر لیتر گاز اکسید نیتروژن (NO_x) - 6.555 گرم بر لیتر گاز دی اکسید گوگرد (SO_2)

در این صورت مطابق منحنی سوخت مصرفی سالانه دیزل در این سناریو میزان آلاینده ها به شرح ذیل خواهیم داشت. شکل (۳) نمودار میزان این آلاینده ها را نشان می دهد.

$$total\ emission\ CO\ out\ diesel = total\ liters\ diesel * 0.75(g/l) = 789466 * 0.75 = 592\ kg/year$$

$$total\ emission\ NO_x\ out\ diesel = total\ liters\ diesel * 23.59(g/l) = 789466 * 23.59 = 18623\ kg/year$$

$$total\ emission\ SO_2\ out\ diesel = total\ liters\ diesel * 6.555(g/l) = 789466 * 6.555 = 5174\ kg/year$$



شکل ۳- نمودار میزان این آلاینده ها در سناریوی اول

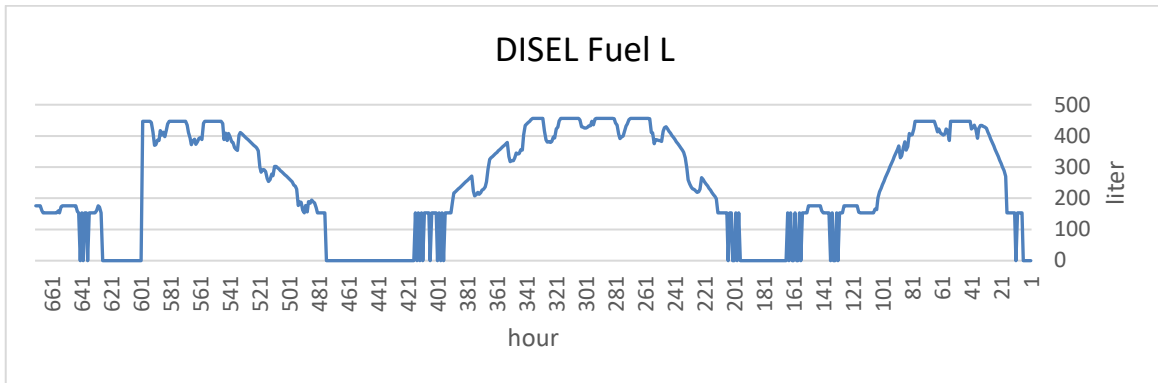
۲-۲ سناریو دوم

در این حالت مفروض است که ابتدا بار لحظه ای کل شناور توسط باتری تامین گردد تا زمانی که باتری شارژ داشته باشد این کار ادامه خواهد داشت سپس پنل خورشیدی باتری را شارژ خواهد کرد، در این حین که باتری توسط پنل شارژ می-گردد از باتری برای تامین توان خروجی استفاده نخواهد شد (به جهت افزایش طول عمر باتری ها) و پنل و دیزل نیز مجموعه توان مورد نیاز مصرفی را تامین می-کنند.

در این صورت دیزل ژنراتور فقط به اندازه بار مصرفی ($P_{out.Diesel}^{KW}(t) = P_{Load}^{KW}(t)$) توان تولید می کند. در این سناریو دیزل هیچ گاه بیشتر از مقدار مورد نیاز بار ، توان تولید نمی کند. دیزل زمانی که روشن است از ۲۰٪ حداکثر توان خود کمتر کار نمی-کند یعنی همیشه در مقداری بالای 400kw کار و توان تولید می-کند که این نیز به این دلیل است که راندمان دیزل در بارهای کمتر از ۲۵ درصد پایین می باشد و فعالیت دیزل در این محدوده کاری مقرون به صرفه نیست.

در نتیجه کل سوخت مصرفی در سال بر حسب لیتر به شرح ذیل می باشد و منحنی مصرف مطابق شکل (۴) می باشد.

$$total\ fule_{diesel} \cong \sum_{t=1}^{8760} (fue_{(t)}^{liters}) = 702108\ liters/year$$

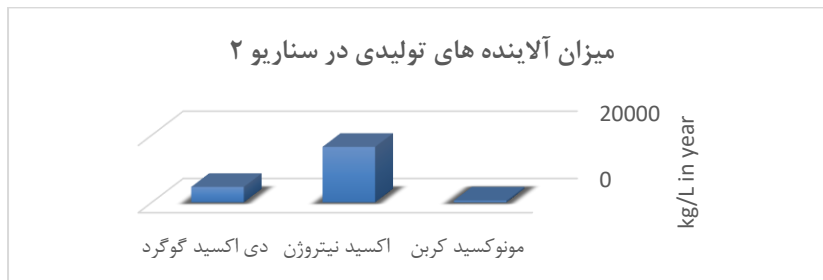


شکل ۴- منحنی مصرف در سناریو دوم

در این صورت مطابق منحنی سوخت مصرفی سالانه دیزل در این سناریو خواهیم داشت:

$$total\ emission\ CO\ out_{diesel} = 526\ kg/l, \quad total\ emission\ NO_x\ out_{diesel} = 16562\ kg/l, \quad total\ emission\ SO_2\ out_{diesel} = 4602\ kg/l$$

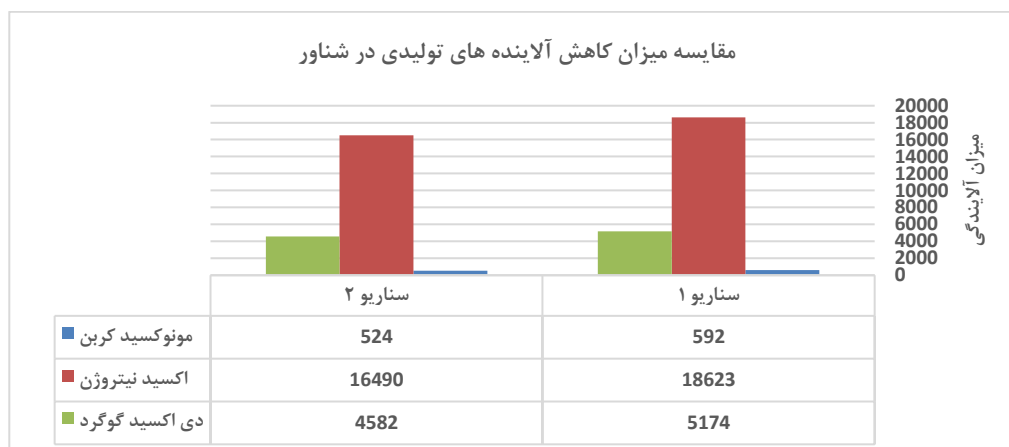
مجموع آلاینده های تولیدی در این سناریو مطابق شکل (۵) می باشد.



شکل ۵- مجموع آلاینده های تولیدی در سناریو دوم

۳- نتیجه گیری

با توجه به آمار و داده های محاسبه شده در بخش قبل و مقایسه مقادیر دو سناریوی مختلف به این نتیجه می رسیم که مطابق نتایج حاصل از شبیه سازی اگر از انرژی خورشیدی استفاده شود، دیزل سالانه ۲۹۰ ساعت کمتر از حالت عادی کار خواهد کرد. در این صورت اگر از انرژی خورشیدی استفاده شود، میزان مصرف سوخت دیزل سالانه ۹۰۴۰۸ لیتر کمتر خواهد بود و میزان آلاینده ها برای گاز مونوکسید کربن $70\ kg/l$ و برای گاز اکسید نیتروژن $2133\ kg/l$ و برای گاز دی اکسید گوگرد $592\ kg/l$ سالانه کاهش می یابد. شکل (۶) مقایسه را نشان می دهد.



شکل ۶- مقایسه میزان سوخت دیزل در دو سناریو

۵- منابع

[۱] Amillo, A., T. Huld and R. Müller (2014). "A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation." Remote sensing 6(9): 8165-8189.

[۲] How HOMER Creates the Generator Efficiency Curve." from https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_creates_the_generator_efficiency_curve.html.

[۳] Lan, H., S. Wen, Y.-Y. Hong, C. Y. David and L. Zhang (2015). "Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system." Applied energy 158: 26-34.

[۴] How HOMER Calculates the PV Array Power Output." from https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_the_pv_array_power_output.html.

تخمین پارامترهای دینامیکی حرکت پیچ گلايدر زیرسطحي از طريق شناسايی سیستم

علی حسنوند^۱، محمد سعید سیف^{۲*}

۱. دانشجوی مقطع دکتری، مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲. استاد تمام، مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: Ali.hassanvand@yahoo.com

چکیده

مدل دینامیکی و تخمین رفتار وسیله های دریایی نقش مهمی در طراحی سیستم های کنترل و هوشمندسازی آن ها دارد. دقت بالا در محاسبه ی ضرایب و پارامترهای مدل سبب بهبود طراحی کنترل کننده و تخمین رفتار دینامیکی وسیله می گردد. در این پژوهش سعی شده است براساس نتایج تست تجربی ضرایب و پارامترهای هیدرودینامیکی و دینامیکی یک نمونه گلايدر استخراج گردد. در ابتدا تست حرکت دندان اره ای یک نمونه گلايدر زیرسطحي به نام SUT با استفاده از کنترل کننده در استخر دانشگاه شریف صورت پذیرفته است. ورودی ها و خروجی ها در حین تست بر روی یک میکرو کنترل کننده Arduino ثبت شده تا در زمینه شناسایی سیستم مورد استفاده قرار گیرد. سیستم دینامیکی حرکت پیچ گلايدر به صورت یک سیستم مستقل در نظر گرفته شده و براساس ورودی ها و خروجی ها پارامتر سیستم با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی تخمین زده شده است. مدل در نظر گرفته شده برای شناسایی، یک مدل فضای حالت بوده است که بتوان با استفاده از روش شناسایی سیستم پارامترها را تخمین زد. در نهایت براساس نتایج آزمایشگاهی یک مدل خطی فضای حالت برای حرکت پیچ استخراج شد که دقت متناسبی برای مدل سازی رفتار حرکت پیچ گلايدر زیرسطحي دارد.

کلید واژه: شناسایی سیستم، حرکت پیچ، سیستم کنترلی، گلايدر زیرسطحي.

Estimation of dynamic parameters for pitch motion of underwater glider through system identification

Ali Hassanvand¹

Mohammad Saeed Seif^{*2}

1 PhD student, Marine Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

2 Professor, Marine Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

* Corresponding Author E-mail: Ali.hassanvand@yahoo.com

Abstract—The dynamic model and the estimation of marine dynamic behavior have a crucial role in designing control systems and their intelligence. High accuracy in the calculation of the coefficient improves the design of the controller and estimates the dynamic behavior of the device. In this research, it has been tried to extract hydrodynamic coefficients through the experimental test results of the SUT glider. At first, the sawtooth maneuver of an underwater glider called the SUT glider was carried out using a controller in the pool of Sharif University of Technology. To conclude system identification, an Arduino board recorded inputs and outputs during testing. The dynamic system of the pitch motion was considered as an independent system, and the parameters of the system were estimated using the least square method. The mathematical dynamic model considered for identification is the state space model that can be developed using the system identification method. Finally, the linear model of the state space for pitch motion was developed based on the experimental results, which has a suitable method for modeling the behavior of underwater gliders.

Keywords— system identification, pitch motion, control system, underwater glider.

۱- مقدمه

ربات های زیرسطحی (UVs) به یک بخش بنیادی در تحقیقات دریایی تبدیل شده‌اند. ربات های کنترل از راه دور (ROV) و ربات زیرسطحی هوشمند (AUV, UG) برای انجام ماموریت‌هایی مانند بررسی، جمع‌آوری داده، نقشه‌برداری از کف دریا، تخلیه زباله‌های دریایی و ساخت زیرساخت‌های زیرآبی استفاده می‌شوند (۳،۲،۱).

معادلات دینامیکی حرکت ربات زیرسطحی به طور عمومی به عنوان مجموعه‌ای از شش معادله غیرخطی وابسته بیان می‌شوند که رفتار وسیله را تخمین می‌زنند. علاوه بر این، داشتن مدل امکان انتقال قوانین کنترل بهتری را که نیاز به تلاش کمتری برای انجام ماموریت ربات زیرسطحی دارند، فراهم می‌کند. این سیستم با شش درجه آزادی از تحرک شامل تعداد زیادی پارامتر است که برای پیش‌بینی دقیق و صحیح حرکت یک ربات زیرسطحی نیاز به شناسایی دارد (۴). اما میتوان با ساده سازی ها مدل شش درجه آزادی غیرخطی را به مدل خطی و در فضای حالت بیان نمود. تخمین دقیق پارمترهای فضای حالت نیاز به تخمین دقیق و متناسبی دارد که روش شناسایی سیستم میتواند در این زمینه متناسب باشد.

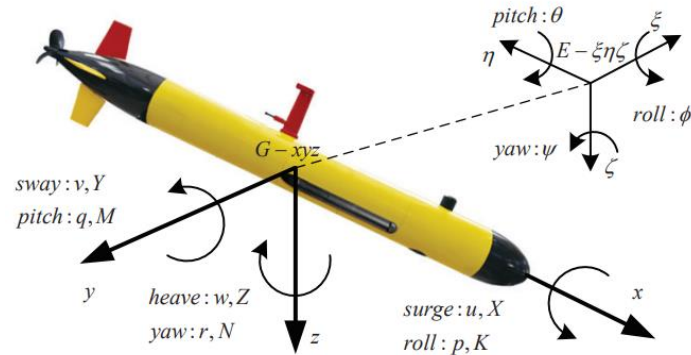
شناسایی سیستم در زمینه UVs مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، رویکرد عمومی به این موضوع بیشتر تخمین پارامترهای مجهول دینامیکی بوده است و مقایسه نتایج شبیه‌سازی در کارهای زیادی منتشر شده است. به عنوان مثال، پژوهش‌هایی برپایه شناسایی پارامترهای هیدرودینامیکی مانند ضریب جرم افزوده و ضریب دمپینگ بوده است. کارهای زیادی در زمینه شناسایی سیستم از طریق تکنیک‌های مبتنی بر مشاهده گر صورت گرفته است (۵،۶،۷،۸،۹).

برخی از کارهای دیگر به مدل های نیمه تجربی جهت تخمین حرکات ربات زیرسطحی پرداخته اند (۱۰،۱۱) یا رویکردهای دیگری برای جداسازی متغیرها و جداسازی معادلات شش درجه آزادی زیر سطحی برای ساده سازی در شناسایی سیستم تحت شرایط خاص پرداخته اند (۱۲،۱۳). موارد پرداخته شده به صورت شناسایی سیستم افلاین صورت پذیرفته است اگرچه کارهایی موجود است که بصورت آنلاین در حین عملیات قابلیت تخمین پارامترها را دارند و بصورت لحظه ای میزان ضرایب را تخمین می‌زنند (۱۴،۱۵).

در این پژوهش سعی شده است تا براساس تست های تجربی صورت گرفته بر روی SUT گلايدر ضرایب هیدرودینامیکی و مدل خطی فضای حالت استخراج گردد. اگرچه در پژوهش های صورت گرفته بیشتر بر موضوع ربات های under-actuated پرداخته شده است اما توجه قابل توجی به گلايدرهاي زیرسطحی نشده است. حرکت اره مانند این ربات ها در مسیر پیشروی تاثیر بسزایی در عملکرد و راندمان دارد که میزان زاویه پیچ از برجسته ترین کاراکترهای این حرکت است. در این پژوهش براساس حرکت و مانور پیشروی معادلات فضای حالت خطی استخراج می‌گردد که میتواند در طراحی کنترل و مشاهده گر مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدل فضای حالت حرکت پیچ گلايدر زیرسطحی

شبیه‌سازی معادلات حرکت یک گلايدر زیرسطحی به حل همزمان شش معادله دیفرانسیل غیر خطی کوپل شده احتیاج دارد، که سه معادله بیانگر حرکت انتقالی و سه معادله دیگر بیانگر حرکت چرخشی وسیله هستند. برای مدلسازی دینامیکی همواره دو دستگاه مختصات تعریف میشود. اولی فیکس شده در قاب مرجع متصل به زمین و بی حرکت است. دومی متصل به بدنه ربات می‌باشد. برای کاهش پارامترها، دستگاه مختصات متصل به بدنه در مرکز بویانسی در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱) وضعیت نسبی دستگاه مختصات های تعریف شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- دستگاه مختصات های تعریف شده و شماتیک حرکت های شش درجه آزادی (۱۶)

با استفاده از فرضیات و جداسازی حرکات کوپل شده میتوان حرکت پیچ گلايدر را که یک حرکت حیاتی بحساب می آید از سایر حرکات جدا کرد. برای طراحی سیستم کنترلی نیازمند داشتن مدل استاندارد فضای حالت است. مدل فضای حالت دارای فرمت استاندارد و مناسبی است که می توان برای توسعه الگوریتم های هوشمند در طراحی کنترلر و مشاهده گر از آن بهره برد. با خطی سازی معادله حرکت پیچ گلايدر زیرسطحی، میتوان مدل فضای حالت استخراج نمود. معادله حاکم بر حرکت پیچ گلايدر در رابطه (۱) ارائه شده است. معادله (۱) شامل ترم های بازگرداننده، ممان هیدرودینامیکی، دینامیکی جسم صلب و اغتشاشات خارجی است.

$$(I_Y + M_{\dot{q}})\dot{q} + M_q q + M_{\theta}\theta + M_u u = \tau_{dis} \quad (1)$$

که در اینجا I_Y ممان اینرسی جرمی حول محور Y ، $M_{\dot{q}}$ جرم افزوده حرکت پیچ، M_q دمپینگ حرکت پیچ، M_{θ} ضریب بازگرداننده، M_u ضریب عملگر کنترلی، τ_{dis} اغتشاش خارجی، u سیگنال کنترل و θ, q, \dot{q} به ترتیب شتاب، سرعت و مقدار پیچ هستند. برای محاسبه میزان زاویه پیچ براساس معادلات سینماتیکی عمل شده است. مقدار تغییرات زاویه پیچ به صورت معادله (۲) بیان می گردد.

$$\dot{\theta} = q \quad (2)$$

برای طراحی کنترل کننده و مشاهده گر نیاز است تا مدل دینامیکی در فرمت استاندارد فضای حالت بیان شود. مدل فضای حالت فرمت استاندارد متناسبی است که میتوان پل مناسبی بین هیدرودینامیک و کنترل سیستم بیان نمود. فرمت عمومی فضای حالت به مانند معادله (۳) است.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + E \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن x بردار متغیرهای حالت $(n \times 1)$ ، \dot{x} نرخ زمانی بردار حالت $(n \times 1)$ ، u ورودی کنترلر $(p \times 1)$ ، y بردار خروجی $(q \times 1)$ ، A ماتریس سیستم $(n \times n)$ ، B ماتریس ورودی $(n \times p)$ و C ماتریس خروجی $(q \times n)$ است. مدل دینامیکی حرکت پیچ در فرمت ماتریسی به شکل (۴) بیان شده است.

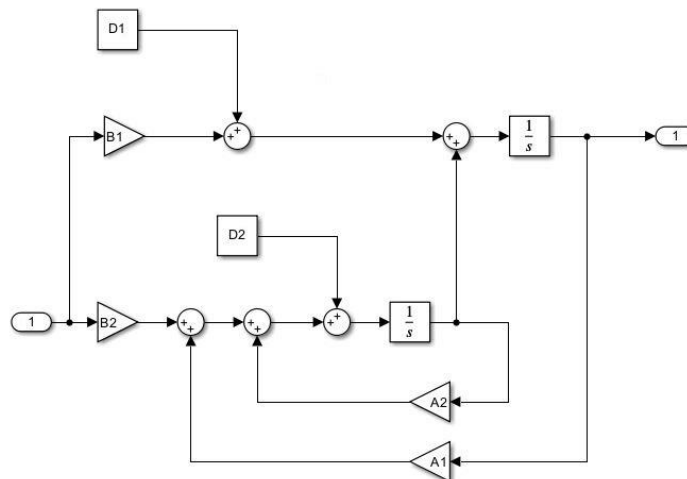
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{M_q}{I_Y + M_{\dot{q}}} & \frac{M_{\theta}}{I_Y + M_{\dot{q}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_u}{I_Y + M_{\dot{q}}} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \tau_{dis1} \\ \tau_{dis2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (5)$$

که برای بیان ساده تر میتوان از علائم اختصاری برای ترم ها و پارامترها استفاده نمود. برای بیان ساده تر معادله (۴) به شکل معادله (۶) بازنویسی شده است.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ A_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

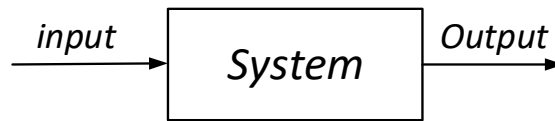
مدل معادله (۶) در محیط MATLAB Simulink پیاده سازی شده است. شماتیک مدلسازی صورت گرفته در محیط Simulink در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- بلوک دیاگرام مدل فضای حالت پیاده سازی شده در MATLAB Simulink

۳- روش شناسایی حداقل مربعات

مدل سازی ریاضی سیستم های مجهول از نظر موضوع به دو بخش می توان تقسیم بندی کرد. در بخش اول فرض بر آنست که روابط حاکم بر مساله مشخص می باشند اما پارامترهای موجود در این روابط و یا حداقل تعدادی از آنها مجهول هستند. در بخش دیگری فرض بر اینست که هیچ اطلاعی از ساختار روابط حاکم بر سیستم در دست نیست و به اصطلاح سیستم یک جعبه سیاه است (شکل ۳). بدین ترتیب با حدس ساختاری فرضی، مساله به حالت اول بر می گردد. با تعیین پارامترهای ساختار فرضی، اگر جواب مطلوب حاصل نشد این حلقه آنقدر تکرار می شود تا ساختاری به دست آید که با تعیین پارامترهای آن، رفتار مدل ریاضی حاصله و سیستم واقعی همسان گردد.



شکل ۳- شماتیک دینامیک سیستم ناشناخته بعنوان جعبه سیاه برای شناسایی سیستم

LS-SVM یک نوع روش شناسایی بهبود یافته روش SVM است. به دلیل انتخاب روش حداقل مربعات، ویژگی پراکندگی برای جواب وجود نخواهد داشت اما بر دقت نتایج تأثیر نمی گذارد (۱۷). در مقابل، حل مسئله بهینه سازی درجه دوم را به حل یک سیستم معادلات خطی منتقل می کند که زمان محاسبات را به شکل چشم گیری کاهش می دهد. نمایش فضای LS-SVM را می توان به صورت معادله (۷) توصیف کرد.

$$f(z) = w^T \Phi(z) + b \quad (z \in \mathcal{R}^m, f \in \mathcal{R}^n) \quad (7)$$

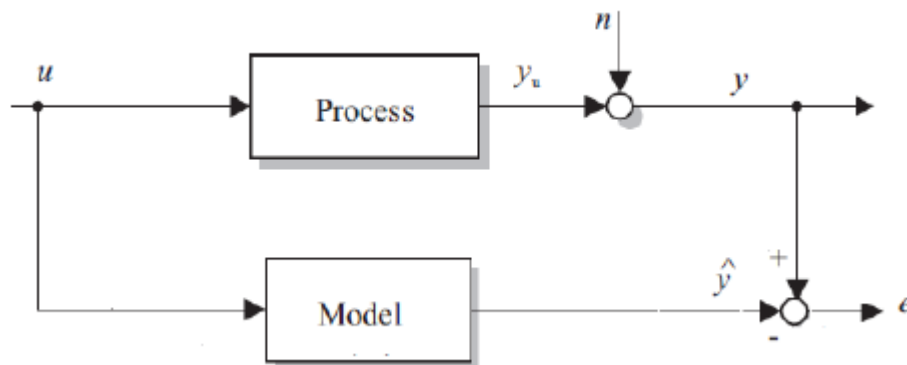
در این مسئله، $f(z)$ خروجی اسکالر سیستم است. $\Phi(x)$ فضای ویژگی با بعد بالا است که برای تقریب نگاشت موجود در نمونه های آموزشی اصلی به کار می رود. z بردار ورودی سیستم است و w ماتریس وزن مرتبط با عملکرد سیستم است. همچنین، b مقدار بایاس است و \mathcal{R} فضای اقلیدسی را نمایش می دهد. m و n به ترتیب ابعاد فضای اقلیدسی هستند. در این مسئله، سعی شده است تا تابع هدف بهینه شود.

$$\min J(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (8)$$

که در آن C ضریب جریمه و e خطای رگرسیون است. تابع لاگرانژی زیر برای تابع هدف و شرایط محدودیت تعریف شده است.

$$L_a(w, e, \beta, b) = J(w, e) - \sum_{i=1}^n \beta_i [w^T \Phi(z) + b + e_i - f_i] \quad (9)$$

که در اینجا β_i ضریب لاگرانژی است. در نهایت به طور کلی بلوک دیاگرام شناسایی سیستم به صورت زیر استخراج می گردد.

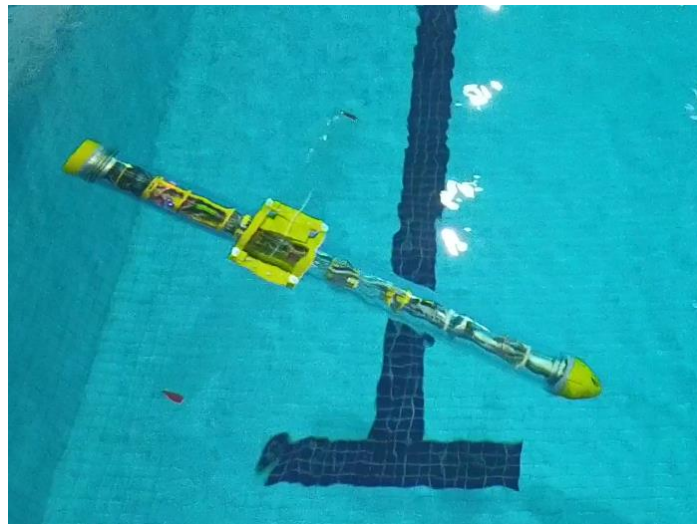


شکل ۴- بلوک دیاگرام سیستم و ارتباطات الگوریتم شناسایی سیستم

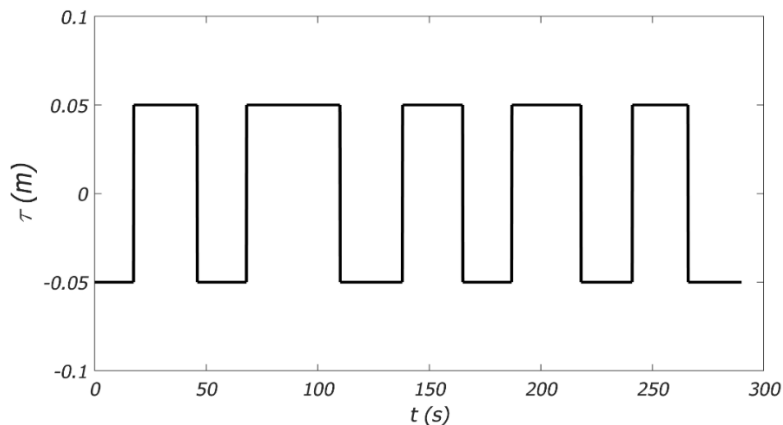
۴- نتایج

در این بخش نتایج شبیه سازی، تست و شناسایی سیستم صورت گرفته بر روی مدل استخراج شده است. شبیه سازی ها و الگوریتم مورد نظر در محیط MATLAB Simulink پیاده سازی شده است. در بخش اول گلايدر SUT در استخر شنای دانشگاه شریف تست شده است و مانور دندان اره ای صورت پذیرفته است. در حین تست، ورودی ها و خروجی های سیستم گلايدر بر روی برد میکرو کنترلر ثبت شده است. براساس ورودی ها و خروجی ها از الگوریتم شناسایی سیستم برای تخمین ضرایب مجهول در مدل دینامیکی استفاده شده است.

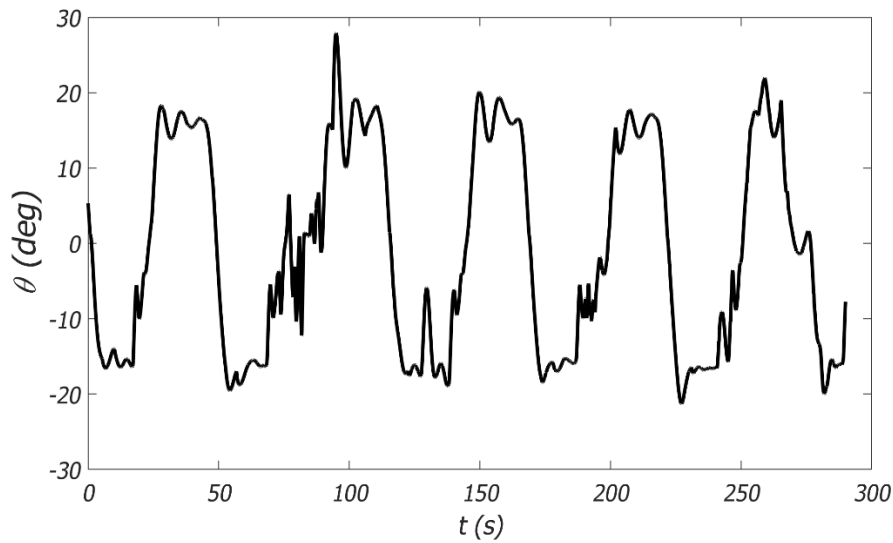
در تست حرکت پیشروی، گلايدر SUT از سطح آب تا عمق ۲ متری با استفاده از مخزن بویانسی به داخل آب غوص کرده است و به دنبال آن به سطح آب در عمق ۰.۲۵ متری صعود می کند. در طول هر دو مرحله غوص و صعود، هدف کنترل کننده زاویه پیچ، حفظ زاویه پیچ ۱۸ درجه در هنگام غوص و ۱۸- درجه در هنگام صعود بود. به دلیل عدم وجود تجهیزات اندازه گیری موقعیت بر روی گلايدر در آب، نتایج عمق لحظه ای و زاویه پیچ ثبت شده اند.



شکل ۵- نمایی از تست گلايدر SUT در استخر دانشگاه شریف



شکل ۶- سیگنال ورودی به حرکت پیچ در تست آزمایشگاهی



شکل ۷- سیگنال خروجی حرکت پیچ در تست آزمایشگاهی

پس از انجام تست آزمایشگاهی، سیگنال ورودی و خروجی در بخش شناسایی سیستم آنالیز شد. براساس مدل معادله (۶)، سعی شد تا مدل مطلوب برای حرکت پیچ استخراج گردد. ضرایب بدست آمده در بخش شناسایی سیستم در جدول (۱) ارائه شده است.

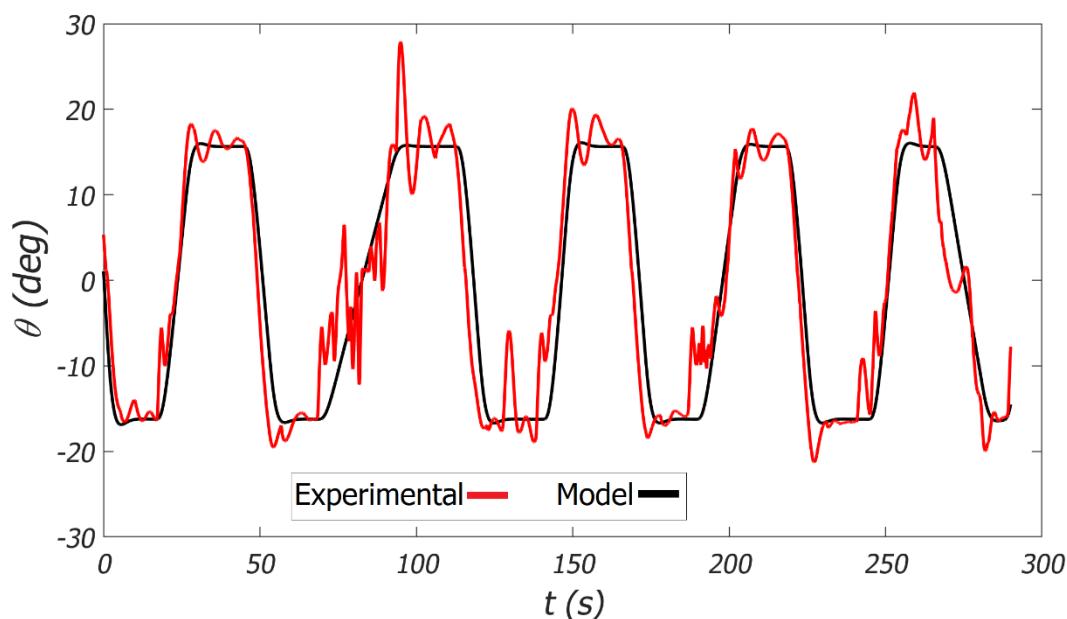
جدول ۱- ضرایب استخراج شده در روش شناسایی سیستم

ضرایب	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	D ₁	D ₂
مقدار	-۰/۴۸	-۱/۰۲	۰/۰۷۴	۲/۶۵	-۰/۰۷۶	۰/۰۷۴

با بدست آمدن ضرایب هیدرودینامیکی مدل فضای حالت تکمیل می شود. مدل تکمیل شده به شرح معادله (۱۰) می باشد.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.48 & -1.02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.65 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

نتایج مدل بدست با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند. ورودی های ثبت شده به مدل، دقیقاً ورودی ها در بخش آزمایشگاهی بوده است.



شکل ۸- مقایسه نتایج تست آزمایشگاهی و پاسخ مدل استخراج شده

نتایج شکل (۸) و جدول (۱) نشان می دهد که بازه ی تخمین ضرایب در محدوده ی مناسب و قابل اعتماد است. همچنین پاسخ مدل استخراج شده نشان می دهد که مدل و شناسایی ضرایب دارای عملکرد متناسبی بوده است و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. نوسانات و اختلاف بین دو نتیجه بدلیل نویز سنسور اندازه گیری و اغتشاشات محیط است. نوسانات پاسخ آزمایشگاهی بدلیل ماهیت غیرخطی دینامیکی حرکت پیچ گلايدر بوده است اما در نتایج مدل به دلیل خطی بودن مدل دارای نوسانات ناچیزی بوده است. به طور کلی میتوان نتیجه گرفت که مدل استخراج شده بر اساس شناسایی دارای پاسخ مناسبی برای حرکت پیچ گلايدر زیرسطحی مدنظر بوده است.

۵- نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل عملکرد هر سیستم فیزیکی به منظور طراحی سیستم کنترل آن، مستلزم در دست داشتن مدل ریاضی مناسب برای آن سیستم می باشد. گلايدره‌های زیرسطحی بعنوان یک سیستم کنترلی درگیر این موضوع هستند. در این پژوهش سعی شده بود تا بر اساس نتایج تست تجربی گلايدر SUT مدل دینامیکی فضای حالت با دقت مناسبی استخراج گردد. پارامترها و ضرایب مدل براساس نتایج تست تجربی و شناسایی سیستم استخراج شدند. نتایج نشان داد ضرایب بدست آمده نتایج متناسبی را در مقایسه با نتایج تست آزمایشگاهی ارائه نموده اند. رفتار مدل و نتایج ارائه شده براساس ورودی یکسان، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. از این رو میتوان با استفاده از روش های شناسایی سیستم مدل های دقیق و متناسبی برای گلايدره‌های زیرسطحی استخراج نمود. این مدل میتواند سبب طراحی سیستم کنترلی دقیق تر و متناسب تری برای گلايدره‌های زیرسطحی گردد. مدل فضای حالت استخراج شده در بررسی پایداری، طراحی مشاهده گر و کنترل پذیری سیستم میتواند مورد استفاده قرار گیرد.



٦- منابع

- (1) Mallios, A., Vidal, E., Campos, R., Carreras, M., 2017. Underwater caves sonar data set. *Int. J. Robot. Res.* 36 (12), 1247–1251.
- (2) Carreras, M., Hernandez, J.D., Vidal, E., Palomeras, N., Ribas, D., Ridaio, P., 2018. Sparus II AUV - A hovering vehicle for seabed inspection. *IEEE J. Ocean. Eng.* 43 (2), 344–355.
- (3) Vidal, E., Palomeras, N., Istenič, K., Gracias, N., Carreras, M., 2020. Multisensor online 3D view planning for autonomous underwater exploration. *J. Field Robotics* rob.21951.
- (4) Wadi, A. and Mukhopadhyay, S., 2023. A novel localization-free approach to system identification for underwater vehicles using a Universal Adaptive Stabilizer. *Ocean Engineering*, 274, p.114013.
- (5) Yang, R., Clement, B., Mansour, A., Li, M., Wu, N., 2015. Modeling of a complex-shaped underwater vehicle for robust control scheme. *J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl.* 80 (3–4), 491–506.
- (6) Ling, X., Leong, Z.Q., Chin, C., Woodward, M., Duffy, J., 2022. Regression analysis and curve fitting for the hydrodynamic coefficients of an underwater vehicle undergoing straight-ahead motion. *Ocean Eng.* 262, 112135.
- (7) Castillo-Zamora, J.J., Camarillo-Gómez, K.A., Pérez-Soto, G.I., Rodríguez-Reséndiz, J., Morales-Hernández, L.A., 2021. Mini-AUV hydrodynamic parameters identification via CFD simulations and their application on control performance evaluation. *Sensors* 21 (3).
- (8) Deng, F., Levi, C., Yin, H., Duan, M., 2021. Identification of an autonomous underwater vehicle hydrodynamic model using three Kalman filters. *Ocean Eng.* 229, 108962.
- (9) Chou, Y.C., Nakajima, M., Wang, C.C., Chen, H.H., 2017. Identification of hydrodynamic coefficients for underwater vehicles using laser line scanning and genetic algorithm. In: *OCEANS 2017 - Aberdeen*, vol. 2017-October, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084570>.
- (10) Tiano, A., Sutton, R., Lozowicki, A., Naeem, W., 2007. Observer Kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle. *Control Eng. Pract.* 15 (6), 727–739.
- (11) Xu, F., Zou, Z.J., Yin, J.C., Cao, J., 2013. Identification modeling of underwater vehicles' nonlinear dynamics based on support vector machines. *Ocean Eng.* 67, 68–76.
- (12) Huajun, Z., Xinchu, T., Hang, G., Shou, X., 2020. The parameter identification of the autonomous underwater vehicle based on multi-innovation least squares identification algorithm. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 17 (2), 172988142092101.
- (13) Randeni P., S.A., Forrest, A.L., Cossu, R., Leong, Z.Q., Ranmuthugala, D., Schmidt, V., 2018. Parameter identification of a nonlinear model: Replicating the motion response of an autonomous underwater vehicle for dynamic environments. *Nonlinear Dynam.* 91 (2), 1229–1247.
- (14) Quraishi, A., Martinoli, A., 2021. Online kinematic and dynamic parameter estimation for autonomous surface and underwater vehicles. In: *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS*, pp. 4374–4381. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636659>.
- (15) Avila, J.P., Donha, D.C., Adamowski, J.C., 2013. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles. *Ocean Eng.* 60, 81–94.
- (16) Wang, D., Wan, J., Shen, Y., Qin, P. and He, B., 2022. Hyperparameter Optimization for the LSTM Method of AUV Model Identification Based on Q-Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), p.1002.
- (17) Wang, X.G., Zou, Z.J., Yu, L. and Cai, W., 2015. System identification modeling of ship manoeuvring motion in 4 degrees of freedom based on support vector machines. *China Ocean Engineering*, 29, pp.519-534.

جمع‌آوری داده‌های دریایی با تکنولوژی LoRa: مسیریابی هوشمند و بهینه‌سازی کارایی

مقداد محمدی^{۱*}، حسین حدادیان نژاد یوسفی^۲، محمد اسماعیل دوست^۱

۱. دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

۲. دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: M.Mohammadi@kmsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک شبکه حسگر بی‌سیم جهت جمع‌آوری اطلاعات دریایی با استفاده از فناوری ارتباطات بی‌سیم لورا (LoRa) پیاده‌سازی شده است که داده‌های حسگرها را به یک ایستگاه مرکزی ارسال می‌کند. این حسگرها می‌توانند داده‌های مورد نیاز پژوهش‌های مختلف را جمع‌آوری و به ایستگاه مرکزی ارسال کنند. این پیاده‌سازی شامل بهبودهای مهم در فرآیند انتقال داده‌ها و ارتباطات بین گره‌ها و ایستگاه مرکزی می‌شود. یکی از ویژگی‌های بارز این سیستم، پروتکل مسیریابی بهینه‌سازی شده است که با هوشمندی مسیرهای انتقال داده‌ها را مدیریت می‌کند. این بهبودها به کاهش هدر رفت توان و افزایش سرعت انتقال اطلاعات منجر می‌شود. ساختار این سیستم به شبکه، امکان گسترش گره‌ها را می‌دهد، به طوری که گره‌های جدید به راحتی به شبکه اضافه شده و بدون تاثیر منفی بر عملکرد کل سیستم تشخیص داده می‌شوند. این قابلیت به سازمان‌ها و شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که بر اساس نیازهای خود تعداد حسگرها را افزایش دهند. در این سیستم، داده‌های حسگرها با استفاده از فناوری لورا به یک ایستگاه مرکزی ارسال می‌شوند. این فرآیند انتقال داده با کارایی بالا و قابلیت انطباق با شرایط مختلف شبکه همراه است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که پیاده‌سازی ارائه شده افزایش قابل توجهی در بهره‌وری شبکه و بهبودهای چشم‌گیری در ارسال داده‌ها به ایستگاه مرکزی داشته است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که پیاده‌سازی ارائه شده نه تنها بهبودهای چشمگیری در عملکرد شبکه ایجاد کرده است بلکه به انعطاف پذیری بالا و قابلیت گسترش آسان نیز دست یافته است. این مقاله به عنوان یک طرح پایه شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از تکنولوژی لورا است که می‌تواند به توسعه جمع‌آوری اطلاعات دریایی کمک کند.

کلیدواژه: ارتباط بی‌سیم، حسگر دریایی، شبکه حسگر بی‌سیم، مسیریابی.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به فعالیت‌های انسانی در دریا، محیط زیست دریایی نیاز به پایش دارد. با توجه به اهمیت پایش بر محیط زیست به طور فزاینده‌ای توجه تحقیقات و توسعه زیادی را به خود جلب کرده است. سیستم سنتی پایش محیط زیست دریایی با استفاده از یک کشتی تحقیقاتی اقیانوس‌شناسی گران و زمان‌بر است و وضوح کمی در زمان و مکان خواهد داشت. یک سیستم نظارت دریایی، نیاز به قابلیت انعطاف پذیری بالایی دارد، زیرا محیط دریایی با امواج، جریان‌های دریایی، جزر و مد، طوفان، کشتی‌ها و غیره، تهاجمی و پیچیده است و باعث حرکت گره‌ها می‌شود. شبکه‌های حسگر بی‌سیم به عنوان جایگزین‌های بالقوه امیدوارکننده برای نظارت بر محیط‌های دریایی در نظر گرفته شده‌اند، زیرا دارای مزیت‌هایی مانند عملیات بدون سرنشین، استقرار آسان، نظارت در زمان واقعی و هزینه نسبتاً کم هستند (۱).

در دهه‌های اخیر، شبکه‌های حسگر بی‌سیم با ارتقاء تکنولوژی به یکی از پویاترین و پیچیده‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی تبدیل شده است. این حوزه از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا این امکان را می‌دهد که دستگاه‌ها و حسگرها به یکدیگر و به یک مرکز کنترل متصل شده تا داده‌های ارزشمندی را برای تجزیه و تحلیل فراهم نمایند. در این زمینه، یکی از چالش‌های مهم، بهینه‌سازی فرآیند انتقال داده از حسگرها به ایستگاه مرکزی است. برای پاسخ به این چالش، در

این تحقیق یک شبکه حسگر بی سیم با استفاده از تکنولوژی ارتباطات بی سیم لورا (LoRa) طراحی و پیاده سازی شده است.

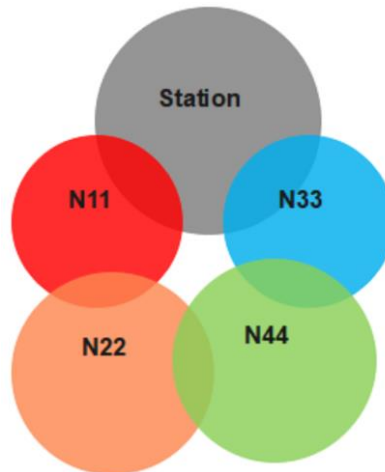
تکنولوژی لورا به دلیل دامنه انتقال بسیار بالا و مصرف انرژی کم، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای ارتباطات در شرایط فاصله بلند و با مصرف انرژی محدود در حسگرها معرفی شده است (۲). مسیریابی در شبکه‌های LoRa به دلیل خصوصیات خود که شامل برد بلند، انرژی کم، و پوشش گسترده می‌شود، چالش‌های خاصی دارد (۳). در این شبکه‌ها، دستگاه‌ها ممکن است اطلاعات را به یکدیگر منتقل کنند و به دنبال بهینه‌سازی مصرف انرژی و حداکثر کردن برد و پوشش باشند. برخی از موضوعاتی که در مقالات در زمینه مسیریابی در شبکه‌های LoRa مورد بررسی قرار گرفته است شامل مواردی مانند الگوریتم‌های مسیریابی (۴)، مدیریت انرژی (۵)، تاخیر و کیفیت خدمات (۶) و توانایی و هماهنگی با توپولوژی شبکه (۷) می‌باشد.

این مقاله نه تنها به معرفی یک پروتکل مسیریابی می‌پردازد بلکه این پروتکل با بهبودهای هوشمندانه در مسیریابی داده‌ها، هدررفت اطلاعات را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، این سیستم با امکان گسترش آسان گره‌های شبکه، به سازمان‌ها و شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که با افزایش تعداد حسگرها به نحوی منطقی از شبکه اینترنت اشیا استفاده کنند. در ادامه پرتکل ارتباطی بین گره‌ها معرفی می‌شود و در بخش ۳ نتایج سخت افزاری ارائه شده است.

۲- پرتکل ارتباطی گره‌ها

در این بخش به بیان نحوه ارتباط بین گره‌ها با یکدیگر و ارتباط دوطرفه آنها با ایستگاه مرکزی پرداخته خواهد شد. برای مثال طبق شکل ۱ در این شبکه ۴ گره به همراه ایستگاه مرکزی قرار گرفته‌اند. ایستگاه مرکزی بطور مستقیم با گره ۱۱ و ۳۳ در ارتباط است و گره‌های ۲۲ و ۴۴ برای ارتباط با ایستگاه باید از چند گره بعنوان پل ارتباطی استفاده کنند. گره ۴۴ برای ارسال اطلاعات خود به ایستگاه دو مسیر را می‌تواند انتخاب کند. اول اینکه اطلاعات را به گره ۳۳ ارسال کند و گره ۳۳ اطلاعات دریافتی را برای ایستگاه ارسال کند. مسیر دوم در دسترس گره ۴۴، ارسال به گره ۲۲ است. گره ۲۲ اطلاعات دریافت شده را برای گره ۱۱ ارسال و گره ۱۱ اطلاعات دریافتی از گره ۲۲ را به ایستگاه ارسال می‌کند. این موضوع برای ارسال اطلاعات گره ۲۲ نیز صادق است. زیرا این گره نیز بطور مستقیم در دسترس ایستگاه نیست.

در این بخش به بیان نحوه ارتباط بین گره‌ها با یکدیگر و ارتباط دوطرفه آنها با ایستگاه مرکزی پرداخته خواهد شد. برای مثال طبق شکل ۱ در این شبکه ۴ گره به همراه ایستگاه مرکزی قرار گرفته‌اند. ایستگاه مرکزی بطور مستقیم با گره ۱۱ و ۳۳ در ارتباط است و گره‌های ۲۲ و ۴۴ برای ارتباط با ایستگاه باید از چند گره بعنوان پل ارتباطی استفاده کنند. گره ۴۴ برای ارسال اطلاعات خود به ایستگاه دو مسیر را می‌تواند انتخاب کند. اول اینکه اطلاعات را به گره ۳۳ ارسال کند و گره ۳۳ اطلاعات دریافتی را برای ایستگاه ارسال کند. مسیر دوم در دسترس گره ۴۴، ارسال به گره ۲۲ است. گره ۲۲ اطلاعات دریافت شده را برای گره ۱۱ ارسال و گره ۱۱ اطلاعات دریافتی از گره ۲۲ را به ایستگاه ارسال می‌کند. این موضوع برای ارسال اطلاعات گره ۲۲ نیز صادق است. زیرا این گره نیز بطور مستقیم در دسترس ایستگاه نیست.



شکل ۲- آرایش ۴ گره و ایستگاه مرکزی

درواقع هر گره می‌تواند علاوه بر اینکه بعنوان یک گره مبدأ یا مقصد اطلاعات در شبکه ایفای نقش کند، می‌تواند نقش پل ارتباطی را نیز داشته باشد. در مثال ذکر شده برای ارسال اطلاعات گره ۴۴ به ایستگاه، گره ۳۳ نقش یک پل را بازی می‌کند. در مسیر دوم نیز، گره‌های ۲۲ و ۱۱ بعنوان پل ارتباطی می‌توانند اطلاعات گره ۴۴ را برای ایستگاه ارسال کنند. این پروتکل دارای دو فاز راه اندازی است. فاز اول، فاز شناسایی شبکه که ایستگاه مرکزی با استفاده از ارسال پیام به گره‌ها، توپولوژی شبکه را استخراج می‌کند. فاز دوم، فاز انتقال جدول همسایه‌ها به گره‌های شبکه است. بعد از راه اندازی، گره شبکه با استفاده از جدول همسایگی این قابلیت را دارد که اطلاعات را از کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای ایستگاه مرکزی ارسال کند.

یکی از موضوعات اصلی در تمامی شبکه‌هایی که گره‌های قادر به جابجایی هستند و یا عمر محدودی دارند، مسیریابی گره‌ها است. اینکه گره ۴۴ چگونه و بواسطه کدام گره‌ها اطلاعات خود را به ایستگاه مرکزی ارسال کند، یکی از اصلی‌ترین موضوعات مسیریابی گره‌ها است که در پروتکل ارتباطی باید مورد توجه قرار بگیرد. زیرا هر گره باید دارای مسیرهای کوتاه تا ایستگاه مرکزی باشد تا در زمان و انرژی صرفه‌جویی شود.

در شبکه موجود چند نوع پیام بین گره و ایستگاه ردوبدل می‌شود. نوع اول پیام‌هایی است که ایستگاه مرکزی به گره‌ها ارسال می‌کند و از آنها اطلاعاتی را درخواست می‌کند. در این مقاله به این نوع پیام‌ها، پیام‌های دوطرفه گفته می‌شود. پیام‌های مسیریابی از این نوع پیام‌های دوطرفه می‌باشند. نوع دوم پیام‌ها، پیام‌هایی است که گره‌ها متناسب با شرایط خود به ایستگاه ارسال می‌کنند و انتظار پاسخ از طرف ایستگاه وجود ندارد. به این پیام‌ها در این مقاله، پیام‌های یک طرفه گفته می‌شود. پیام‌های انتقال اطلاعات گره‌ها، از این دسته پیام‌ها هستند. برای ارتباط بهتر و تفکیک اطلاعات موجود در هر پیام، همچنین سهولت جداسازی اطلاعات در هر بسته ارسالی یک قالب کلی برای پیام‌ها پیشنهاد شد که در شکل (۲) آورده شده است.

>	توضیحات	%	دستور	@	گره پل	\$	گره مقصد	#	گره مبدأ	<
---	---------	---	-------	---	--------	----	----------	---	----------	---

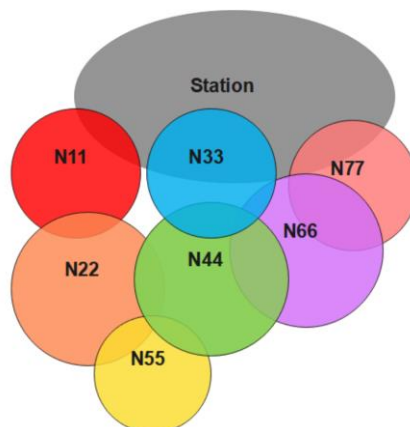
شکل ۲ - قالب کلی پیام‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهادی

قسمت مربوط به گره مبدأ، آدرس گره‌های است که پیام از آن صادر شده است. منظور از گره مقصد، آدرس گره ای است که در نهایت قرار است این پیام به آن رسیده شود. قسمت گره یا گره‌های پل، آدرس گره‌هایی است که در مسیر انتقال اطلاعات بعنوان پل ارتباطی بین گره مبدأ و مقصد ایفای نقش می‌کنند. دستور، یک قرارداد در شبکه است که به ازای رشته‌های مشخص، عملیات‌های از پیش تعیین شده توسط گره‌ها انجام می‌پذیرد. میدان توضیحات نیز اطلاعات اضافه‌ای است که در موارد خاص برای برخی از دستورات در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱- فاز اول

در فاز اول، دستور Mcall برای شناسایی گره‌های همسایه توسط ایستگاه مرکزی ارسال می‌شود. این دستور دارای آدرس ۹۹ به عنوان ارسال همگانی است و آدرس ایستگاه مرکزی ۰۰ در نظر گرفته شده است. هر گره‌ای که این پیام را دریافت می‌کند یعنی بدون واسطه با ایستگاه در ارتباط است. ایستگاه نام این گره‌ها را در جدول خود قرار می‌دهد. بعد از به ترتیب از این گره‌ها می‌خواهد همسایگان خود را معرفی کنند.

برای معرفی همسایگان گره‌های همجوار شماره گره به عنوان گره پل در دستور قرار می‌گیرد و گره‌های دیگر پاسخی به این بسته نمی‌دهند. گره پل پیام دریافتی را با آدرس خود فرستند و گره‌هایی که این پیام را دریافت می‌کنند به این گره اطلاع می‌دهند و این روند تا پایان شناسایی تمام ساختار شبکه ادامه دارد. برای مثال برای شکل (۳) جدول (۱) توسط ایستگاه مرکزی ایجاد می‌شود.



شکل ۲- آرایش ۷ گره و ایستگاه مرکزی

جدول ۱- لیست گره‌ها و گره‌های در شعاع رادیویی آنها

شماره گره	همسایه اول	همسایه دوم	همسایه سوم	همسایه چهارم
N11	۲۲			
N22	۱۱	۴۴	۵۵	
N33	۴۴	۶۶		
N44	۳۳	۲۲	۶۶	۶۶
N55	۲۲	۴۴		
N66	۷۷	۳۳	۴۴	
N77	۶۶			

۲-۲- فاز دوم

در فاز دوم هدف ارسال لیست همسایگی‌ها از طریق ایستگاه به گره‌ها می‌باشد. بعد از آنکه جدولی مشابه جدول (۲) در ایستگاه مرکزی بدست آمد، ایستگاه مرکزی باید به هر گره، لیست مسیرهای ارسالی را مطابق با اولویت اعلام کند. اعلام لیست گره‌های مجاور توسط دستور MList به هر گره ارسال خواهد شد. در این روش، هر گره فقط از گره‌های مجاور خود باخبر است. بعنوان مثال گره ۲۲ می‌داند که برای ارسال اطلاعات خود مطابق با اولیوی که ایستگاه مرکزی برای آن تعیین کرده است ابتدا باید اطلاعات خود را به گره ۱۱ ارسال کند، اگر گره ۱۱ موفق به دریافت اطلاعات نشد و پیام تأییدیه دریافت ACK را به گره مبدأ ارسال نکرد، گره ۲۲ باید مسیر جایگزینی که ایستگاه مرکزی به آن معرفی کرده را برای ارسال اطلاعات خود انتخاب کند و اطلاعات را به گره ۴۴ ارسال کند. اگر گره ۴۴ نیز پاسخی به گره ۲۲ نداد، گره ۲۲ اطلاعات را به گره ۵۵ ارسال خواهد کرد. درواقع با توجه به آنچه گفته شد، گره ۲۲ برای ارسال اطلاعات به ترتیب اولویت گره‌های ۴۴، ۱۱ و ۵۵ را سر راه خود خواهد داشت. دستور ذخیره سازی لیست گره‌های مجاور هر گره، مطابق با دستور شکل ۳ به گره ۲۲ ارسال خواهد شد.

<	00	#	22	\$	B11	@	MList	%	114455	>
---	----	---	----	----	-----	---	-------	---	--------	---

شکل ۳- پیام لیست گره‌های مجاور گره ۲۲ با پل ارتباطی گره ۱۱

همانطور که توضیح داده شد، گره‌های همسایه توسط ایستگاه مرکزی و با توجه به اولویت بندی به گره‌ها، معرفی می‌شوند. حال فرض کنید که یک گره قصد دارد اطلاعاتی را برای ایستگاه ارسال کند. سرعت انتقال اطلاعات مهم است یعنی نمیتواند زمانی را صرف پیدا کردن گره زنده و در دسترس خود کند زیرا این روال ممکن است در انتقال اطلاعات تأخیر ایجاد کند. بنابراین ایستگاه مرکزی در بازه‌های زمانی مشخص (متناسب با درخواست طراح) با ارسال پیام از هر گره می‌خواهد که مسیر خود تا ایستگاه مرکزی را تعیین و اعلام کند. بنابراین، هر گره همواره گره مقصد برای ارسال اطلاعات خود را ثابت در نظر می‌گیرد و نیازی نیست که هنگام ارسال اطلاعات گره مجاور را پیدا کند. گره‌های مجاور ممکن است به مرور زمان خراب یا از شعاع رادیویی گره مبدأ خارج شوند. بنابراین هر گره باید همیشه گره مقصد خود را تعیین کند که سرعت عملکرد شبکه بالا رود.

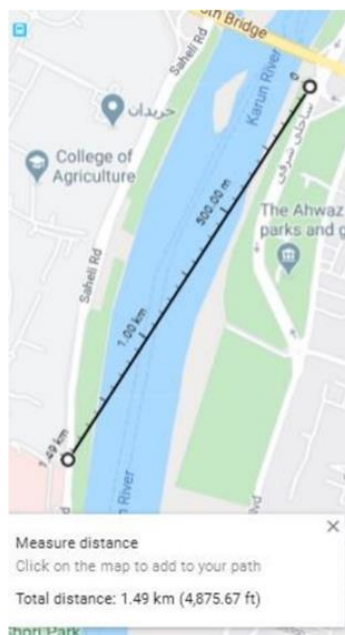
۲-۳- ارسال اطلاعات

هرگاه ایستگاه مرکزی از هر گره اطلاعاتی را بخواهد که برای آن ارسال کند، دستور DTri برای گره مورد نظر ارسال خواهد شد. این دستور به نوعی تریگر ارسال اطلاعات هر گره به حساب می‌آید. هرگاه گره مبدأ، پیامی را برای گره مقصد ارسال می‌کند، برای اطمینان از دریافت پیام توسط مقصد، منتظر تأییدیه‌ای از گره مقصد می‌ماند. گره مبدأ بعد از ارسال هر پیام به اندازه چند میلی ثانیه (قابل تنظیم در برنامه پردازنده‌ها) در حالت انتظار باقی می‌ماند، اگر پیام تأییدیه توسط مقصد ارسال نشد، مجدداً پیام قبل را تکرار خواهد کرد. تعداد تکرار در برنامه پردازنده گره‌ها قابل تنظیم است که به صورت پیش فرض ۲ بار تکرار در نظر گرفته شده است.

۳- آزمایش عملی مازول فرستنده و گیرنده

یکی از مهم ترین چالش های موجود در انجام این پروژه، ارسال اطلاعات بین گره ها و بین گره ها و ایستگاه ساحلی است. زیرا، فاصله بین گره ها بیش از یک کیلومتر است و ارسال صحیح اطلاعات در این فاصله توسط مازول های رادیویی

با توان پایین کاری دشوار است. برای این منظور ماژول LoRa انتخاب شد. جهت اطمینان از انتقال صحیح اطلاعات، مدار طراحی شده در یک آزمایش میدانی محک زده شد. از آنجایی که تنظیمات مربوط به ماژول رادیویی متناسب با شرایط توسط کاربر قابل تغییر است، باید بهترین تنظیمات برای مصرف مورد نیاز انتخاب شود. در این آزمایش هدف تغییر تنظیمات ماژول فرستنده (SF، BW و CR) و اندازه‌گیری میزان بسته‌های از دست رفته، تاخیر ناشی در ارسال اطلاعات Air time و rssi در ماژول گیرنده بوده است. فرستنده و گیرنده در فضای بدون مانع و با فاصله ۱۵۰۰ متر از یکدیگر مطابق با شکل (۴) قرار گرفته اند.



شکل ۴- موقعیت مکانی دو گره در آزمایش عملی

برای انجام این آزمایش، یک رشته ۴ کاراکتری که با کاراکتر \$ شروع می‌شود و ۳ کاراکتر عدد در ادامه آن (بعنوان مثال \$123) قرار دارد، در فرستنده تولید شده است. برای تغییر تنظیمات ماژول لورا سه پارامتر SF، BW و CR قابل تغییر می‌باشند. جهت هماهنگ بودن تنظیمات ماژول فرستنده و گیرنده، یک استاندارد تغییر تنظیمات در نظر گرفته شد که با ارسال کاراکتر # در ابتدای رشته و ۳ کاراکتر عددی، تغییرات لازم در تنظیمات ماژول گیرنده بوجود خواهد آمد (به عنوان مثال #111 به معنی SF=11، BW=125Khz و CR=6 است). در فرستنده و گیرنده ماتریس مربوط به تنظیمات از پیش تعیین شده است. گیرنده زمان بین رسیدن هر بسته را اندازه‌گیری میکند و بعد از اتمام دریافت بسته‌ها و هنگام دریافت بسته مربوط به تنظیمات جدید لورا، گیرنده تمامی بسته‌های دریافت شده را شمارش خواهد کرد و بسته‌های از دست رفته را مشخص میکند.

در این آزمایش که در حدود یک ساعت به طول انجامید، ۶۴ حالت قابل تنظیم بررسی شد و تنظیماتی که در آن هیچ بسته از دست رفته ای وجود نداشت در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به میزان پهنای باند و تاخیر ناشی از ارسال اطلاعات می‌توان تنظیمات مناسب را از جدول (۲) بدست آورد. البته نباید از این موضوع چشم‌پوشی کرد که، آزمایش انجام شده برای گره فرستنده و گیرنده با ماژول لورا و آنتن با توان خروجی ۱۰ وات انجام شده است. این موضوع از آنجا حائز اهمیت است که می‌توان با افزایش توان آنتن فاصله بین دو گره را افزایش داد، یا اینکه باعث افزایش نرخ انتقال اطلاعات شد.

جدول ۲- تنظیمات ماژول لورا بدون از دست رفتن بسته های ارسالی

SF	BW	CR	Air time(ms)	RSSI
۹	۴۱۷۰۰	۵	۳۶۴	-۱۰۴
۹	۴۱۷۰۰	۶	۳۹۱	-۱۰۳
۱۱	۱۲۵۰۰۰	۵	۴۰۴	-۱۱۲
۱۰	۶۲۵۰۰	۵	۴۱۶	-۱۱۱
۹	۴۱۷۰۰	۷	۴۱۶	-۱۰۳
۱۲	۲۵۰۰۰۰	۶	۴۱۷	-۱۰۹
۱۰	۶۲۵۰۰	۶	۴۱۷	-۱۱۰
۱۱	۱۲۵۰۰۰	۶	۴۳۰	-۱۱۱
۱۲	۲۵۰۰۰۰	۷	۴۴۲	-۱۰۷
۱۱	۴۱۷۰۰	۸	۴۴۲	-۱۰۷
۱۰	۶۲۵۰۰	۷	۴۴۳	-۱۰۹
۱۰	۴۱۷۰۰	۵	۶۲۴	-۱۱۰
۱۰	۴۱۷۰۰	۶	۶۳۷	-۱۰۹
۱۰	۴۱۷۰۰	۷	۶۶۳	-۱۰۸
۱۲	۱۲۵۰۰۰	۶	۸۵۹	-۱۰۹
۱۱	۶۲۵۰۰	۶	۸۵۹	-۱۰۹
۱۱	۶۲۵۰۰	۷	۸۹۸	-۱۰۹
۱۱	۴۱۷۰۰	۶	۱۲۸۷	-۱۰۹
۹	۶۲۵۰۰	۸	۱۳۷۹	-۱۰۹
۱۰	۱۲۵۰۰۰	۸	۱۸۴۷	-۱۰۸
۱۱	۶۲۵۰۰	۸	۲۷۷۱	-۱۰۷

۴- نتیجه گیری

با توجه به اینکه ماژول LoRa توان مصرفی پایین تر و برد و نرخ ارسال بالاتر در مقایسه با بقیه پروتکل ها مانند Zigbee, Wifi دارد در این مقاله از این ماژول استفاده شده است که نتایج بدست آمده نشان از بهتر بودن این ماژول در این کاربردها می باشد. همچنین پروتکل مسیریابی پیشنهادی این قابلیت را دارد که بتواند داده ها را با کمترین تاخیر و کمترین توان انتقال دهد و در برابر تغییرات ساختار شبکه مقاوم می باشد. اگر در شبکه گره ای از دست برود این شبکه، این قابلیت را دارد که مسیرهای جایگزین را به سرعت پیدا کرده و داده را با کمترین تاخیر به مقصد برساند. با توجه به این قابلیت ها، این شبکه برای استفاده در سیستم های نظارت دریایی بسیار مناسب است و می تواند در بسیاری از پژوهش های دریایی مورد استفاده قرار گیرد.

۵- منابع

- (1) Xu, G., Shen, W., & Wang, X. 2014. Applications of Wireless Sensor Networks in Marine Environment Monitoring: A Survey. *Sensors*, 14(9), 16932-16954.
- (2) Wu, D., & Liebeherr, J, 2023, "A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 19, pp. 16700-16714.



- (3) A. Huang, M. Huang, Z. Shao, X. Zhang, D. Wu and C. Cao, 2019, "A Practical Marine Wireless Sensor Network Monitoring System Based on LoRa and MQTT," IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2019, pp. 330-334.
- (4) Lundell, D., Hedberg, A., Nyberg, C., & Fitzgerald, E., 2018. A Routing Protocol for LoRA Mesh Networks. In 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"
- (5) Al-Gumaei, Y.A., Aslam, N., Chen, X., Raza, M., Ansari, R.I., 2022, Optimizing Power Allocation in LoRaWAN IoT Applications. IEEE Internet of Things J., 9, 3429–3442.
- (6) Zulfiqar, A., Qureshi, K., Al-Shamayleh, A., Akhunzada, A., Aadil, R. 2023 "Delay Optimization in LoRaWAN by Employing Adaptive Scheduling Algorithm with Unsupervised Learning". IEEE Access, vol. 11, pp. 2545-2556,
- (7) Tran, H.P.; Jung, W.-S.; Yoo, D.-S.; Oh, H. 2022, "Design and Implementation of a Multi-Hop Real-Time LoRa Protocol for Dynamic LoRa Networks" MDPI Sensors, vol. 22.

چالش های بلاک چین برای اینترنت اشیاء زیر آب

فاطمه قیّم، محمد اسماعیل دوست*، مقداد محمدی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: m_doust@kmsu.ac.ir

چکیده

اینترنت اشیاء زیر آب¹ (IOUT) با توجه به کاربردهای فراوان آن در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بهبود امنیت در ارتباطات زیر آب شامل سنسورهایی که اطلاعات قابل توجهی را ضبط می کنند و داده ها را به مرکز نظارت موجود در سطح زمین ارسال می کنند یکی از موارد پر اهمیت این حوزه می باشد. اطلاعات منتقل شده بسیار حساس است که مشکلات متعددی مانند سرقت داده ها، هک شبکه و شکستن سیستم های ارتباطی را به ارمغان می آورد. همچنین نیاز شدید به ارائه راه حل های امن و قابل اعتماد برای پردازش و ذخیره سازی مقدار زیادی از داده های وجود دارد. در این مقاله ضمن بررسی ارتباطات زیر آب و ساختار کلی بلاک چین، چالش های موجود در حوزه بلاک چین در ارتباطات زیر آب مورد بررسی قرار می گیرد.

کلید واژه: امن و قابل اعتماد، بلاک چین، ارتباطات زیر آب، اینترنت اشیاء زیر آب.

۱-مقدمه

بلاک چین یک پایگاه داده دیجیتال غیر متمرکز است که زنجیره ای از بلوک های امضا شده رمزنگاری را بر روی یک شبکه همتا به همتا حمل می کند. پیشرفت بلاک چین از تکامل رمزنگاری و بیت کوین با ویژگی های مهم منحصر به فرد آن در حفظ شفافیت و حفظ حریم خصوصی در شبکه توزیع شده پیشی گرفت. این اهرم قدرت استفاده از فن آوری بلاکچین در بخش های مختلف از جمله امور مالی و تجارت، مدیریت زنجیره تامین، پزشکی و مراقبت های بهداشتی و بسیاری دیگر از خدمات صنعتی استفاده می کند. اینترنت اشیاء از طریق برنامه هایی مانند شهرهای هوشمند، کشاورزی دقیق، مراقبت های بهداشتی هوشمند و غیره انقلابی در جامعه ایجاد کرده اند و این به عنوان یک اکوسیستم تعریف شده است که یک دستگاه فیزیکی را به سایر دستگاه های فیزیکی یا چیزهایی در سراسر جهان متصل می کند که از طریق اینترنت به هم متصل می شوند. اینترنت اشیاء می تواند نقش مهمی در چندین فعالیت / برنامه کاربردی در صنعت دریایی نیز ایفا کند. بهبود مستمر تکنولوژی اینترنت اشیاء در کاربردهای دریایی منجر به توسعه یک پدیده ای تازه به نام اینترنت اشیاء زیر آب شده است. اینترنت اشیاء زیر آب به عنوان اتصال دستگاه های هوشمند به هوشمند توصیف می شود که در زیر سطح آب ثابت یا متحرک هستند. در سال های اخیر، چندین شیء هوشمند زیر آب توسعه یافته که وسایل نقلیه سطحی مستقل، وسایل نقلیه زیر آب مستقل و وسایل نقلیه زیر آب از راه دور هوشمند برجسته برای کاوش منابع زیر آب هستند.

اینترنت اشیاء زیر آب شباهت هایی از لحاظ ساختار و عملکرد با همتای زمینی خود یعنی اینترنت اشیاء دارد. با این حال، آن ها از لحاظ موارد زیر باهم تفاوت دارند:

۱. روش های ارتباطی مرتبط
۲. روش های متفاوت در ردیابی
۳. مشکل در شارژ باتری
۴. فناوری های متفاوت برداشت انرژی

¹ Internet of Underwater Things

۵. تراکم شبکه ی مختلف

۶. تکنیک های متفاوت در زمینه ی بومی سازی

اکوسیستم اینترنت اشیا زیر اب با تعداد زیادی از اشیاء هوشمند _ هوشمند مستقر شده است. در نتیجه، تقاضای رو به رشد برای ارتباطات دستگاه و شبکه با این دستگاه ها چالش جدیدی را برای این اکوسیستم به ارمغان می آورد. جزء ذاتی مورد نیاز برای برقراری ارتباط دستگاه، رسانه یا کانالی است که از طریق ان اطلاعات در میان اشیاء هوشمند در شبکه به اشتراک گذاشته می شود. "شبکه های حسگر بدون سیم زیر آب" یکی از سیستم های شبکه موجود برای ارتباطات زیر اب است که در چندین پروژه اینترنت اشیا زیر اب اخیر استفاده می شود. همچنین سیستم های شبکه های حسگر بدون سیم زیر آب با سنسورهای زیر اب متعدد نصب شده با مودم های اکوستیک مستقر شده اند که مسئول جمع اوری اطلاعات مهم تر مانند دمای اب، اجزای شیمیایی، فشار و غیره هستند. داده های جمع اوری شده به عوامل مختلف در سطح اب به نام سینک ها هدایت می شود که با مودم های اکوستیک و رادیویی طراحی شده اند.

با پیشرفت اینترنت اشیا زیر اب، چندین محقق به طور فعال در حال بررسی تحقیقات زیر اب برای تعامل با دستگاه های ارتباطی هستند، بنابراین تکنولوژی دریایی هوشمند را فعال می کند. در نتیجه، تعداد قابل توجهی از سنسورهای اینترنت اشیا زیر اب نه تنها به عنوان نقاط جمع اوری داده ها عمل می کنند، بلکه عملکرد سایر اجزای زیر اب مانند دوربین ها، هیدروفون ها، محرک ها و دیگران را تسهیل می کنند. در میان این موارد، چند سنسور قابل توجه در مورد بحث قرار گرفت. AV ها از سنسورهای صوتی برای اندازه گیری مسیر ناوبری و موقعیت اشیا هوشمند استفاده می کنند. برای تشخیص اینکه آیا اشیا هوشمند وجود دارند یا خیر، سنسورهای مجاورت برای پیدا کردن اشیا نزدیک با ارسال سیگنال های الکتریکی استفاده می شود. سنسورهای فشار برای تعیین سطح فشار استفاده می شوند که برای برنامه های نظارت بر محیط زیست مفید است. محققان اقیانوس از این اطلاعات مهم تولید شده توسط سنسورهای اینترنت اشیا زیر اب برای بررسی دقیق بخش های ناشناخته زندگی اقیانوس و منابع زیر اب استفاده می کنند.

۲- انگیزه های اصلی برای ادغام بلاک چین با اینترنت اشیا زیر اب

بهبود امنیت در ارتباطات زیر اب یکی از مهم ترین دلایل ادغام بلاکچین و اینترنت اشیا زیر اب است. بدین صورت که سنسورها اطلاعات قابل توجهی را ضبط کرده و داده ها را به مرکز نظارت موجود در سطح زمین ارسال می کنند. از آنجایی که اطلاعات منتقل شده بسیار حساس است و ممکن است مشکلات متعددی مانند سرقت داده ها، هک شبکه و شکستن سیستم های ارتباطی را به ارمغان می آورد. همچنین نیاز شدید به ارائه راه حل های امن و قابل اعتماد برای پردازش و ذخیره سازی مقدار زیادی از داده های تولید شده از دستگاه های اینترنت اشیا زیر اب وجود دارد. معماری شبکه مبتنی بر بلاک چین راه حل هایی را برای چالش های فوق الذکر با ارائه تغییر ناپذیری و به اشتراک گذاری و مدیریت داده های قابل اعتماد ارائه می دهد و همچنین نظارت و ردیابی کارآمد دستگاه های زیر اب، فرایندها و منابع مرتبط را امکان پذیر می کند. بلاکچین تضمین می کند که داده های امن و قابل اعتماد در ارتباطات زیر اب بدون دخالت انسان یا اشخاص ثالث به اشتراک گذاری شود. علاوه بر این، نیاز به تصمیم گیری مستقل در محیط زیر اب خصمانه با اتصال شبکه بی ثبات با ایستگاه های پایه توسط بلاک چین پشتیبانی می شود. ویژگی های قرارداد هوشمند بلاک چین چنین تصمیم گیری پویا و مستقل را امکان پذیر می کند و ذخیره سازی داده های امن و قابلیت اطمینان چنین چارچوب هایی را تضمین می کند.

همانند اینترنت اشیا، اینترنت اشیا زیر اب نیز دارای چندین دستگاه هوشمند تعبیه شده با سنسورها است که برای ارتباطات داده در شبکه های حسگر بدون سیم زیر آب توسعه یافته و مورد استفاده قرار می گیرند. داده های تولید شده

از این دستگاه ها ممکن است برای برنامه های مهم مانند دفاع بسیار حساس باشد. الگوریتم اجماع فرایند تصمیم گیری برای گروهی از گره های فعال در شبکه ارتباطی است در حالی که معاملات قابل اعتماد در بلاک چین را ایجاد می کند. برای در دسترس بودن داده ها در بلاکچین های ادغام شده با اینترنت اشیا زیر اب ، از مکانیسم تحمل خطا استفاده کرده و یک شبکه موثر برای در دسترس بودن داده های منتقل شده از طریق دستگاه های اینترنت اشیا زیر اب ایجاد می کند. ساختار غیر متمرکز و توزیع شده بلاک چین یک ویژگی بسیار مهم برای تایید در دسترس بودن داده ها به طور مداوم است. این ویژگی بلاک چین برای در دسترس قرار دادن داده ها برای اقیانوس شناسان برای انجام تجزیه و تحلیل تحقیقات و تحقیقات خود در راحتی آنها حیاتی است.

اطلاعات در سراسر جهان پخش می شود به طوری که هیچ نقطه ای از شکست وجود ندارد. این با ذخیره سازی داده های بلاک چین در میلیون ها دستگاه در شبکه توزیع شده گره ها به دست می آید. از این رو، داده ها و شبکه در برابر هر گونه حمله مخرب یا نقص فنی در شبکه بسیار مقاوم هستند. به همین دلیل، در دسترس بودن داده ها در شبکه ارتباطی اینترنت اشیا زیر اب ادغام شده با بلاک چین امکان پذیر است.

حریم خصوصی داده ها در اینترنت اشیا زیر اب بدین صورت است که مهاجمان نمی توانند از داده ها سوء استفاده کنند یا آنها را به دست آورند، زیرا کاربران می توانند داده های خود را با کلیدهای خصوصی و عمومی در یک معامله بلاک چین کنترل کنند، در نتیجه مالکیت داده ها را امکان پذیر می کند. صاحبان داده ها می توانند کنترل کنند که چه زمانی، چگونه و تا چه حد شخص ثالث می تواند به داده ها دسترسی داشته باشد. بنابراین حریم خصوصی داده های تولید شده از دستگاه های اینترنت اشیا زیر اب می تواند توسط تکنولوژی بلاکچین حفظ شود.

علاوه بر این، با بزرگنمایی قابل توجهی از تکنولوژی دریایی زیر اب، ترکیب بلاک چین با اینترنت اشیا زیر اب راه را برای کشف منابع اب زیرزمینی جهان هدایت می کند و می تواند به نفع انسان و زندگی دریایی استفاده شود. انگیزه ادغام بلاک چین با اینترنت اشیا زیر اب در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- ادغام بلاکچین و اینترنت اشیا زیر اب

۳- چالش ها و جهت های آینده

ادغام اینترنت اشیا زیر آب با بلاک چین امنیت، اجماع، ردیابی، حریم خصوصی و شفافیت را تضمین می کند که آن را به یک راه حل ممکن برای بسیاری از چالش های پیش روی در محیط زیر آب تبدیل می کند. با این حال، ادغام بلاک چین در چنین محیط محدود منابع در واقع چالش های خاصی را که در زیر ذکر شده است، ایجاد می کند.

۳-۱- قدرت محاسباتی

اکوسیستم اینترنت اشیا زیر آب شامل دستگاه های مختلف با قابلیت های محاسباتی مختلف است. یکی از دلایل اصلی ادغام بلاک چین با اینترنت اشیا زیر آب به دلیل امنیتی است که ارائه می دهد. مکانیسم اجماع در بلاک چین هرگونه دخالتی را از جانب شخص ثالث صلب میکند. در نتیجه امنیت را تا حد زیادی بهبود می بخشد. با این حال، ادغام بلاک چین و اینترنت اشیا زیر آب نیاز به هزینه محاسباتی بالایی دارد تا الگوریتم اجماع پروتکل اثبات کار، کار کند. این امر مستلزم آن است که استخراج کنندگان از سیستم های محاسباتی با قدرت محاسباتی بسیار بالا استفاده کنند. از آنجا که اکثر دستگاه های اینترنت اشیا زیر آب دارای قدرت محاسباتی کم هستند، به کار گیری الگوریتم های اجماع مانند الگوریتم پروتکل اثبات کار ممکن است دشوار باشد.

۳-۲- ظرفیت ذخیره سازی

پذیرش بلاک چین در اینترنت اشیا زیر آب نیاز به یک سرور مرکزی برای رسیدگی به معاملات و داده های دستگاه را از بین می برد. با این حال، دفتر کل باید در گره های اینترنت اشیا زیر آب ذخیره شود. تعداد چنین دفاتری می تواند در طول زمان افزایش یابد و رسیدگی به آن کاملاً چالش برانگیز باشد. دستگاه های اینترنت اشیا زیر آب معمولاً فضای ذخیره سازی بسیار کمی دارند. فضای دیسک نسبتاً پایین تر و حافظه دستگاه های اینترنت اشیا زیر آب و مسائل مربوط به اتصال به شبکه، برخی از عوامل کلیدی موثر بر پذیرش تکنولوژی بلاک چین در محیط اینترنت اشیا زیر آب است. اکثر پیاده سازی های فعلی بلاک چین تنها می توانند چند تراکنش را در هر ثانیه انجام دهند. این یک تنگنای دیگر در مورد محیط اینترنت اشیا زیر آب خواهد بود. با این حال، داده های تولید شده از سنسورهای اینترنت اشیا زیر آب بسیار بزرگ هستند و مدیریت چنین داده های بزرگ را واقعاً دشوار می کند. ادغام اینترنت اشیا زیر آب با یک بلاک چین غیر متمرکز و عمومی بسیار سخت است و باید با توجه به افزایش نیازهای ذخیره سازی داده ها مورد توجه قرار گیرد.

۳-۳- مقیاس پذیری

یکی از چالش های قابل توجه در باره ی ادغام بلاکچین در محیط اینترنت اشیا زیر آب مقیاس پذیری است . اینترنت اشیا زیر آب بسیار بزرگ است و در آینده با افزایش تعداد اشیا زیر آب بزرگتر نیز خواهد شد. هدف اینترنت اشیا زیر آب ایجاد یک شبکه جهانی از اشیا زیر آب به هم پیوسته و اتصال دیجیتالی به عناصر ساحلی، ساحلی و زیر آب است. معاملات متعددی از اکوسیستم اینترنت اشیا زیر آب تولید خواهد شد. بلاک چین توانایی مقیاس پذیری را با افزایش اندازه شبکه و حجم معاملات محدود می کند؛ چرا از یک پروتکل اجماع استفاده می کند که کاربران را قادر می سازد معاملات غیر قابل برگشت و زمان بندی شده را ثبت کنند و از ایجاد سوابق نادرست جلوگیری کنند. مکانیسم اجماع همه شرکت کنندگان در شبکه را در خود جای می دهد تا در مورد معامله توافق کنند و تعداد معاملات را محدود کنند. الگوریتم های اجماع معمولی مانند پروتکل اثبات کار و پروتکل اثبات سهام نیاز به یک معامله مشترک دارند که توسط گره های شرکت کننده در اکوسیستم بلاک چین تایید شود که این روند اعتبار سنجی معامله را کند می کند.

۴-۴- استانداردسازی و حکمرانی

استاندارد سازی یک جنبه حیاتی در سیستم های اینترنت اشیا زیر آب ادغام شده با بلاک چین است. عدم استاندارد سازی مناسب و حاکمیت سختگیرانه منجر به چالش های مختلف نظارتی از نظر تمرکز زدایی، ناشناس بودن و تغییر ناپذیری می شود. سیاست های سختگیرانه از نظر استفاده پایدار از اقیانوس ها مورد نیاز است. بنابراین، حکومت اقیانوس باید به عنوان یک جنبه مهم منطقه ای و جهانی در نظر گرفته شود. نویسندگان در (۱) به این موضوع پرداختند که چگونه حکومت اقیانوس پایدار می تواند توسط مقامات اجرا شود.

سه عامل خطر مهم در کار آنها مورد توجه قرار گرفت:

۱. تاثیر بهره برداری بیش از حد از منابع

۲. توزیع خدمات غیر عادلانه

۳. سازگاری ناکافی با شرایط محیطی همیشه در حال تغییر (۲)

چارچوبی که به جنبه های "عدالت" در حکومت اقیانوس می پردازد توسط (۳) مطرح شد. ابعاد برابری اجتماعی در چارچوب در نظر گرفته شده شامل "کجا"، "چرا"، "چه کسی"، "چه"، "چه زمانی" و "چگونه". ادغام بلاک چین با اینترنت اشیا زیر آب نیز نیاز به استاندارد سازی و سیاست های موثر دارد، بنابراین یک روش ضددامپینگ برای بررسی و بهره برداری از منابع را فراهم می کند.

۴-۵- مهاجرت از سیستم های میراث

سیستم های قدیمی که در حال حاضر در محیط زیر آب استفاده می شوند، در برابر اصلاح داده ها و سرقت ها آسیب پذیرتر هستند. برنامه های کاربردی چیزهای زیر آب از پیاده سازی بلاک چین به عنوان یک راه حل که DLT را سازگار می کند، بهره مند می شوند. ادغام پروژه های اینترنت اشیا زیر آب و بلاکچین پیچیده است زیرا هر دو شامل نیچ مارکتینگ هستند. پیدا کردن توسعه دهندگان ماهر مناسب برای پیاده سازی تکنولوژی بلاک چین در یک سازمان سخت است. ساختار حاکمیت بلاک چین در اینترنت اشیا زیر آب شرکت کنندگان، مالکیت داده ها، معیارهای خروج و ورود و شرایط به اشتراک گذاری اطلاعات بین شرکت کنندگان را تعریف می کند. ابزارهای مورد نیاز برای ساخت اکوسیستم بلاک چین در حال حاضر در حال پیشرفت هستند. این ترکیب پیچیدگی ادغام تکنولوژی با سیستم های موجود است. مهاجرت از سیستم های قدیمی تر گران است زیرا برنامه باید به شدت به کارشناسان برای رسیدگی به مشکلاتی که در مراحل اولیه استقرار رد می دهد، تکیه کند، بنابراین این یک فرایند وقت گیر است.

۴-۶- مصرف انرژی

مصرف انرژی در یک شبکه اینترنت اشیا زیر آب پیاده سازی شده توسط بلاک چین در مقایسه با محیط های زمینی متفاوت است. هر دوی این فناوری ها انرژی زیادی را برای ارائه خدمات خاص خود مصرف می کنند (۴). در اینترنت اشیا زیر آب، تمام سنسورهای زیر آب مستقر شده با سنسور سینک مرکزی برای ارائه اطلاعات جمع آوری شده از دستگاه های مختلف ارتباط برقرار می کنند. تمام شبکه های اینترنت اشیا که با موفقیت تاسیس شده اند، هنگام استقرار در زیر آب با چالش های مختلفی مواجه شده اند. این شامل ارتباطات کوتاه مدت، تضعیف بالا، تابش ماوراء بنفش عظیم، هزینه بالای استقرار سنسور و غیره است.

علاوه بر این، محیط زیر آب ویژگی های منحصر به فرد خود را دارد. سیگنال زمینی نمی تواند برای ارتباطات زیر آب استفاده شود. در عوض، سیگنال های صوتی ترجیح داده می شوند. ارائه ارتباطات کارآمد زیر آب از طریق سیگنال های

صوتی یک کار چالش برانگیز است زیرا سیگنال ها از تضعیف بالا، تاخیر انتشار طولانی و نرد بیت بالا رنج می برند. به همین دلیل، شکست های ارتباطی بیشتری ممکن است بین سنسورها رد دهد که می تواند منجر به افزایش تعداد انتقال مجدد داده ها شود. سنسور اینترنت اشیا زیر آب دارای قدرت محدودی است و شارژ یا جایگزینی باتری در اینترنت اشیا زیر آب آسان نیست.

تحقیقات گسترده ای برای حل مسائل مربوط به انرژی بلاک چین انجام شده است، اما هنوز هم به عنوان یک چالش کلیدی باقی مانده است. هنگامی که خدمات بلاک چین با شبکه اینترنت اشیا زیر آب اجرا می شود، هر سرویس نیاز به انرژی بالا در هر معامله دارد. تاخیرهای طولانی نیز ممکن است قبل از تایید معامله رد دهد. بنابراین، مصرف انرژی شبکه های اینترنت اشیا زیر آب ادغام شده با بلاک چین یک مشکل تحقیقاتی پیچیده است که نیاز به توجه بیشتری از جامعه تحقیقاتی دارد.

۴-۷- هزینه

استقرار سنسورهای ارتباطی در محیط زیر آب یک مسئله چالش برانگیز است. علاوه بر این، نصب، مدیریت و نگهداری این دستگاه های ارتباطی در مقایسه با شبکه های زمینی بسیار پیچیده تر است. علاوه بر این، سنسورهای زیر آب می توانند به راحتی آسیب ببینند یا از بین بروند یا در طول فرایند حفاری یا به دلیل محیط های خشن زیر آب غیر کاربردی شوند. بنابراین، نصب کارآمد سنسورها مورد نیاز است که می تواند کار نصب و نگهداری مجدد را کاهش دهد. به عنوان مثال، یک سنسور ارتباطی که نیاز به انرژی بیشتری دارد باید در نزدیکی سطح یا نزدیک منبع قدرت برای سهولت مدیریت و همچنین کاهش هزینه استقرار مستقر شود. علاوه بر این، برای جلوگیری از خرابی های مکرر باتری سنسورها، پروتکل های صرفه جویی در انرژی کارآمد می تواند برای ارتباطات استفاده شود.

۵- نتیجه گیری

بلاک چین را می توان به عنوان آینده اینترنت در نظر گرفت که پتانسیل تغییر نحوه کار سیستم های اقتصادی و اجتماعی فعلی را دارد. ویژگی های منحصر به فرد بلاک چین به حفاظت از دارایی ها، پذیرش ارزهای رمزنگاری شده، قراردادهای هوشمند، رای گیری و غیره کمک می کند. این ثابت می کند که در اکوسیستم اینترنت اشیا زیر آب نیز سودمند است. اگرچه ثابت شده است که سیستم های ارتباطی اینترنت اشیا زیر آب برای سیستم های مختلف، از رصدخانه های کوچک تا بنادر و اقیانوس ها مفید هستند، اما چالش های متعددی را ایجاد می کنند. این مقاله زمینه مربوط به اینترنت اشیا زیر آب و بلاکچین را معرفی کرد و توضیح داده شد که چگونه چنین ادغامی چالش هایی را بر دارد.

۶. منابع

1. Sweta Bhattacharya, et al., 2022, "Blockchain for Internet OF Underwater Things: State-of-the-Art, Applications, Challenges, and Future Directions", 14, 1-21.
2. Haas, B.; Mackay, M.; Novaglio, C.; Fullbrook, L.; Murunga, M.; Sbrocchi, C.; McDonald, J.; McCormack, P.C.; Alexander, K.; Fudge, M.; et al. The future of ocean governance. *Rev. Fish Biol. Fish.* 2022, 32, 253–270. [CrossRef] [PubMed]
3. Crosman, K.M.; Allison, E.H.; Ota, Y.; Cisneros-Montemayor, A.M.; Singh, G.G.; Swartz, W.; Bailey, M.; Barclay, K.M.; Blume, G.; Colléter, M.; et al. Social equity is key to sustainable ocean governance. *NPJ Ocean. Sustain.* 2022, 1, 4. [CrossRef]



4. Joannou, D.; Kalawsky, R.; Martínez-García, M.; Fowler, C.; Fowler, K. Realizing the role of permissioned blockchains in a system engineering lifecycle. *Systems* 2020, 8, 41. [CrossRef]
5. Kesari Mary, D.R.; Ko, E.; Yoon, D.J.; Shin, S.Y.; Park, S.H. Energy Optimization Techniques in Underwater Internet of Things:
6. Issues, State-of-the-Art, and Future Directions. *Water* 2022, 14, 3240. [CrossRef]



شبیه سازی کنترلی حرکت زیرسطحی هوشمند و تاثیر زاویه هدینگ اولیه، سرعت و جهت جریان آب بروی پارامترهای دینامیکی

علی زکیان گلوگاهی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: Ali.Zakiyan@aut.ac.ir

چکیده

یک زیرسطحی هوشمند باید از نظر دینامیکی عملکرد پایداری داشته باشد و تا حد امکان بدون تغییر وضعیت صفحات کنترلی و یا تراسترهای جانبی و با استفاده از نیروی‌های سطوح کنترلی، مسیر حرکتش در آب را حفظ کند. از طرفی باید بتواند در صورت لزوم تغییر موقعیت و سرعت دهد و سپس به صورت ایمن و سریع به حالت پایدار برسد. سطوح کنترلی اعم از بالکها و سکان باعث می‌شوند تا زیرسطحی حرکت غوص یا صعود را انجام داده و در زیرسطحی و سطح آب عملیات خود را انجام دهد. اگرچه اندازه سطوح کنترلی مهم هستند اما در این مقاله سعی شده بدنه و ملحقات زیرسطحی ثابت و چهار پارامتر مقدار زاویه انحراف در صفحه افق دلخواه، میزان عمق روی دلخواه، سرعت و جهت جریان آب بعنوان ورودی شبیه ساز مورد بررسی قرار گیرند. با برنامه نویسی زبان پایتون پارامترها را بعنوان ورودی گرفته و روش کنترلی پی آی دی را پیاده سازی کرده و خروجی آن نمودارهای مربوط به حرکات شش درجه آزادی زیرسطحی، میزان دوران بالکها و سکان و مشخصات رانش می‌باشد که مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کلید واژه: کنترل حرکت، زیرسطحی هوشمند، شبیه سازی کنترلی، اتوپایلویت هدینگ و عمق

Control simulation of intelligent subsurface movement and the effect of initial heading angle, speed, and direction of water flow on dynamic parameters

Ali Zakiyan Galougahi

Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

* Corresponding Author E-mail: Ali.Zakiyan@aut.ac.ir

Abstract— AUV must have a stable performance in terms of dynamics and maintain its path in the water as much as possible without changing the position of the control plates or side thrusters and using the forces of the control surfaces. On the other hand, it should be able to change position and speed if necessary and then reach a stable state safely and quickly. The control surfaces, including the wings and the rudder, make the sub-surface dive or climb and perform its operations in the sub-surface and water surface. Although the size of the control surfaces are important, in this article, it is tried to examine the body and fixed subsurface attachments and four parameters of the angle of deviation in the desired horizon plane, the amount of depth on the desired surface, the speed and direction of the water flow as input to the simulator. By programming the Python language, the parameters are taken as input and the PID control method is implemented, and the output is the graphs related to the movements of six subsurface degrees of freedom, the rotation rate of the stern plane and the rudder, and the thrust characteristics, which are investigated.

Keywords— motion control, Control simulation, Depth-Heading-Autopilot.

۱- مقدمه

کنترل زیرسطحی هوشمند شامل طراحی و اجرای مجموعه‌ای از الگوریتم‌های کنترلی است که می‌تواند زیرسطحی هوشمند را قادر به انجام ماموریت مورد نظر خود کند. یک سیستم کنترل معمولی برای زیرسطحی هوشمند شامل مجموعه‌ای از حسگرها، محرک‌ها و یک کنترل‌کننده است که داده‌های حسگر را پردازش کرده و سیگنال‌های کنترلی را برای محرک‌ها تولید می‌کند. سیستم کنترل برای یک زیرسطحی هوشمند معمولاً شامل چندین نوع مختلف کنترلر است، از جمله (۱):

۱-۱- کنترل نگرش^۱:

این کنترلر وظیفه حفظ جهت دلخواه زیرسطحی هوشمند در فضای سه بعدی را بر عهده دارد. ورودی را از حسگرهای اینرسی زیرسطحی هوشمند مانند شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌ها دریافت می‌کند و سیگنال‌های کنترلی را برای محرک‌های وضعیت زیرسطحی هوشمند مانند سکان‌ها، بالک‌ها و رانشگرها تولید می‌کند.

۲-۱- کنترل عمق:

این کنترلر وظیفه حفظ عمق مورد نظر زیرسطحی هوشمند را بر عهده دارد. ورودی را از حسگر عمق زیرسطحی هوشمند دریافت می‌کند و سیگنال‌های کنترلی را برای محرک‌های عمق زیرسطحی هوشمند مانند مخازن بالاست تولید می‌کند.

۳-۱- کنترل سرعت:

این کنترلر وظیفه حفظ سرعت مورد نظر زیرسطحی هوشمند را بر عهده دارد. این ورودی از سنسور سرعت زیرسطحی هوشمند دریافت می‌کند و سیگنال‌های کنترلی را برای پروانه‌های زیرسطحی هوشمند تولید می‌کند.

۴-۱- کنترل ناوبری:

این کنترل‌کننده مسئول تعیین موقعیت و جهت‌گیری زیرسطحی هوشمند نسبت به مجموعه‌ای از ایستگاه‌های بین‌راه یا یک طرح ماموریت از پیش تعریف شده است. این ورودی از جی پی اس، سنسورهای اینرسی و سایر حسگرهای محیطی زیرسطحی هوشمند دریافت می‌کند و سیگنال‌های کنترلی را برای هدایت زیرسطحی هوشمند به سمت مقصد تولید می‌کند. برای توسعه الگوریتم‌های کنترل برای یک زیرسطحی هوشمند، محققان از تکنیک‌های مختلفی مانند کنترل تطبیقی^۲، کنترل قوی^۳ و کنترل پیش‌بینی مدل^۴ استفاده می‌کنند. آن‌ها همچنین از شبیه‌سازی و آزمایش در محیط‌های کنترل‌شده، مانند مخازن آزمایشی یا دریاچه‌ها، برای اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم‌های کنترل و بهینه‌سازی آن‌ها برای کاربردهای دنیای واقعی استفاده می‌کنند. به طور کلی، کنترل زیرسطحی هوشمند یک فرآیند پیچیده و پویا است که به ترکیبی از سخت‌افزار، نرم‌افزار و قابلیت‌های سنجش محیطی نیاز دارد تا اطمینان حاصل شود که زیرسطحی هوشمند می‌تواند ماموریت مورد نظر خود را ایمن و دقیق انجام دهد. زیرسطحی هوشمند از حسگرهای مختلفی از جمله شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و حسگر عمق استفاده می‌کند تا به آن کمک کند کنترل حرکتی پایدار و دقیق را حفظ کند. همچنین دارای یک سیستم رانشگر است که آن را قادر می‌سازد در جهت‌های مختلف حرکت کند و مانورهای پیچیده‌ای مانند شناور شدن در محل یا اجرای پیچ‌های تند انجام دهد.

¹ Attitude control

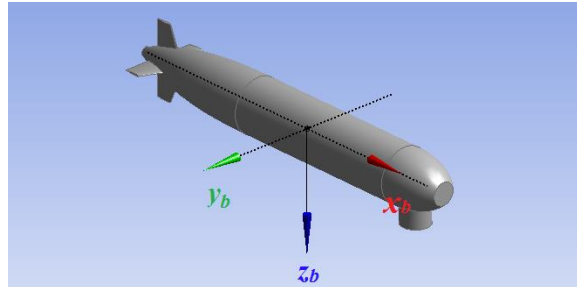
² adaptive control

³ robust control

⁴ model predictive control

۲- مشخصات زیرسطحی رموس ۱۰۰

مدل سه بعدی زیرسطحی مورد نظر در شکل ۳ نشان داده شده است و مشخصات کلی آن در جدول ۱ آمده است.



شکل ۳- مدل سه بعدی زیرسطحی

جدول ۱- مشخصات زیرسطحی

پارامتر	اندازه	واحد
طول	۱/۶	متر
قطر	۱۹	سانتی متر
وزن	۳۱/۹	کیلوگرم
سرعت	۲/۵	متر بر ثانیه

۲-۱- مشخصات سطوح کنترلی

سطوح کنترلی زیرسطحی شامل سکان برای هدایت در صفحه افقی و دو بالک (استرن پلن) برای هدایت در صفحه عمودی می‌باشد که در مشخصات آن‌ها در

جدول ۲ آمده است. در این مدلسازی موقعیت مولفه‌های نیرویی سطوح کنترلی هم مرکز با پاشنه زیرسطحی و در انتها در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات سطوح کنترلی

سکان	بالک (استرن پلن)
ضریب لیفت ۰/۵	ضریب لیفت ۰/۷
مساحت (متر مربع) ۰/۰۰۵	مساحت (متر مربع) ۰/۰۱
حداکثر دوران (درجه) ۳۰	حداکثر دوران (درجه) ۳۰

۲-۲- مشخصات رانش

زیرسطحی دارای یک موتور الکتریکی براسلس و پروانه سری و گنینگن سه پره که مشخصات کارکردی آن در جدول آمده است تراست و گشتاور مورد نیاز را فراهم می‌کند تا زیرسطحی سرعت ماموریت ۲/۵ متر بر ثانیه در دور ۱۵۲۵ دور در دقیقه حرکت کند.

جدول ۳- مشخصات کارکردی پروانه

پارامتر	اندازه	واحد
دور	۱۵۲۵	دور در دقیقه
قطر	۱۴	سانتی متر
ضریب کاهش تراست	۰/۱	-
ضریب ویک	۰/۰۵۶	-
ضریب تراست	۰/۴۵۶۶	-
ضریب گشتاور	۰/۰۷	-
ضریب پیشروی	۰/۶۶۳۲	-

۳- معادلات دینامیکی حرکت

تعیین رفتار حرکتی و کنترل یک زیر سطحی هاورینگ تابع معادلات دینامیک حرکت حاکم بر آن است. برای تحلیل معادلات دینامیک به ضرایبی نیاز است که به ضرایب هیدرودینامیکی معروف هستند. معادلات دینامیک حرکت برای پیش بینی رفتار و مسیر حرکت جسم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این معادلات در یک طرف خود دارای متغیر نیرو یا ممان هستند که از طرف سیال و نیروهای خارجی به جسم وارد می‌شوند و در طرف دیگر مشخصات و متغیرهای حل مانند سرعت‌ها و شتاب‌ها قرار گرفته اند برای شبیه سازی مسیر حرکت با داشتن نیرو و ممان می توان معادلات را حل کرد و سرعت و شتاب جسم را برای گام زمانی بعدی پیش بینی نمود بنابراین نیاز است تا در هر گام زمانی مقدار نیرو و ممان وارد بر جسم از طرف سیال معین باشد تا گام زمانی بعدی اجرا شود راه های مختلفی برای تعیین این نیرو وجود دارد. مولفه های نیروهای خارجی F ، نسبت به دستگاه ثابت، بدنه‌ای به عنوان (X, Y, Z) و ممان حاصله M ناشی از این نیروهای خارجی حول مبدا O ، به عنوان معادلات حرکت شش درجه آزادی زیرسطحی نسبت به دستگاه ثابت بدنه‌ای مرجع را بیان می‌کنند که می‌تواند به صورت ذیل نوشته شوند (۲).

حرکت سوای:

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr - \dot{q})] = X \quad (1)$$

حرکت سرچ:

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + pr^2) + z_G(pr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y \quad (2)$$

حرکت هیو:

$$m[\ddot{w} - up + vp - z_G(p^2 + qp^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z \quad (3)$$

حرکت رول:

$$I_x \dot{p} + (\dot{I}_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[(\dot{w} - up + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \quad (4)$$

حرکت پیچ:

$$I_y \dot{q} + (\dot{I}_x - I_z)rp - (\dot{p} + pr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (5)$$

حرکت یاو:

$$I_z \ddot{r} + (I_y - I_x) \dot{p}q - (\dot{q} + pr)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wp)] = N \quad (6)$$

که $\bar{\alpha} = (p, q, r)$ و $V=(u,v,w)$ مولفه های سرعت خطی و زاویه ای در دستگاه بدنه ای می باشند و اندیس G مرکز ثقل رونده را مشخص می کند.

۴- مشخصات کنترلی اتوپایلوت حرکت عمودی و افقی

کنترل همزمان در جهت افقی و عمودی به اصطلاح اتوپایلوت هدینگ و عمق^۱ زیرسطحی با استفاده از دو کنترلر از نوع PID انجام شده است و دور پروانه به عنوان دستور گام^۲ داده می شود. مراحل زیر در تهیه شبیه سازی کامپیوتری این زیرسطحی دنبال شده است (۳).

۱- عمق مورد نظر و تنظیمات هدینگ را برای حالت های مختلف که در

جدول ۴ آمده سیستم تعیین می شود.

جدول ۴- داده های کنترلی اولیه

حالت	عمق (متر)	زاویه هدینگ (درجه)	سرعت جریان آب (متر بر ثانیه)	جهت جریان آب (درجه)
۱	۳۰	۳۵	۰/۵	۱۷۰
۲	۳۰	۴۵	۰/۵	۱۷۰
۳	۳۰	۳۵	۰/۵	۱۵۰
۴	۳۰	۳۵	۱	۱۷۰

با توجه به مقادیر جدول در چهار حالت ممکن میزان عمق روی و جهت جریان بصورت ثابت فرض شده است. در حالت ۱ و ۲ زاویه هدینگ متغیر می باشد و تاثیر تغییر زاویه هدینگ بر روی پارامترهای کنترلی زیرسطحی ارزیابی خواهد شد. در حالت ۳ همان مشخصات حالت ۱ را دارا می باشد اما با این تفاوت که جهت جریان آب تغییر کرده و تاثیر جهت جریان آب با حالت ۱ بررسی خواهد شد. در حالت ۴ سرعت جریان آب نسبت به حالت ۱ متغیر می باشد و تاثیر سرعت جریان بروی مشخصات کنترلی زیرسطحی بررسی خواهد شد و زیرسطحی چه رفتاری نسبت به این تغییرات انجام خواهد داد.

۲- دو کنترلر PID، یکی برای کنترل عمق و دیگری برای کنترل هدینگ تنظیم خواهد شد.

۳- متغیرهای کنترلی را برای هر کنترل کننده تعریف می شود. برای کنترل عمق، متغیر کنترل می تواند خطای عمق (تفاوت بین عمق مطلوب و واقعی) و برای کنترل هدینگ، متغیر کنترل می تواند خطای زاویه هدینگ (تفاوت بین هدینگ مورد نظر و واقعی) باشد.

¹ Depth-Heading-Autopilot

² step command

۴- بهره‌ها^۱ (تناسب، انتگرال و مشتق) برای هر کنترل کننده تنظیم می‌شود. این تنظیمات پاسخ کنترل کننده را تعیین می‌کنند و باید بر اساس دینامیک سیستم تنظیم شوند.

۵- با استفاده از حسگرهای مناسب، عمق و مسیر واقعی اندازه‌گیری می‌شود.

۶- الگوریتم کنترل PID را به طور مستقل برای هر کنترل کننده اعمال می‌شود. برای کنترل عمق، خروجی کنترل را با ضرب خطای عمق در بهره تناسب، جمع کردن انتگرال خطا در بهره انتگرال و اضافه کردن مشتق خطا در بهره مشتق محاسبه می‌شود. برای کنترل هدینگ، همان روش کنترل عمق را با استفاده از خطای زاویه هدینگ قابل استفاده است.

خروجی های کنترل از هر دو کنترل کننده جمع شده تا سیگنال کنترل نهایی بدست آید.

۷- سیگنال کنترل برای تنظیم دور پروانه اعمال می‌شود.

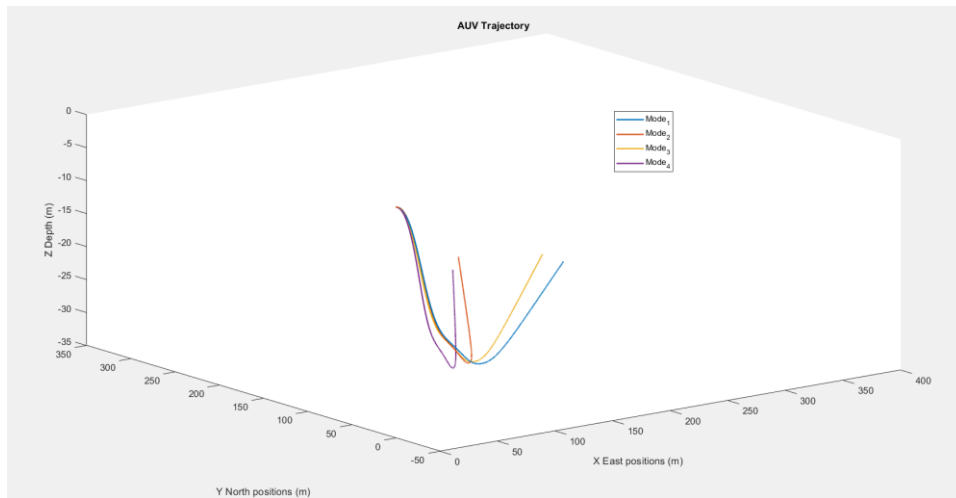
۸- مراحل ۵-۷ به صورت حلقه بسته تکرار می‌شود، به طور مداوم عمق و هدینگ اندازه‌گیری می‌شود، خطاها محاسبه شده، الگوریتم های کنترل PID اعمال و دور پروانه را تنظیم خواهد شد تا عمق و هدینگ مورد نظر به دست آید.

باید توجه داشت که تنظیم بهره‌های PID برای دستیابی به کنترل پایدار و بهینه بسیار مهم است. فرآیند تنظیم معمولاً شامل تنظیمات تکراری برای بهره‌ها بر اساس پاسخ سیستم و معیارهای عملکرد مطلوب است. همچنین مهم است که هر گونه اثرات جفت بین عمق و کنترل هدینگ در نظر گرفته شود و برای حفظ پایداری و عملکرد، بهره‌ها بر اساس آن تنظیم می‌شود (۴).

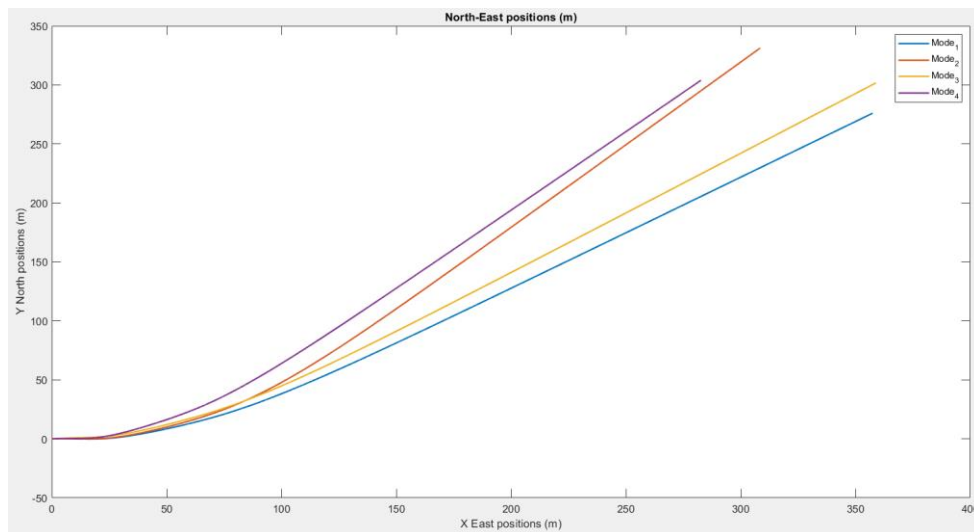
۶- تحلیل داده‌ها و نمودارهای حاصل از شبیه سازی

همانطور که در بخش قبل چهار حالت مختلف آورده شد بعنوان ورودی به نرم افزار شبیه ساز داده و در ۱۰۰۰۰ ایتريشن و به فاصله ۰/۰۲ شامل ۲۰۰ ثانیه حرکات شبیه سازی شده است و بعد از تحلیل داده‌ها نسبت به رسم نمودار اقدام کرده و با یکدیگر مقایسه خواهد شد. در قدم اول نمودارهای مسیر زیرسطحی در حالت‌های مختلف مورد بررسی خواهد گرفت. در شکل ۴ و شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نمودارهای مسیر سه بعدی، موقعیت در صفحه افقی که محور X به سمت شرق و محور Y به سمت شمال در نظر گرفته شده است و میزان عمق روی در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهند.

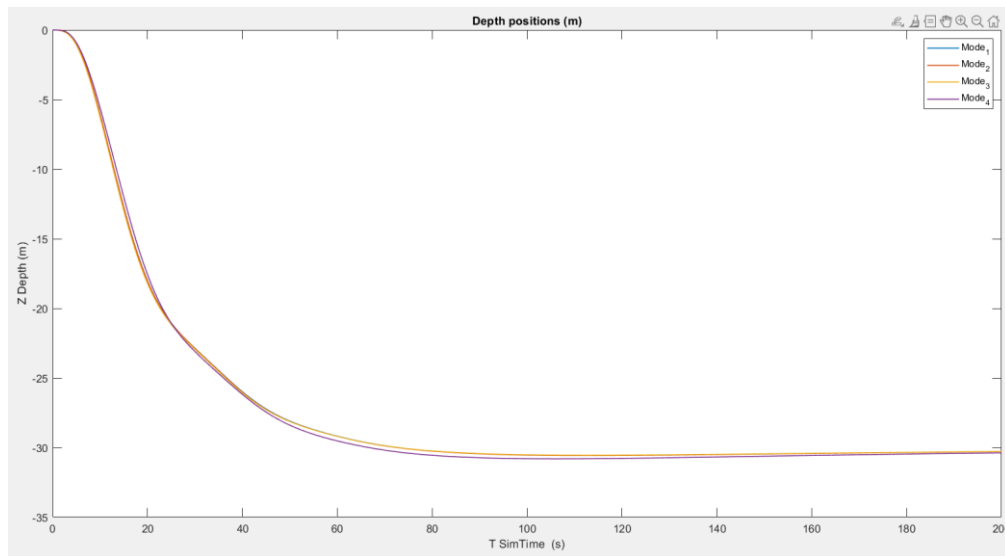
¹ gains (proportional, integral, and derivative)



شکل ۴- مسیر سه بعدی زیرسطحی

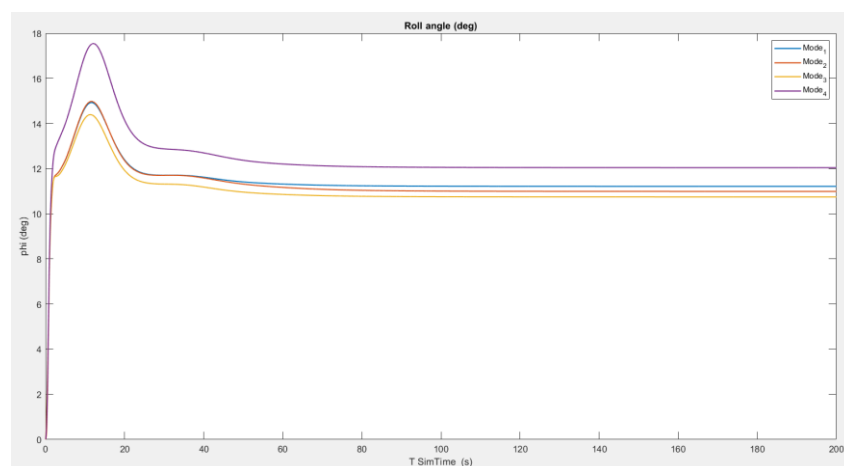


شکل ۵- مسیر صفحه افقی زیرسطحی

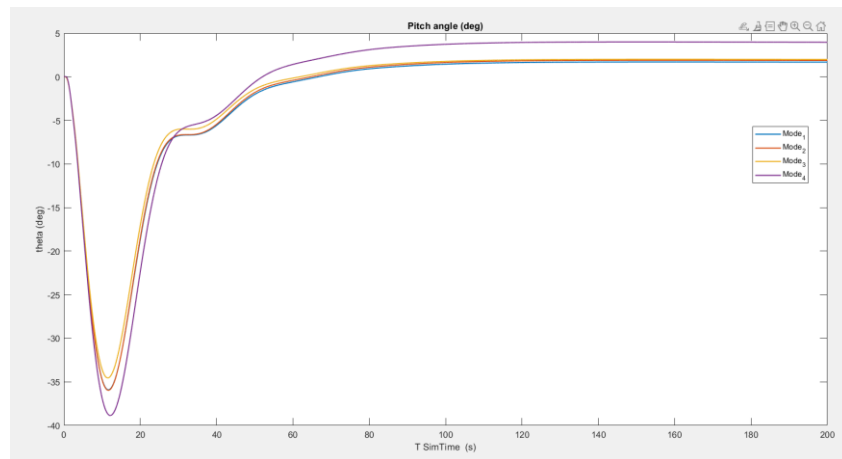


شکل ۶- موقعیت زیرسطحی در صفحه عمودی

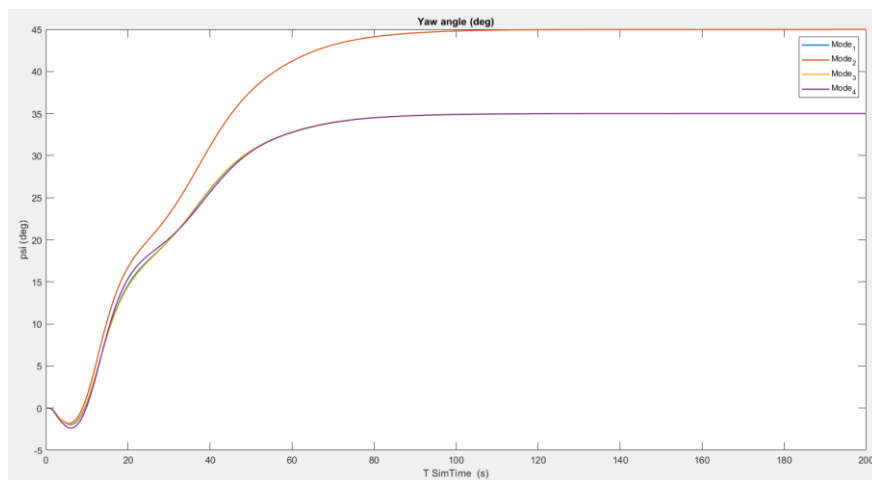
از تحلیل نمودارهای مسیر زیرسطحی می‌توان نتیجه گرفت در هر چهار حالت تقریباً در ثانیه ۸۰ در عمق ۳۰ متری غوص کرده است و تفاوت چشمگیری در میزان عمق روی دیده نمی‌شود. اما در صفحه افق حالت ۱ که حالت مرجع ماست با رنگ آبی مشاهده می‌شود. حالت ۳ فقط در جهت جریان با حالت ۱ متفاوت است و دیده می‌شود موقعیت زیرسطحی در صفحه افقی چقدر تغییر کرده است. حالت ۴ که سرعت جریان آب در آن دوبرابر حالت ۱ است به وضوح قابل مشاهده است که حتی اختلاف مکانی در صفحه افقی بیشتر از حالت ۲ با زاویه هدینگ اولیه ۴۵ درجه می‌باشد. دسته‌ای دیگر از پارامترهای کنترلی حرکات زاویه‌ای رول، پیچ و یاو هستند که نمودارهای مقایسه‌ای حالت‌های مختلف به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ و شکل ۹ آمده است.



شکل ۷- حرکت زاویه‌ای رول



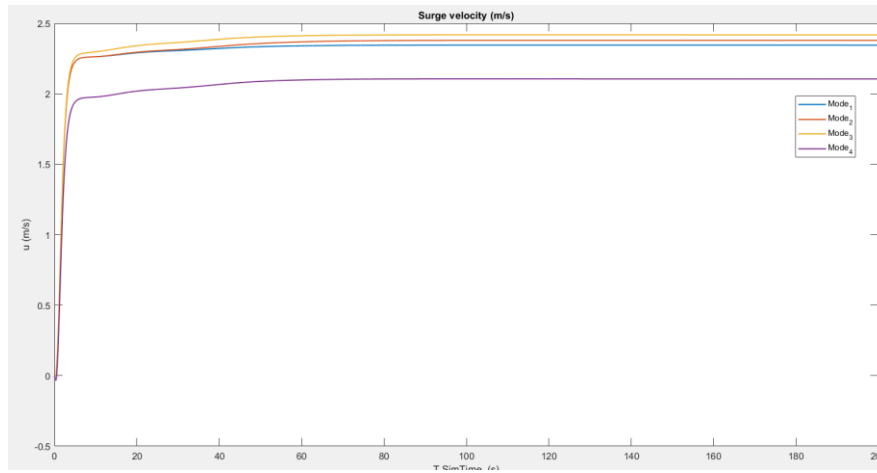
شکل ۸ - حرکت زاویه‌ای پیچ



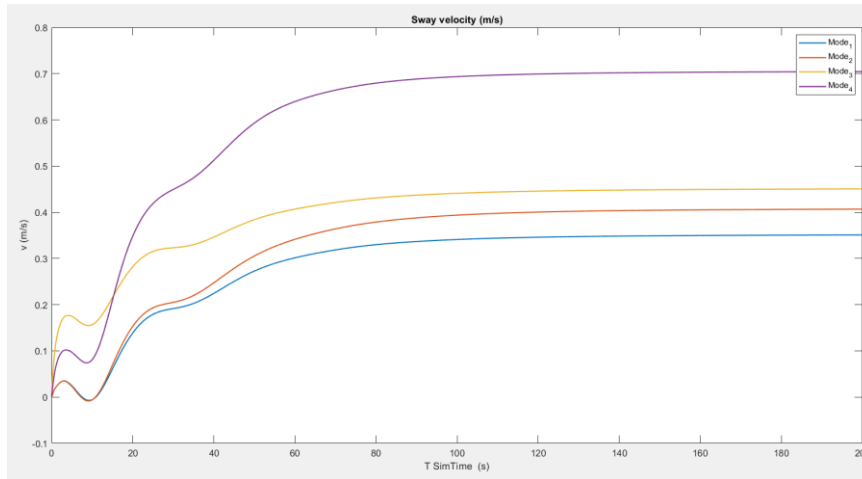
شکل ۹ - حرکت زاویه‌ای یاو

همانطور که مشاهده می‌شود حرکت رول در حالت ۴ بیشترین مقدار و در حالت ۳ کمترین مقدار خود را دارا می‌باشد به این دلیل که در حالت ۴ با توجه به افزایش دو برابری سرعت جریان آب بر روی سطوح کنترلی تاثیر گذاشته و زیرسطحی برای پایداری بیشترین رول را انجام می‌دهد. همچنین در حالت سه به دلیل اینکه جهت جریان ۱۵۰ درجه شده است به نسبت بقیه حالات کمترین رول صورت گرفته است. برای حرکت یاو حالت ۲ چون بیشترین زاویه هدینگ اولیه را دارا بوده ماکزیمم حرکت رول را برای خود به ثبت رسانده است.

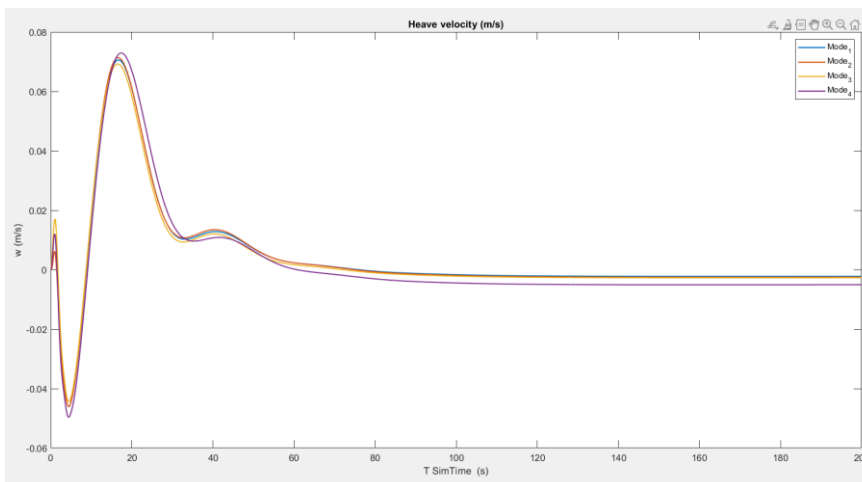
بدست آوردن سرعت ناشی از حرکات سرچ، سوای و هیو در یک تحلیل کنترلی به اوپراتور کمک کرده تا در هر لحظه از موقعیت و جهت آن مطلع بوده و برای جلوگیری از برخورد به موانع و تغییر مسیر حیاتی باشد که به ترتیب در نمودارهای این دسته از پارامترها قابل مشاهده است.



شکل ۱۰ - سرعت سرج



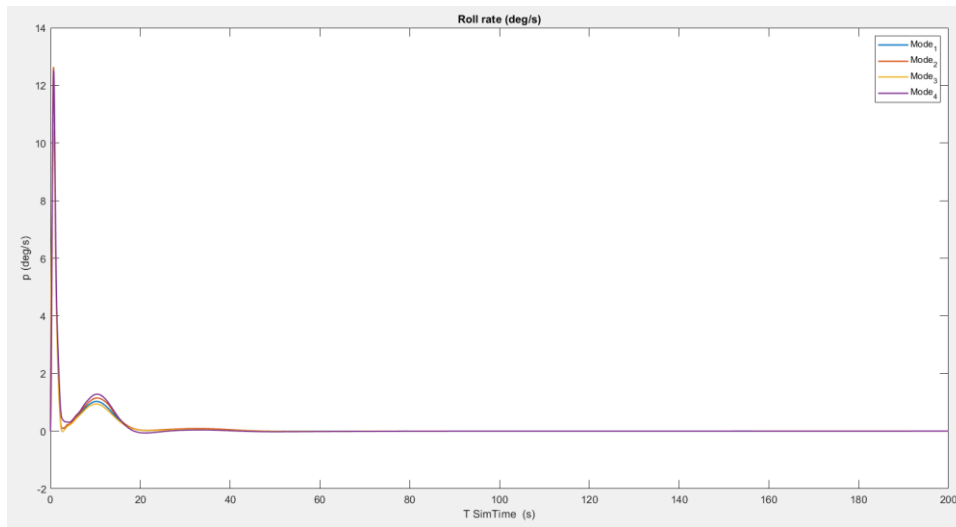
شکل ۱۱ - سرعت سواي



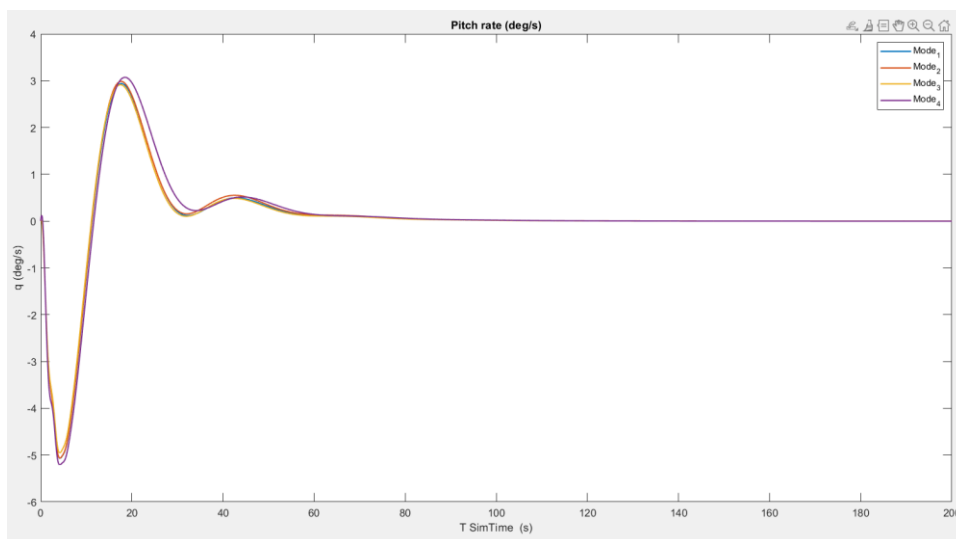
شکل ۱۲ - سرعت هيو

در نمودار سرعت سرچ براحتی می‌توان تشخیص داد حالت ۴ کمترین مقدار به دلیل اینکه سرعت جریان آب با دوبرابر مقدار خود نسبت به بقیه حالات به سمت زیرسطحی حرکت کرده را دارا می‌باشد. با این حال حالت ۳ بیشترین مقدار و بعد از آن حالت ۲ بیشتر از حالت مرجع ۱ را دارا هستند. زیرا در حالت ۳ جهت جریان آب با زاویه کمتری برخلاف زیرسطحی در حال حرکت است و در واقع از روبرو به سمت زیرسطحی در حال آمدن نیست و در حالت ۲ با دستور زاویه هدینگ بیشتر از روبرو شدن مستقیم با جهت جریان جلوگیری شده است. همانطور که انتظار می‌رفت حالت ۴ باید بیشترین حرکت سوای را دارا باشد زیرا جریان آب با سرعت دوبرابری نسبت به بقیه حالات به سمت زیرسطحی در حال حرکت است. در سرعت ناشی از حرکت هیو در ۴ حالت با اختلاف کم به یک صورت هستند.

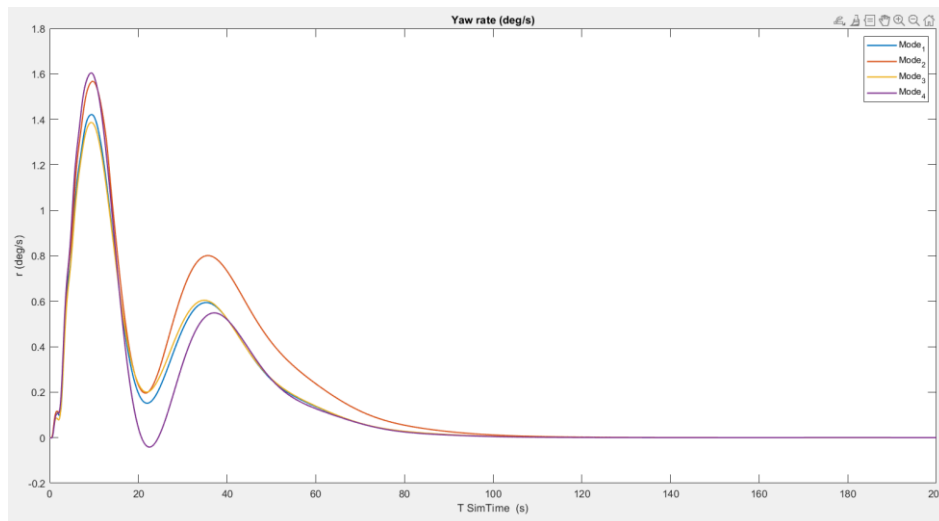
همانند حرکات سرچ، سوای و هیو حرکات زاویه‌ای رول، پیچ و یاء دارای سرعت می‌باشند که تغییرات زاویه‌ای زیرسطحی در هر لحظه را نشان می‌دهد نمودارهای این دسته از پارامترها که در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ و شکل ۱۵ به ترتیب آمده است.



شکل ۱۳- سرعت زاویه‌ای رول

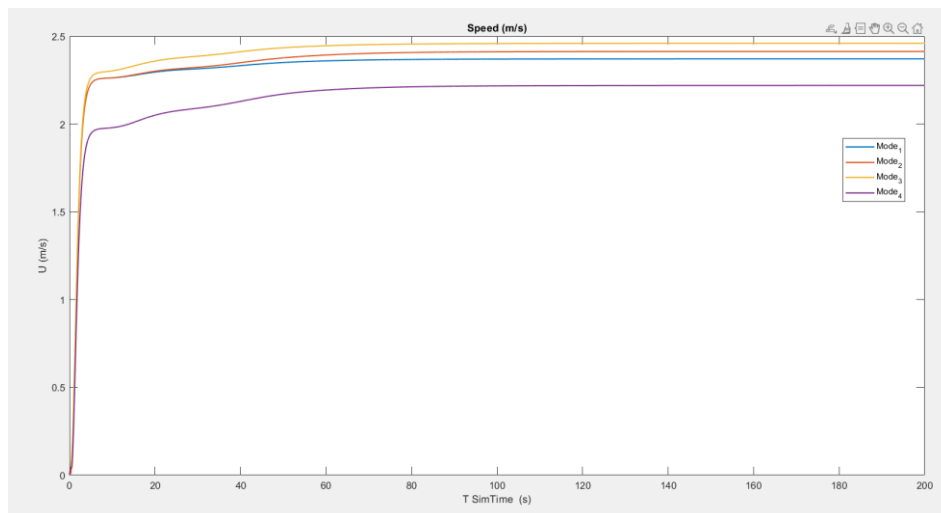


شکل ۱۴- سرعت زاویه‌ای پیچ



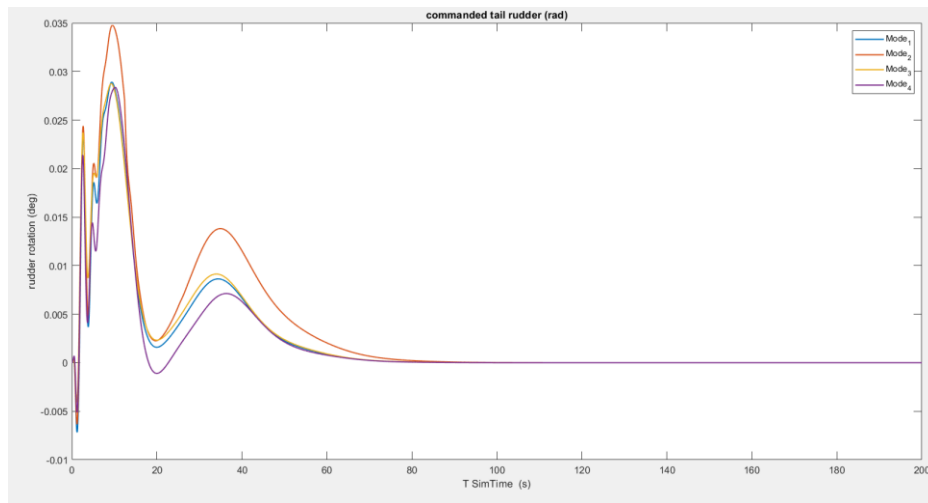
شکل ۱۵- سرعت زاویه‌ای یاو

بعد از تحلیل حرکات دینامیکی زیرسطحی به نتایج کنترلی رانش و حرکات سطوح کنترلی برای دانستن سرعت کل زیرسطحی در حالت‌های مختلف و میزان چرخش سکان و بالک‌ها برای تغییر جهت زیرسطحی در صفحات افقی و عمودی پرداخته شده است. همانطور که در تعریف نحوه کنترل این شبیه‌سازی گفته شد در نتایج حرکات سطوح کنترلی نتایج دستور^۱ و واقعی^۲ بررسی خواهد شد. به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ و شکل ۱۸ و شکل ۱۹ و شکل ۲۰ نمودارهای سرعت، مقادیر دستوری و واقعی چرخش سکان و مقادیر دستوری و واقعی چرخش بالک‌ها آمده است.

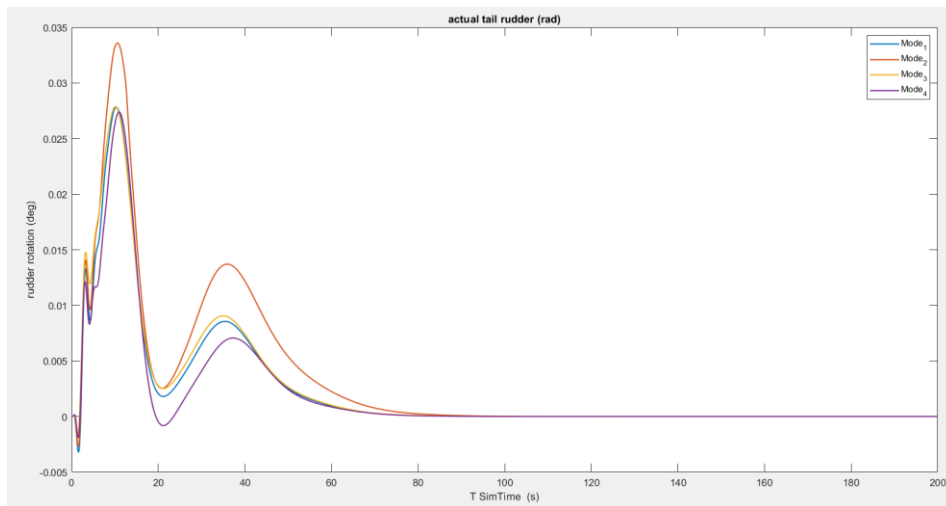


شکل ۱۶- سرعت کل

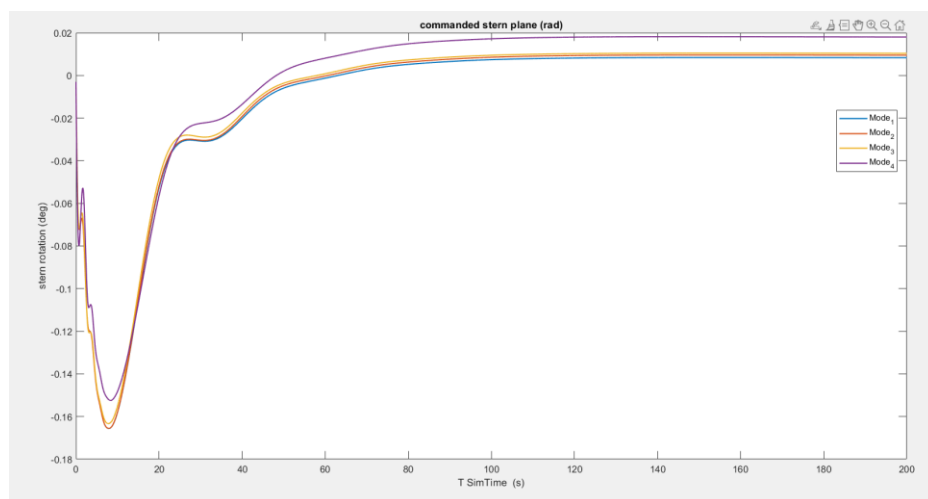
¹ commanded
² actual



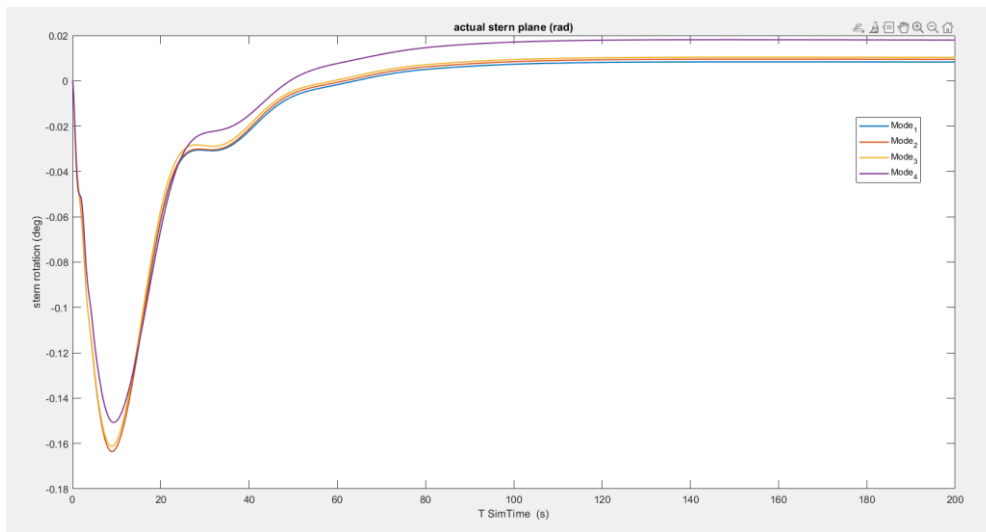
شکل ۱۷- مقدار دستوری چرخش سکان



شکل ۱۸- مقدار واقعی چرخش سکان



شکل ۱۹- مقدار دستوری چرخش بالک



شکل ۲۰- مقدار واقعی چرخش بالک

همانطور که پیداست سرعت کل زیرسطحی در حالت ۳ بدلیل اینکه زاویه برخورد جریان آب بصورت مایل است بیشترین مقدار را دارا می‌باشد اما در حالت ۴ بدلیل اینکه سرعت جریان دوبرابر حالت‌های دیگر می‌باشد کمترین سرعت کل را به خود اختصاص داده است. در نمودار مقادیر دستوری و واقعی چرخش سکان مشاهده می‌شود زیرسطحی در حالت ۲ بیشترین چرخش سکان را بدلیل زاویه هدینگ بیشتر در شرایط یکسان دارا می‌باشد اما در حالت ۴ بدلیل سرعت بیشتر جریان مخالف باعث شده کمترین مقدار چرخش سکان را ثبت کند. در نمودارهای مربوط به چرخش بالک مشاهده می‌شود بیشترین چرخش منفی بالک به حالت ۲ مربوط است زیرا زاویه هدینگ اولیه بیشتری نسبت به بقیه حالات دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از معادلات دینامیکی و کنترلی اقدام به شبیه‌سازی یک نمونه از زیرسطحی با حالات مختلف غوص کردن به عمق ۳۰ متری دریا شده است. در تمام دنیا قبل از ساخت یک نمونه آزمایشگاهی و تست آن ابتدا شبیه‌سازی آن در حالات مختلف را انجام داده زیرا انجام کارهای آزمایشگاهی تست در حالات مختلف مخارج بالایی به همراه دارد. این شبیه‌ساز توانایی آن را دارد تا بصورت مانیتورینگ نسبت به نمودارها و داده‌های ناشی از حرکت زیرسطحی اقدام کند. حتی می‌توان از داده‌ها در سیستم اتوپیلوت هدینگ و عمق استفاده کرد. هدف از شبیه‌سازی در حالات مختلف فرق بین تاثیر زاویه هدینگ متفاوت، سرعت و جهت جریان متفاوت بر پارامترهای کنترلی و دینامیکی زیرسطحی بوده است. در این شبیه‌سازی نتیجه‌های زیر گرفته شده است:

- سرعت جریان تاثیر بسزایی بروی پارامترهای کنترلی اعم از رول، پیچ و سرعت زیرسطحی دارد.
- جهت جریان در مسیر حرکت زیرسطحی بیشترین تاثیر را داشته است.
- وقتی سرعت جریان در شبیه‌سازی دوبرابر حالت مرجع ۱ شد مسیر سه بعدی نشان داد چقدر از حالت اولیه متفاوت بوده و در حالات پایدار متحرک تاثیرگذار بوده است.
- از نرم افزار شبیه‌سازی می‌توان بعنوان یک پایگاه داده برای انجام آزمایش‌های واقعی استفاده کرد و این خود مرقون به صرفه بودن انجام مراحل آزمایش و بهینه بودن نتایج را بهمراه دارد.



۵- منابع

- (1) Li, B., & Su, T. C. (2015, June). Dynamics of remus AUV in ocean current. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- (2) Li, D., & Du, L. (2021). Auv trajectory tracking models and control strategies: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 1020.
- (3) Wan, J., He, B., Wang, D., Yan, T., & Shen, Y. (2019). Fractional-order PID motion control for AUV using cloud-model-based quantum genetic algorithm. *IEEE Access*, 7, 124828-124843.
- (4) Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.

مدلسازی عددی تاثیر سد زیرزمینی در جلوگیری از هجوم آب شور در آبخوان‌های ساحلی

پوریا مقری^۱، مهدی رضاپور^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: rezapour@cmu.ac.ir

چکیده

حفاظت از آب‌های زیرزمینی یکی از اصلی‌ترین مسائل در مدیریت منابع آب می‌باشد. در نواحی ساحلی که از منظر سیاسی و اقتصادی حائز اهمیت هستند، با توجه به مصرف آب شیرین آبخوان‌ها، که اصلی‌ترین منبع موجود برداشت آب می‌باشد، در معرض آلودگی با آب دریا قرار دارند. در حالت طبیعی تراز آب شیرین نسبت به آب دریا بالاتر می‌باشد و آب شیرین به درون دریا تخلیه می‌گردد. با مصرف بیش از پیش آب شرب و استفاده آب در صنعت و کشاورزی گرادیان هیدرولیکی از حالت معمول تغییر کرده و آب دریا نیز به دلیل چگالی بیشتر از عمق به درون آبخوان نفوذ می‌کند و مسئله نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی معضل اصلی این نواحی می‌باشد. جهت جلوگیری از هجوم آب شور راهکارهای متفاوتی توسط محققین انجام گردیده. یکی از روش‌های کاربردی استفاده سد زیرزمینی در کف آبخوان می‌باشد که تاثیر به‌سزایی در جلوگیری هجوم آب دریا دارد. این پژوهش به بررسی شبیه‌سازی عددی استفاده از سد زیرزمینی با نرم‌افزار GMS پرداخته است. در سناریوهای انجام شده دیوار به فواصل ۲۰، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر از مرز دریا با ارتفاع به ترتیب ۶، ۱۰، ۱۴ و ۱۸ سانتی‌متر در مدلی به ابعاد ۱۴۰×۴۷/۵×۵ (عرض×ارتفاع×طول) سانتی‌متر پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد تاثیر دیوار به ترتیب ۵، ۶۰، ۴۳ و ۳۰٪ می‌باشد و هرچه فاصله دیوار از مرز دریا بیشتر شود مقدار نفوذ بیشتر شده اما ارتفاع دیوار می‌تواند کاهش یابد و همچنین هرچه فاصله دیوار از مرز آب شور کمتر گردد جهت نتایج موثرتر ارتفاع دیوار افزایش خواهد یافت.

کلید واژه: آبخوان‌های ساحلی، سد زیرزمینی، مدلسازی عددی، مدیریت آب، نرم افزار GMS، هجوم آب شور.

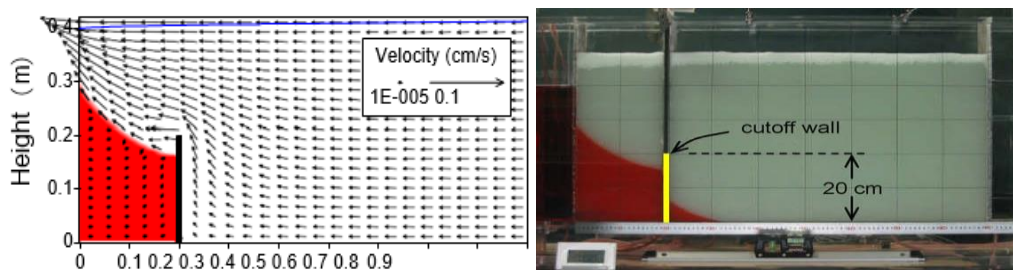
۱- مقدمه

مناطق ساحلی به منظر شرایط سیاسی، اقتصادی و اجتماعی از چشم‌انداز ویژه‌ای برخوردارند. آبخوان‌های ساحلی یکی از حائز اهمیت‌ترین منابع موجود تامین آب در این نواحی است (۱، ۲). با توجه به افزایش و تراکم جمعیت، پیشرفت صنعت و کشاورزی و نیز بالا رفتن سطح رفاه مردم، آبخوان‌های ساحلی با معضل برداشت بی‌رویه و هجوم آب دریا به درون سفره آب زیرزمینی رو به رو گردیده (۳، ۴، ۵). در حالت طبیعی جریان هدایت هیدرولیکی با توجه به بالاتر بودن سطح زمین و تراز آبخوان‌ها نسبت به آب دریا، آب شیرین آبخوان به درون دریا تخلیه می‌گردد. با تغییرات چشم‌گیری چون برداشت بیشتر از آبخوان‌ها و همچنین گرم شدن کره زمین و در نتیجه ذوب شدن کوه‌های یخ در قطب سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها بالا آمده و هدایت هیدرولیکی معکوس شده و نیز به علت چگالی بیشتر آب شور دریا از اعماق به درون آبخوان نفوذ می‌کند (۶). محققین بسیاری به بررسی رفتار و نفوذ آب شور در آبخوان به طریق مدلسازی‌های فیزیکی و آزمایشگاهی، مدلسازی و شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزارهای GMS، مدل عددی SUTRA و کد SEAWAT پرداخته‌اند (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱).

۱-۱- پیشینه تحقیق

جهت کنترل و جلوگیری از هجوم آب شور روش‌های مختلفی ارائه شده است که میتوان به استفاده از: (۱) اصلاح الگوی پمپاژ آب شیرین، (۲) تغذیه طبیعی، (۳) تعدیه مصنوعی (چاه تزریق آب شیرین)، (۴) چاه برداشت آب شور، (۵)

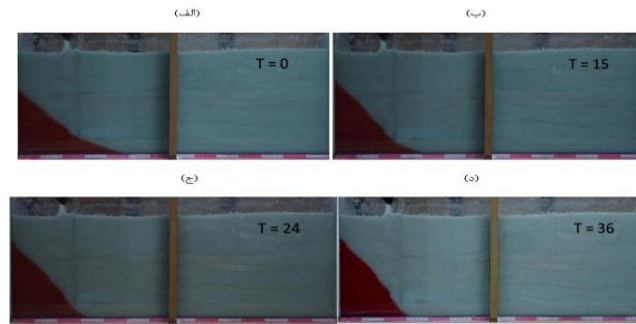
مانع فیزیکی (دیوار آب‌بند از سطح زمین به درون آبخوان) و (۶) مانع فیزیکی از کف (سد زیرزمینی) اشاره داشت (۱۲). آژانس منابع سبز ژاپن در سال ۲۰۰۴ در پروژه میدانی خود که جهت کنترل هجوم آب شور و نگهداری از آب زیرزمینی بود پانزده دیوار از کف را راه‌اندازی کرد که در بررسی عملکرد این موانع مشخص گردید هفت تا از پانزده سد زیرزمینی که برای جلوگیری از هجوم آب شور در نظر گرفته شده بودند، مؤثر واقع گردیدند (۱۳). لیون و همکاران در سال ۲۰۰۹ با مدلسازی آزمایشگاهی در یک فلوم ماسه‌ای به ابعاد $90 \times 40 \times 5$ (عرض \times ارتفاع \times طول) سانتی‌متر که درون آن از دانه‌های شیشه‌ای پر شده بود و مدلسازی عددی مشابه فلوم آزمایشگاهی با کد SEAWATE تحلیل شده بود پرداختند (۷). آنان در مدل خود سد زیرزمینی را در یک فاصله از مرز آب دریا به اندازه ۲۰ سانتی‌متری با ارتفاع‌های ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری را اجرا کردند. نتایج پژوهش آنان حاکی از آن بود دیوار از کف در صورتی مؤثر است که از ارتفاع گوه بیشتر باشد اما آب شور پشت دیواره می‌ماند و اگر ارتفاع دیوار ۲ برابر شود زمانی زیادی باید سپری شود تا آلاینده جا مانده پشت سد تخلیه گردد، شکل ۱ تصویری از مدل آزمایشگاهی و عددی آن‌ها را نشان می‌دهد (۷).



شکل ۱: الف) مدل آزمایشگاهی با وجود دیوار از کف با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و ب) شبیه‌سازی عددی، مدل آزمایشگاهی استفاده سد زیرزمینی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر لیون و همکاران سال ۲۰۰۹ (۷).

کلاریس و همکاران در سال ۲۰۱۲ با مدلسازی عددی برگرفته از کد SUTRA تاثیر دیوار آب‌بند را بر کاهش نفوذ آب شور با وجود چاه پمپاژ در آبخوان ساحلی مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش آن‌ها تأثیر دیوار آب‌بند بر نرخ استخراج ایمن چاه برداشت آب آبخوان در حالت موازی با ساحل بود. آنان به این نتیجه رسیدند که حضور دیوار آب‌بند باعث جلوگیری از هجوم آب شور می‌گردد و می‌تواند نرخ استخراج ایمنی را به چاه پمپاژ بدهد (۱۴).

مقری و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی آزمایشگاهی اثر منفرد و هم‌زمان دیوار آب‌بند و چاه برداشت آب شور در آبخوان‌های ساحلی پرداختند. نتایج پژوهش آنان حاکی از آن بود اگر تراز آب شیرین $47/5$ سانتی‌متر و تراز آب شور $45/7$ سانتی‌متر باشد آب شور تا فاصله ۵۳ سانتی‌متری از مرز دریا درون فلوم نفوذ می‌کند و با حضور دیوار آب‌بند در فاصله ۲۷ سانتی‌متری و در عمقی حدود 89% از ضخامت آبخوان طول گوه آب شور به فاصله ۴۵ سانتی‌متری از مرز دریا بازگشت دارد و حدود 15% در جلوگیری از نفوذ آب شور تاثیر می‌گذارد و نیز دریافتند استفاده هم‌زمان دیوار آب‌بند در همان فاصله و اجرا چاه برداشت آب شور در فاصله ۲۲ سانتی‌متری از مرز دریا و در عمق ۴۰ سانتی‌متری فلوم با دبی‌های $0/13$ و $0/2$ لیتر بر دقیقه گوه آب شور را به فاصله به ترتیب ۳۳ و ۳۱ سانتی‌متری از مرز دریا می‌رساند که حدود 38% و 41% در جهت جلوگیری از هجوم آب شور مؤثر می‌باشد (۱۵). شکل ۲ تصویری از مدل آزمایشگاهی استفاده از چاه برداشت و دیوار آب‌بند مقری و همکاران را در سال ۱۴۰۱ نشان می‌دهد.



شکل ۲: مدل آزمایشگاهی استفاده از دیوار آب بند و چاه برداشت آب شور به صورت هم‌زمان مقری و همکاران سال ۱۴۰۱ (۱۵).

۲- مواد و روش‌ها

برای انجام این آزمایش و جهت به دست آوردن نتایج از یک مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار GMS، استفاده گردید. در این تحقیق از کد SEAWAT بهره گرفته شد. دو معادله جریان سیال و انتقال و پخش آلاینده به طور هم‌زمان اما وابسته به هم حل شد و نتیجه شبیه‌سازی به صورت توزیع هد و غلظت با زمان تنها برای خاک‌های اشباع حاصل می‌شود. معادلات جریان آب زیرزمینی و پخش آلاینده در یک محیط متخلخل اشباع شامل دو رابطه زیر می‌باشد (۱۶).

$$\nabla \left[K\rho(\nabla h + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \nabla z) \right] = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (۱)$$

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (nD\nabla C) - \nabla \cdot (vC) = 0.0 \quad (۲)$$

که در آنها ρ چگالی سیال مخلوط (آب شور و شیرین)، C غلظت آن، ρ_f چگالی آب شیرین، k هدایت هیدرولیکی، h میزان هد هیدرولیکی، z تراز نقطه، S_s ذخیره ویژه، n میزان تخلخل، D ضریب پخش، v سرعت و t نهایتاً زمان است.

یک مدل مفهومی با ابعاد $5 \times 47/5 \times 140$ (عرض \times ارتفاع \times طول) سانتی‌متر در نرم افزار ساخته و سپس ابعاد مدل به سلول‌هایی به اندازه‌های ۱ سانتی‌متری در راستای $\Delta x = \Delta z = 1$ cm و عرض اندازه سلول‌ها ۵ سانتی‌متر $\Delta y = 5$ cm می‌شوند. گردید به طوری که تعداد گره‌ها در تمام فضای مدل به تعداد ۶۷۲۰ گره بودند. اطلاعات وارد شده به کد SEAWAT شامل جدول شماره ۱ می‌باشد.

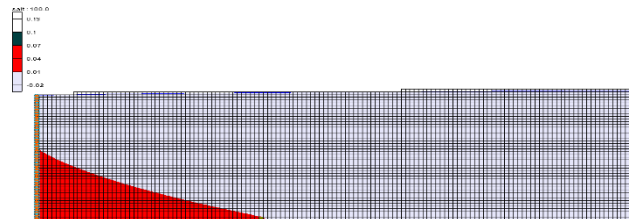
جدول ۱: اطلاعات وارد شده به کد SEAWAT.

پارامتر	مقدار
۳۷	غلظت آب شور (کیلومتر بر مترمکعب)
۱۰۲۴	چگالی آب شور (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۰۰۰	چگالی آب شیرین (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۳	تخلخل
۰/۸	هدایت هیدرولیکی
۰/۰۰۱	ضریب پراکندگی طولی (متر)
۰/۰۰۰۱	ضریب پراکندگی عرضی (متر)
۰	غلظت آب شیرین
۴۷/۵	هد آب شیرین (سانتی‌متر)
۴۵/۷	هد آب شور (سانتی‌متر)
۱۰۰	زمان انجام آزمایش تا رسیدن به شرایط پایدار (دقیقه)

در شبیه سازی عددی از سد زیرزمینی در فاصله های ۲۰، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی متری با ارتفاع های به ترتیب ۶، ۱۰، ۱۰ و ۶ سانتی متر استفاده گردید. هد آب شور و شیرین در سمت چپ و راست به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

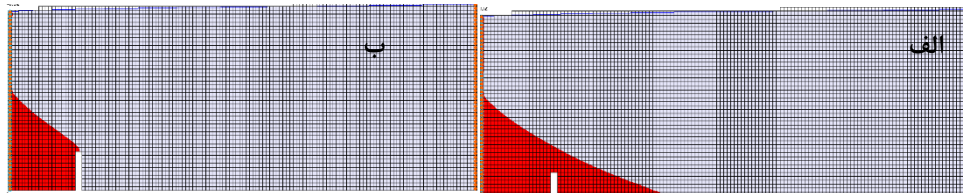
۳- تجزیه و تحلیل یافته ها

شکل ۳ تصویری از نفوذ آب شور در شرایط پایدار و دائمی در دقیقه ۱۰۰ را نشان می دهد که گوه آب شور از سمت چپ وارد مدل شده و در فاصله ۵۳ سانتی متری از مرز دریا متوقف می گردد.



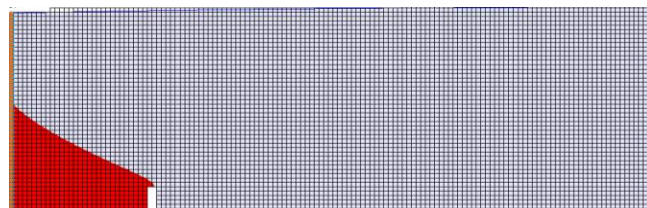
شکل ۳: پیشروی گوه آب شور تا فاصله ۵۳ سانتی متری از مرز آب شور در شرایط ماندگار در زمان ۱۰۰ دقیقه.

شکل ۴ تصویری از نفوذ گوه آب شور با حضور دیوار از کف به فاصله ۲۰ سانتی متری از مرز و ارتفاع دیوار به اندازه ۶ و ۱۰ سانتی متر را در حالت پایدار در زمان ۱۰۰ دقیقه نشان می دهد. الف) با استفاده از دیوار به ارتفاع ۶ سانتی متر طول گوه به ۵۰ سانتی متر رسیده و میزان تاثیر ۵٪ می باشد. ب) استفاده دیوار با ارتفاع ۱۰ سانتی متر طول گوه به ۲۰ سانتی متری رسیده و تاثیر آن ۶۰٪ می باشد.



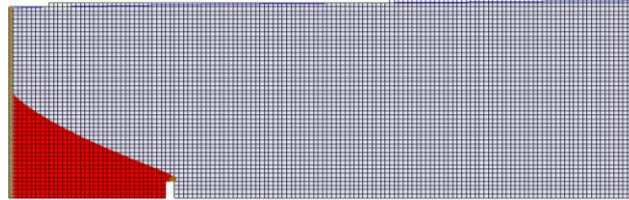
شکل ۴: الف) تصویری از روند بازگشت گوه آب شور در آبخوان با استفاده از سد زیرزمینی با ارتفاع ۶ سانتی متر در دقیقه ۱۰۰ و ب) تصویری از روند بازگشت گوه آب شور با ارتفاع دیوار به اندازه ۱۰ سانتی متر را نشان می دهد.

شکل ۵ تصویری از روند گوه آب شور با حضور سد زیرزمینی به فاصله ۳۰ سانتی متر از مرز دریا و ارتفاع ۶ سانتی متر را نشان می دهد که با این سناریو گوه آب شور در شرایط ماندگار در زمان ۱۰۰ دقیقه به فاصله ۳۰ سانتی متری از مرز دریا بازگشت داشته و تاثیر آن ۴۳٪ می باشد.



شکل ۵: میزان بازگشت گوه آب شور در فاصله ۳۰ سانتی متری در زمان ۱۰۰ دقیقه در شرایط ماندگار با ارتفاع ۶ سانتی متر را نشان می دهد.

شکل ۶ تصویری از روند گوه آب شور با حضور سد زیرزمینی به فاصله ۳۵ سانتی متر از مرز دریا و ارتفاع ۴ سانتی متر را نشان می‌دهد که با این سناریو گوه آب شور در شرایط ماندگار در زمان ۱۰۰ دقیقه به فاصله ۳۵ سانتی متری از مرز دریا بازگشت داشته و تاثیر آن ۳۰٪ می‌باشد.



شکل ۶: میزان بازگشت گوه آب شور در فاصله ۳۵ سانتی متری در زمان ۱۰۰ دقیقه در شرایط ماندگار با ارتفاع ۴ سانتی متر را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۲ نتایج بدست آمده از سناریوهای استفاده از دیوار از کف را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج سناریوهای استفاده از سد زیرزمینی.

فاصله دیوار تا مرز دریا	ارتفاع دیوار	مقدار نفوذ (سانتی متر)	مقادیر بازگشت گوه (سانتی متر)	تاثیر دیوار بر کاهش طول گوه به درصد (%)
پیشروی گوه آب شور		۵۳		
۲۰	۶	۵۰	۳	۵
۲۰	۱۰	۲۰	۳۳	۶۰
۳۰	۶	۳۰	۲۳	۴۳
۳۵	۴	۳۵	۱۸	۳۰

۴- نتیجه گیری:

نتایج بدست آمده در این پژوهش حاکی از آن می‌باشد اگر در فلومی به ابعاد ذکر شده سناریوهای سد زیرزمینی در فاصله ۲۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ سانتی متری و با ارتفاع‌های به ترتیب ۶، ۱۰، ۶، ۴ سانتی متر اجرا گردد تاثیر آن به ترتیب نزدیک به ۵، ۶۰، ۴۳ و ۳۰٪ خواهد بود. همچنین نتایج نشان داد ارتفاع دیوار احداثی در فاصله نزدیک به مرز دریا حائز اهمیت می‌باشد و اگر ارتفاع دیوار کم باشد یا به عنوانی کمتر از نصف ارتفاع گوه آب شور باشد تاثیری نداشته و جهت تاثیر موثر نیاز است ارتفاع دیوار در نزدیکی مرز افزایش یابد اما از نظر اجرا سخت تر و هزینه بیشتری را متحمل می‌کند. همچنین اجرا سد زیرزمینی در فاصله دور از مرز دریا تاثیر کمتر در روند نفوذ دارد اما ارتفاع دیوار مانند حالت نزدیک به مرز دریا نیاز نیست زیاد باشد و نحوه اجرا ساده تر و هزینه‌های اجرایی کمتر خواهد بود.

۵- منابع:

- ۱۲- محمودیان شوشتری، محمد، ۱۳۷۴. هیدرولیک آب‌های زیرزمینی. دانشگاه شهید چمران اهواز، ۶۰۰.
- ۱۵- مقری پوریا، رضاپور مهدی، رضاپور عباسعلی. بررسی آزمایشگاهی تاثیر هم‌زمان چاه برداشت و دیوار آب‌بند بر کاهش هجوم آب شور در آبخوان ساحلی. مهندسی دریا. ۱۴۰۱؛ ۱۸ (۳۷): ۷۹-۸۸.



- 1- Jakovovic, D., Werner, A.D. and Simmons, C.T., 2011. Numerical modelling of saltwater up-coning: comparison with experimental laboratory observations. *Journal of hydrology*, 402(3-4), pp.261-273.
- 2- MEHDIZADEH, M.S.S. and VAFAEI, F., 2016. Experimental and Numerical Investigation on Saltwater Intrusion into Unconfined Coastal Aquifers.
- 3- Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H. and Ataie-Ashtiani, B., 2016. Effects of sea level rise and recharge rate variations on seawater intrusion in confined aquifer. *Journal of Hydraulics*, 10(4), pp.1-
- 4- Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T., 2014. Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran. *Journal of Hydrology*, 519, pp.399-413.
- 5- Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H. and Ataie-Ashtiani, B., 2016. Effects of sea level rise and recharge rate variations on seawater intrusion in confined aquifer. *Journal of Hydraulics*, 10(4), pp.1-
- 6- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2004. *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- 7- Luyun Jr, R., Momii, K. and Nakagawa, K., 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*, 377(3-4), pp.227-236.
- 8- Anwar, H.O., 1983. The effect of a subsurface barrier on the conservation of freshwater in coastal aquifers. *Water Research*, 17(10), pp.1257-1265.
- 9- Luyun Jr, R., Momii, K. and Nakagawa, K., 2011. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Groundwater*, 49(2), pp.239-249.
- 10- Abdoulhalik, A., Ahmed, A. and Hamill, G.A., 2017. A new physical barrier system for seawater intrusion control. *Journal of Hydrology*, 549, pp.416-427.
- 11- Abdoulhalik, A. and Ahmed, A.A., 2017. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study. *Journal of Environmental Management*, 199, pp.62-73.
- 13- Agency, J.G.R., *Technical Reference for Effective Groundwater Development*. 2004.
- 14- Kaleris, V.K. and A.I. Ziogas, The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 2013. 476: p. 370-383.
- 16- Langevin, C. D., Thorne Jr, D. T., Dausman, A. M., Sukop, M. C., & Guo, W. (2008). SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport (No. 6-A22). Geological Survey (US).

مدل های هدایت خودکار برای کنترل هدینگ کشتی ها

میلااد باغبان^۱، حامد الماسیان^۲

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد هیدرومکانیک، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، بوشهر، ایران.

۲. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد برق، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: Mld.bga@gmail.com

چکیده

کشتی ها به عنوان یکی از مهم ترین ابزارهای حمل و نقل جهانی، نقش حیاتی در تأمین تجارت و ترابری بین المللی ایفا می کنند. افزایش تعداد کشتی ها و حجم حمل و نقل بارها باعث افزایش مصرف سوخت در این صنعت شده است که منجر به افزایش آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی و ... گردیده است. بنابراین، بهینه سازی کنترل هدینگ کشتی به منظور کاهش مصرف سوخت و حفظ محیط زیست امری ضروری به نظر می رسد. علاوه بر این، کنترل هدینگ کشتی یکی از جنبه های حیاتی ناوبری است که به بهبود ایمنی، کارایی و دقت در ناوبری کشتی ها کمک می کند. به همین منظور در این مقاله به معرفی سیستم هدایت خودکار مبتنی بر مدل دینامیکی برای کشتی پرداخته شده است. معروفترین مدل دینامیکی استفاده شده به این منظور مدل دینامیکی Nomoto و انواع آن می باشد. در این مقاله جهت شناخت هر چه بیشتر این مدل دینامیکی و انتخاب مناسب ترین مدل هدایت خودکار، به شرح این مدل دینامیکی در زمینه کنترل هدینگ پرداخته شده است.

کلید واژه: مدل دینامیکی Nomoto، کنترل هدینگ، هدایت خودکار کشتی

۱- مقدمه

سیستم های مدرن کنترل حرکت کشتی نتیجه چندین تحول تاریخی است. از جمله این پیشرفت ها می توان به اختراع قطب نما، سیستم های موقعیت یابی محلی و جهانی، تئوری کنترل و تخمین و سیستم های کنترل مبتنی بر کامپیوتر اشاره کرد. طی سال های گذشته، تقاضا برای دقت و قابلیت اطمینان بیشتر سیستم های کنترل حرکت کشتی تا حدی افزایش یافته است که حتی درک عملیات هایی که در آن ها سیستم های کنترل حرکت عامل ضروری نیستند، دشوار است. کشتی های مدرن، مجهز به سیستم های کنترل حرکت پیچیده ای هستند که بسته به عملیات خاص اهداف متفاوتی دارند. برخی از این اهداف کنترل عبارتند از: تنظیم موقعیت و هدینگ^۱، دنبال کردن مسیر، ردیابی مسیر و کاهش حرکت ناشی از امواج [1].

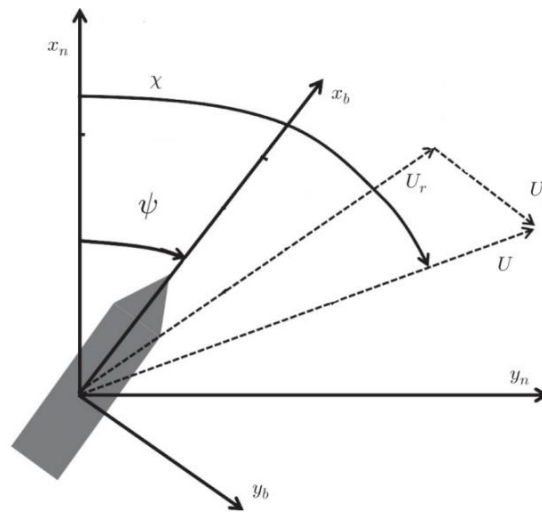
مدیریت مانور نیز یکی از مهمترین جنبه های کنترل هدایت کشتی ها است. استفاده از تکنولوژی های پیشرفته در تنظیم سرعت، تعادل و چرخش کشتی، به ناوبران این امکان را می دهد که به صورت دقیق و بهینه مسیر را تنظیم کنند و با مدیریت مناسب مانور، خطر حوادث را به حداقل برسانند.

یکی از مهم ترین راهکارهای مورد استفاده در کنترل هدایت کشتی ها، سیستم های هدایت خودکار کشتی است. این سیستم ها با استفاده از تکنولوژی های هوش مصنوعی و سنسورهای پیشرفته، به طور خودکار جهت گیری کشتی را انجام می دهند و از خطرات ناشی از خطاهای انسانی جلوگیری می کنند. همچنین، با کاهش مصرف سوخت و بهینه سازی مسیر، این سیستم ها به صرفه جویی در هزینه های حمل و نقل کمک می کنند.

¹ Position and Heading Regulation

سیستم ناوبری، داده‌ها را از چندین حسگر مانند GPS¹، ثبت سرعت، قطب نما، ژيروسکوپ، رادار و شتابسنج جمع‌آوری می‌کند تا از اطلاعات دقیق موقعیت و هدینگ اطمینان حاصل کند این کار نه تنها کیفیت سیگنال‌ها را بررسی می‌کند بلکه این اندازه‌گیری‌ها را به یک چارچوب مرجع واحد تبدیل می‌کند که توسط سیستم‌های کنترل و هدایت استفاده می‌شوند [2]، [3] و [4].

از آنجا که سوءتفاهم‌های مفهومی زیادی در مورد کورس² و هدینگ یک کشتی وجود دارد مهم است که بر مفاهیم کنترل کورس و هدینگ تاکید کنیم. زاویه‌ی کورس χ یک کشتی، جهت اصلی حرکت کشتی است. از این رو زاویه‌ی کورس باید از زاویه‌ی هدینگ ψ که جهت قطب‌نمایی است که در سینه یا دماغه‌ی شناور قرار می‌گیرد، متمایز شود. در شکل ۱ به خوبی نشان داده شده است که زاویه هدینگ، زاویه بین محور x_n (مربوط به دستگاه مختصات ثابت روی زمین و نشان‌دهنده جهت شمال جغرافیایی) و محور x_b (مربوط به دستگاه مختصات متصل به کشتی) می‌باشد در حالی که زاویه کورس، زاویه بین محور x_n و بردار سرعت کشتی (U) است.



شکل ۱- زاویه هدینگ و کورس کشتی با سرعت U [5].

کشتی‌ها معمولاً مجهز به قطب‌نمای ژيروسکوپی هستند که یک قطب‌نمای غیرمغناطیسی مبتنی بر یک دیسک با چرخش سریع است. ژيروسکوپی که به دنبال شمال است اندازه‌گیری بسیار دقیقی از زاویه‌ی یار ارائه می‌دهد. قطب‌نماهای مغناطیسی روی کشتی‌های تجاری به عنوان ابزار ناوبری استفاده نمی‌شوند، زیرا به اختلالات مغناطیسی بسیار حساس هستند. یک اندازه‌گیری جایگزین می‌تواند استفاده از دو آنتن GNSS³ در یک گیرنده با یک بردار آفست شناخته شده برای محاسبه زاویه‌ی هدینگ باشد. با این حال، این راه حل به اختلالات یونوسفر⁴، چند مسیری، از دست دادن سیگنال‌ها، تعداد ماهواره‌های موجود و غیره حساس است [5].

اگر زاویه‌ی هدینگ ψ به عنوان یک اندازه‌گیری مستقیم در دسترس باشد، طراحی یک کنترل‌کننده PID⁵ برای کنترل هدینگ ساده است. در صورتی که دینامیک یار مشخص باشد، بهره کنترل‌کننده PID را می‌توان به عنوان تابعی

¹ Global Positioning System

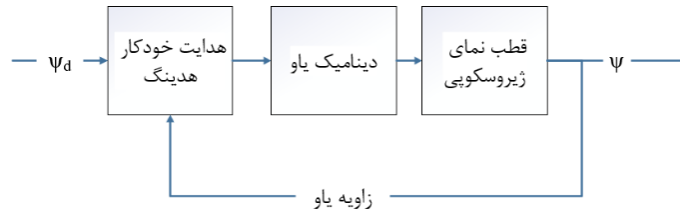
² Course

³ Global navigation satellite system

⁴ Ionosphere

⁵ Proportional-Integral-Derivative Controller

از پارامترهای مدل محاسبه کرد. برای این کار در بخش‌های بعد مدل‌هایی ارائه شده‌اند و طراحی هدایت خودکار هدینگ نیز مورد بحث قرار گرفته است. شکل ۲ یک سیستم هدایت خودکار معمولی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سیستم هدایت خودکار هدینگ که در آن زاویه یاو با قطب‌نمای ژيروسکوپی اندازه‌گیری شده است.

Velasco و همکاران [6] با هدف به دست آوردن یک مدل هدینگ به منظور کنترل کشتی سریع مسافری TF-120 در مقیاس مدل فیزیکی شامل دینامیک و سینماتیک، از یک پلتفرم آزمایش از راه دور برای وسایل نقلیه دریایی استفاده کردند. در شکل ۳ تصویری از مدل واقعی کشتی مورد نظر و مدل مقیاس کوچک آن نشان داده شده است. در مطالعه ذکر شده مدل فیزیکی به صورت خودگردان^۱ طراحی شده و از راه دور به وسیله‌ی رایانه شخصی با استفاده از ارتباطات WiFi کنترل شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۳- الف) مدل مقیاس کوچک کشتی TF-120، ب) مدل واقعی کشتی TF-120 turbo-ferry [6]

شناسایی و اعتبارسنجی دینامیک مدل کشتی مورد نظر از طریق مانور چرخش دایره‌ای به دست آمده است. برای هدایت خودکار هدینگ از مدل پارامتری شناسایی شده برای طراحی ساختارهای کنترل کلاسیک مختلف استفاده شده و شبیه‌سازی این سیستم در سیمولینک^۲ انجام شده است. همچنین مدل هدینگ دینامیکی شناسایی شده، با استفاده از معادلات سینماتیکی مقیاس مدل فیزیکی TF-120 بر اساس جنبه‌های هندسی تکمیل شده‌اند. سپس مانور چرخش دایره‌ای برای بررسی مناسب بودن مدل هدینگ دینامیکی و همچنین مقایسه رفتار این مدل هدینگ با وجود اغتشاشات افزایشی و بدون اغتشاشات افزایشی شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه تقریب خطی ساخته شده

¹ Autonomous

² Simulink

در معادلات سینماتیکی، رفتار کشتی را به درستی در مانور چرخش دایره‌ای نشان نمی‌دهد، معادلات سینماتیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. Velasco و همکاران [6] برای زمانی که اثرات اغتشاش به مدل هدینگ دینامیکی اضافه می‌شود و زمانی که اغتشاش در نظر گرفته نمی‌شود، عملکرد کنترل‌کننده انتخابی را در یک حلقه کنترل هدینگ نیز مورد بررسی قرار دادند که با وجود اختلالات و اثرات جزئی در مسیر توصیف شده توسط کشتی، نتایج نشان‌دهنده‌ی رفتار خوب حلقه کنترل هدینگ است.

در همین زمینه اقبالی بابادی و همکاران [7] به بررسی مدل دینامیکی شناسایی شده توسط چرخش مانور دایره‌ای از مدل کشتی TF-120 که در مرجع [6] ذکر شده پرداخته و اقدام به طراحی کنترل‌کننده برای هدایت هدینگ حرکت مدل نموده‌اند. به منظور طراحی کنترل‌کننده در ابتدای کار سیستم دینامیکی شناسایی شده را مورد بررسی قرار داده و پاسخ‌های حلقه باز و حلقه بسته سیستم دینامیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه برای بهبود پاسخ سیستم حلقه بسته به طراحی کنترل‌کننده‌ی PID پرداخته و در نهایت با تغییر در ساختار کنترل‌کننده‌ی PID و افزودن فیلتر مرتبه اول قبل از عبارت مشتق‌گیر (کنترل‌کننده‌ی F-PID) باعث بهبود پاسخ سیستم در حضور کنترل‌کننده‌ی PID شده‌اند. از آنجا که پاسخ حلقه بسته‌ی سیستم به ورودی پله واحد ناپایدار بود. اقبالی بابادی و همکاران [7] جهت بهبود عملکرد سیستم و بالا بردن دقت پاسخ، دو کنترل‌کننده‌ی PID و F-PID را طراحی نموده و نتایج حاصل بیانگر این موضوع می‌باشد که سیستم اصلی در حضور دو کنترل‌کننده دارای عملکرد بهتری می‌باشد و پاسخ سیستم در حضور کنترل‌کننده F-PID در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی PID از عملکرد بهتری برخوردار است.

یک مدل عددی هیدرودینامیکی مربوط به کشتی CyberShip II به همراه اثرات موج برای شبیه‌سازی سیستم هدایت خودکار کشتی با استفاده از تحلیل حوزه زمان توسط tomara [8] مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه نتایج، تحقیقات مشابهی با کنترل‌کننده PD تطبیق‌یافته با سیستم هدایت خودکار صورت پذیرفت. تفاوت‌ها در نتایج شبیه‌سازی بین دو کنترل‌کننده با یک تابع هزینه متشکل از خطای زاویه هدینگ و زاویه سکان تحلیل شدند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که کنترل‌کننده مد لغزشی^۱ بهتر از کنترل‌کننده PD، هدینگ را در حضور امواج دنبال می‌کند. مزیت استفاده از سوئیچینگ^۲ در الگوریتم لغزشی در این واقعیت است که با جبران اختلالات ایجاد شده توسط یک محیط خارجی مانند اختلالات موجی، به حفظ دقیق مسیر فعلی کمک می‌کند [8].

سیستم‌های هدایت خودکار مبتنی بر مدل برای کشتی‌ها معمولاً بر اساس مدل Nomoto و همکاران [9] است. برای حالتی که نیروی سوی^۳ τ_Y و گشتاور یاو^۴ τ_N توسط یک سکان با زاویه δ ایجاد می‌شوند، نیرو و گشتاور مورد نظر به صورت زیر محاسبه می‌شوند که Y_δ و N_δ ضرایب سکان می‌باشند.

$$\tau_Y = -Y_\delta \delta \quad (1)$$

$$\tau_N = -N_\delta \delta \quad (2)$$

در ضمن ویرایش τ_Y و τ_N به گونه‌ای که دیگر ورودی‌های کنترلی را شامل شوند کار ساده‌ای می‌باشد [5].

۲- مدل مرتبه دوم Nomoto

یک مدل هدایت خودکار خطی برای کنترل هدینگ را می‌توان از مدل مانور خطی زیر استخراج کرد

$$M\dot{v}_r + Nv_r = b\delta \quad (3)$$

¹ Sliding Mode Controller

² Switching

³ Sway

⁴ Yaw

که $v_r = [v_r, r]^T$ و

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$N =$

$$\begin{bmatrix} -Y_v & (m - X_{\dot{u}})U - Y_r \\ (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})U - N_v & (mx_g - Y_{\dot{r}})U - N_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{bmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

با انتخاب نرخ یو (r) به عنوان خروجی به صورت زیر:

$$r = c^T v_r, \quad c^T = [0, 1] \quad (7)$$

و استفاده از تبدیلات لاپلاس نتیجه می شود که:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(T_3 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (8)$$

به طور مشابه برای درجه آزادی سوی نیز عبارت زیر بدست آمده است

$$\frac{v_r}{\delta}(s) = \frac{K_v(T_v s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (9)$$

که K_v و T_v در معادله (8) با K و T_3 در معادله (9) تفاوت دارند. معادله (8) به عنوان مدل Nomoto درجه دوم شناخته می شود. نمایش فرم زمان-دامنه ای معادله (8) به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} T_1 T_2 \psi^{(3)} + (T_1 + T_2) \ddot{\psi} + \dot{\psi} \\ = K(T_3 \dot{\delta} + \delta) \end{aligned} \quad (10)$$

این مدل را می توان با استفاده از سرعت U و طول L به صورت زیر نرمال سازی نمود

$$\begin{aligned} \left(\frac{L}{U}\right)^2 T_1' T_2' \psi^{(3)} + \left(\frac{L}{U}\right) (T_1' + T_2') \ddot{\psi} + \dot{\psi} \\ = K' T_3' \dot{\delta} + \left(\frac{U}{L}\right) K' \delta \end{aligned} \quad (11)$$

مدل نرمال شده را می توان با انتخاب U به عنوان متغیر زمان بندی به عنوان مبنایی برای کنترل زمان بندی بهره استفاده کرد. در نتیجه، بهره های کنترل کننده PID تابعی از پارامترهای مدل و اندازه گیری مستقیم U خواهند بود. به طور کلی انطباق پارامتر بر اساس روش های کلاسیک نسبت به زمان بندی بهره کندتر خواهد بود.

۳- مدل مرتبه اول Nomoto مدل مرتبه اول Nomoto با تعریف ثابت زمانی معادل به دست می آید

$$T := T_1 + T_2 - T_3. \quad (12)$$

در نتیجه معادله (8) را می توان به صورت زیر تقریب زد

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{Ts + 1}. \quad (13)$$

با استفاده از $\dot{\psi} = r$ ، عبارت زیر نتیجه می شود

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{s(Ts+1)} \quad (14)$$

که تابع انتقالی است که در اکثر سیستم‌های هدایت خودکار تجاری مورد استفاده قرار گرفته است. نمایش زمان-دامنه‌ای به صورت زیر می‌باشد.

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (15)$$

مدل درجه اول نوموتو را می‌توان با استفاده از سرعت U و طول L به صورت زیر نرمال نمود

$$\left(\frac{L}{U}\right) T' \ddot{\psi} + \dot{\psi} = \left(\frac{U}{L}\right) K' \delta \quad (16)$$

از مدل نرمال شده برای طراحی یک هدایت خودکار با بهره‌گیری از زمان‌بندی شده استفاده می‌شود که در آن U به عنوان یک اندازه‌گیری متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود.

۴- بسط غیرخطی مدل Nomoto

برای توصیف ویژگی‌های مانور، مدل خطی Nomoto را می‌توان با افزودن یک غیر خطی استاتیکی به گونه‌ای تعمیم داد که شامل اثرات غیر خطی شود.

۴-۱- بسط غیرخطی مدل مرتبه اول Nomoto

در Norbin [10] مدل مرتبه اول زیر پیشنهاد شد:

$$T\dot{r} + H_N(r) = K\delta \quad (17)$$

$$H_N(r) = n_3 r^3 + n_2 r^2 + n_1 r + n_0 \quad (18)$$

که $H_N(r)$ یک تابع غیرخطی است. مدل خطی (۱۵) یک حالت خاص از مدل غیرخطی متناظر با r است.

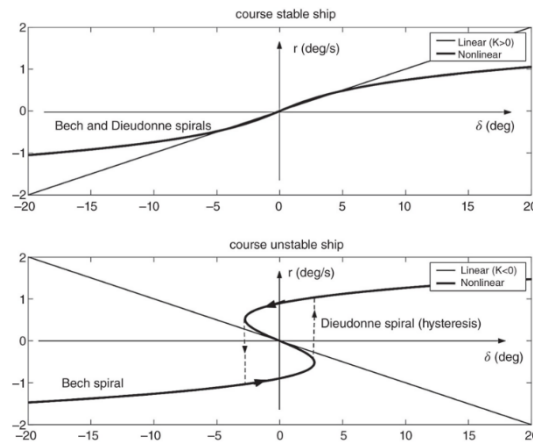
۴-۲- بسط غیرخطی مدل مرتبه دوم Nomoto

Bech و Wagner Smith [11] یک مدل مرتبه دوم را پیشنهاد کردند:

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + K H_B(r) = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (19)$$

$$H_B(r) = b_3 r^3 + b_2 r^2 + b_1 r + b_0 \quad (20)$$

که $H_B(r)$ را می‌توان از مانور مارپیچ معکوس Bech بدست آورد. تساوی خطی (۱۰) با استفاده از $r = H_B(r)$ بدست آمده است.



شکل ۴- نمودار r - δ بیانگر مارپیچ‌های Dieudonne و Bech برای هر دو حالت کشتی پایدار و ناپایدار در مسیر.

برای کشتی‌های پایدار، هم می‌توان از آزمایش مارپیچ مستقیم Dieudonne [12] و هم از تست مارپیچ معکوس Bech استفاده کرد، در حالی که مارپیچ Bech تنها آزمونی است که از اثر هیستریسیس^۱ برای کشتی‌های ناپایدار در مسیر اجتناب می‌کند. برای کشتی‌های ناپایدار در محدوده مشخص شده توسط مانور خروج باید مارپیچ معکوس Bech اعمال شود. آزمایش مارپیچ معکوس ابتدا توسط Mogens Bech در سال ۱۹۶۶ و بعداً در سال ۱۹۶۸ منتشر شد. این روش به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان بسیار محبوب بوده است. آزمایش مارپیچ معکوس نیز نسبت به تست مارپیچ Dieudonne به زمان کمتری نیاز دارد.

مشخصات مانور خطی و غیرخطی در شکل ۴ نشان داده شده است. آنها با حل r به عنوان تابعی از δ با استفاده از حل‌های حالت پایا (۱۷) و (۱۹) متناظر با عبارات زیر بدست آمده‌اند:

$$H_N(r) = K\delta \quad (21)$$

$$H_B(r) = \delta \quad (22)$$

ویژگی‌های مانور غیرخطی را می‌توان از آزمون‌های مانور در مقیاس واقعی بدست آورد.

برای یک کشتی ناپایدار در مسیر $b_1 < 0$ ، در حالی که یک کشتی پایدار در مسیر $b_1 > 0$ را ارضا می‌کند. تک پروانه یا نامتقارن بودن بدنه کشتی دلیل غیرصفر بودن مقدار b_0 خواهد بود. به طور مشابه متقارن بودن بدنه کشتی موجب صفر شدن b_2 می‌شود. از آنجایی که یک زاویه سکان ثابت برای جبران نیروهای باد و جریان ثابت در حالت پایا مورد نیاز است، عبارت بایاس^۲ b_0 به راحتی می‌تواند به عنوان یک مجموعه سکان اضافی در نظر گرفته شود. این به نوبه خود نشان می‌دهد که تعداد زیادی از کشتی‌ها را می‌توان با چند جمله‌ای زیر توصیف کرد:

$$H_B(r) = b_3 r^3 + b_1 r \quad (23)$$

ضرایب b_i برای $i = 0, \dots, 3$ به صورت زیر با مدل Norbin در ارتباط هستند:

$$n_i = \frac{b_i}{|b_1|} \quad (24)$$

¹ Hysteresis

² Bias

که نتیجه می‌شود:

$$H_N(r) = n_3 r^3 + n_1 r \quad (25)$$

این نشان می‌دهد که برای یک کشتی پایدار در مسیر، $n_1 = 1$ است و برای یک کشتی ناپایدار در مسیر، $n_1 = -1$ می‌باشد. در ادامه جهت تکمیل توضیحات ذکر شده در رابطه با مدل‌های کنترل هدینگ به معرفی نقطه‌ی محوری پرداخته شده است.

۵- نقطه‌ی محوری^۱

نقطه محوری ابزار مفیدی در جابجایی کشتی است و موقعیت نقطه محوری در شرایط مانور برای کاپیتان کشتی از اهمیت زیادی برخوردار است. نقطه محوری نقطه‌ای است که وقتی کشتی می‌چرخد در این نقطه سرعت عرضی وجود ندارد. موقعیت نقطه محوری به مجموعه نیروهایی که در لحظه به کشتی وارد می‌شود بستگی دارد و در نتیجه موقعیت آن در طول زمان تغییر خواهد کرد. نقطه محوری در درجه آزادی یاو به صورت زیر تعریف شده است.

نقطه‌ی محوری یک کشتی x_p ، نقطه‌ای رو سنترلاین^۲ است که نسبت به مرکز ثقل اندازه‌گیری شده است و در آن سوی و یاو کاملاً همدیگر را خنثی می‌کنند [13].

$$v_{np} = v_{ng} + x_p r \equiv 0 \quad (26)$$

که v_{ng} سرعت سوی مرکز ثقل نسبت به دستگاه مختصات $\{n\}$ است. نقطه محوری، دایره چرخش کشتی را نشان می‌دهد و به نظر می‌رسد همه نقاط دیگر در اطراف این نقطه می‌چرخند.

نقطه‌ی محوری برای یک کشتی در حال چرخش در زمان t ، با اندازه‌گیری سرعت $v_{ng}(t)$ در مرکز ثقل و نرخ چرخش $r(t)$ قابل محاسبه است. از (26) نتیجه می‌شود که:

$$x_p(t) = -\frac{v_{ng}(t)}{r(t)}, \quad r(t) \neq 0 \quad (27)$$

این عبارت برای نرخ یاو صفر متناظر با یک حرکت روی خط مستقیم تعریف نشده است. این بدان معنی است که نقطه محوری هنگام حرکت روی یک خط مستقیم یا در یک حرکت سوی خالص در بی نهایت قرار دارد.

ملوانان به خوبی می‌دانند که نقطه‌ی محوری یک کشتی در حال چرخش در حدود $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{4}$ طول کشتی عقب‌تر از سینه‌ی کشتی قرار دارد [13].

موقعیت نقطه محوری یک کشتی کنترل‌شده با سکان به نسبت ضرایب بهره نرخ سوی و یاو سکان مربوط می‌شود. این را می‌توان با مطالعه راه حل حالت پایا مدل مانور خطی توضیح داد. با ترکیب (۸) و (۹) و با فرض عدم وجود جریان ($v_c = 0$) نتیجه می‌شود:

$$\frac{v}{r} = \frac{K_v(T_v s + 1)}{K(T_3 s + 1)} = \frac{K_v}{K} \quad (28)$$

در نتیجه، موقعیت حالت پایای نقطه محوری با نسبت زیر داده می‌شود:

$$x_{p,ss} = -\frac{K_v}{K} \quad (29)$$

¹ Pivot point

² Centerline

این عبارت همچنین می‌تواند به صورت زیر به مشتقات هیدرودینامیکی مربوط شود:

$$x_{p,ss} = \frac{N_r Y_\delta - (Y_r - mU) N_\delta}{Y_v N_v - N_v Y_\delta} \quad (30)$$

توجه داشته باشید که $x_{p,ss}$ به سرعت روبه جلو U بستگی دارد. فرم بی‌بعد شده به صورت زیر است

$$x'_{p,ss} = \frac{x_{p,ss}}{L_{PP}} = - \frac{N'_r Y'_\delta - (Y'_r - m') N'_\delta}{Y'_v N'_\delta - N'_v Y'_\delta} \quad (31)$$

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی چگونگی استفاده از مدل کنترلی Nomoto در حوزه کنترل هدینگ کشتی‌ها پرداخته شد. مدل کنترلی Nomoto به عنوان یک روش پیشرفته و مبتنی بر کنترل بهینه، امکان بهبود دقت و پایداری در کنترل هدینگ کشتی‌ها را فراهم می‌کند. با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیچیده و تجزیه و تحلیل دقیق، مدل Nomoto به تنظیم پارامترهای کنترلی می‌پردازد تا عملکرد کشتی در شرایط مختلف دریایی بهبود یابد.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از مدل کنترلی Nomoto منجر به بهبود چشم‌گیری در دقت کنترل هدینگ کشتی‌ها می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی از جمله وزن، نیروی پیشران و تعادل کشتی، به طور انعطاف‌پذیر به تطبیق با شرایط دریایی می‌پردازد و بهینه‌سازی کارایی کشتی را تحت نظر دارد. با توجه به پیچیدگی‌های محیط دریایی و تغییرات ناگهانی وضعیت هوا و دریا، استفاده از مدل کنترلی Nomoto می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند در بهبود کنترل هدینگ و افزایش سطح ایمنی و کارایی در حمل و نقل دریایی اثربخش باشد.

۷- مراجع

- [1] T. I. Fossen and T. Perez, "Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs: Estimating the effects of waves, wind, and current," *IEEE Control Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 32–46, 2009, doi: 10.1109/MCS.2009.934408.
- [2] Thor I. Fossen - *Marine Control Systems Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles-Marine Cybernetics*, Trondheim, Norway (2002). doi: 10.2514/1.17190.
- [3] "T. Perez, Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Reduction Using Rudder and Fins (Advances in Industrial Control Series). London: Springer-Verlag, 2005.", doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108451.
- [4] "T. I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles. New York Wiley, 1994."
- [5] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2011. doi: 10.1002/9781119994138.
- [6] F. J. Velasco, E. R. Herrero, E. Lopez, and E. Moyano, "Identification for a heading autopilot of an autonomous in-scale fast ferry," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 263–274, 2013, doi: 10.1109/JOE.2012.2227175.
- [7] "اقبالی بابادی، حسین و حسینی، ایرج و بابایی، ایرج، ۱۳۹۳، طراحی سیستم کنترلی هدایت خودکار سمت حرکت برای کشتی مدل، سومین کنفرانس ملی ایده‌های نو در مهندسی برق، اصفهان،" <https://civilica.com/doc/348606.pdf>.
- [8] M. Tomera, "Nonlinear controller design of a ship autopilot," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 271–280, 2010, doi: 10.2478/v10006-010-0020-8.
- [9] K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, and S. Hirano, "On the steering qualities of ships," *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 4, no. 35, pp. 354–370, 2018, doi: 10.3233/isp-1957-43504.



- [10] “Norrbin, N. H. (1965). Zig-Zag Provets Teknik och Analys. Technical Report 12. The Swedish State Shipbuilding Experimental Tank (SSPA). Gothenburg, Sweden (in Swedish).”, doi: 10.1007/s003480100332.
- [11] “Bech, M. I. and L. Wagner Smith (1969). Analogue Simulation of Ship Maneuvers. Technical Report Hy-14. Hydro- and Aerodynamics Laboratory. Lyngby, Denmark.”.
- [12] “Dieudonné, J. (1953). Collected French Papers on the Stability of Route of Ships at Sea, 1949–1950 (Translated by H. E. Saunders and E. N. Labouvie). Technical Report DTMB-246. Naval Ship Research and Development Center. Washington D.C.”.
- [13] C. Y. Tzeng, “Analysis of the pivot point for a turning ship,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 39–44, 1998, doi: 10.51400/2709-6998.2518.

مروری بر جداکننده های کابلی (WRI)

محمد حسین های زاده اصفهانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* پست الکترونیک، نویسنده مسئول: mhhme154@gmail.com

چکیده

دمپره های کابلی که به عنوان جداکننده ارتعاش نیز شناخته می شوند، یک وسیله مکانیکی هستند که برای کاهش انتقال ارتعاشات و شوک استفاده می شوند. این دمپرها معمولاً در صنایع و کاربردهای مختلف برای محافظت از تجهیزات یا سازه های حساس در برابر ارتعاشات یا ضربه های خارجی استفاده می شود. بدلیل قابلیت دمپره های کابلی در مواجهه همزمان با نیروی های فشاری، برشی، خمشی و پیچشی و همچنین طراحی بسیار ساده، امروزه بسیار از این نوع دمپر استفاده می شود. در کشتی ها و شناورها بعلت منابع ارتعاشی مختلف و همچنین احتمال رخ دادن همزمان مدهای ارتعاشی متفاوت، از این نوع دمپر برای کاهش ارتعاشات تجهیزات روی شناور استفاده می شود. این دمپر ها بطور معمول از کابل های فولادی ضد زنگ ساخته می شوند و از طریق اصطکاک بین رشته سیم ها ارتعاشات وارده را میرا می کنند. در این مطالعه با استفاده از نتایج گذشتگان به مزیت ها، کاربردها و همچنین به بیان روابط حاکم بر سفتی عمودی و افقی دمپره های کابلی پولیکال پرداخته می شود.

کلید واژه: جداکننده کابلی، ارتعاشات غیر فعال، سفتی عمودی، سفتی افقی.

۱- مقدمه

برای درک بهتر عملکرد دمپر های کابلی در ابتدا بهتر است به مرور روش های کنترل ارتعاشات پرداخته شود. در حالت کلی برای کنترل ارتعاشات وارده به تجهیزات روش شناور سه روش وجود دارد که در ادامه به بیان آنها می پردازیم. روش اول کنترل غیر فعال ارتعاشات است. در این روش، پارامترهای اجزای سیستم جداسازی ثابت هستند و با ورودی های مختلف تغییر نمی کنند. سیستم های کنترلی غیرفعال در تجهیزات و سازه ها، باعث افزایش میرایی می شوند و پاسخ سیستم را تحت ارتعاشات خارجی کنترل می کنند. در سیستم های کنترل غیر فعال نیازی به منبع خارجی نیست. این سیستم ها در برابر تغییرات شرایط بارگذاری و پاسخ سازه عملکرد متفاوتی از خود نشان نمی دهند و همواره پارامترهای ذاتی آن ها ثابت است (۱). روش دوم، کنترل فعال ارتعاشات است. در این روش اجزای جداسازی سنتی با عناصر محرک نیرو با منبع خارجی جایگزین می شوند. این نوع جداسازی به یک سیستم کنترل پیچیده نیاز دارد تا هم عملکرد بهینه و هم قابلیت اطمینان را تضمین کند. سیستم های جداسازی فعال معمولاً از عناصری از جمله فنرها، دمپرها، محرک ها و گاهی اوقات جرم اضافی تشکیل شده اند. در این سیستم ها پاسخ تجهیز که می تواند شامل شتاب، سرعت و یا تغییر مکان باشد، در هر لحظه ضبط و سپس با استفاده از یک الگوریتم مشخص، نیروی کنترلی مورد نیاز برای کاهش ارتعاشات محاسبه می گردد. سپس با استفاده از یک منبع خارجی نیروهای محاسبه شده بر تجهیز تحت ارتعاش اعمال می شود و این کار تا زمان کاهش پاسخ تجهیز به حد مورد نظر ادامه می یابد (۲). اما روش سوم کنترل نیمه فعال ارتعاشات است. در این روش پارامترهای سیستم جداسازی بر اساس تحریک ورودی تغییر یافته و خواص مکانیکی سیستم متناسب با تحریک ورودی تغییر می کند (۱). بنابراین پس از بیان سه روش کنترل ارتعاشات می توان نتیجه گرفت که دمپر های کابلی یک از انواع کنترل ارتعاشات به روش غیر فعال هستند و این دمپرها با استفاده از خواص ذاتی خود به اتلاف انرژی در سیستم های مکانیکی می پردازند.

۲- دمپرهای کابلی

مطالعات بسیار زیادی بر روی دمپرهای کابلی انجام شده است. اما یکی از کامل‌ترین این مطالعات، پژوهش پابلو ای تاپیا گونزالس و دیگو اف لدمارامیرز است که به توصیف تجربی جداسازهای اصطکاک خشک برای شوک و ارتعاشات پرداختند و بیان کردند جداکننده‌های کابلی که به عنوان دمپرهای سیمی نیز شناخته می‌شوند، نوعی جداکننده ارتعاش هستند که معمولاً در محیط‌های خشن مانند محیط‌های نظامی، دریایی و هوافضا برای کاهش اثرات ارتعاشات مکانیکی گذرا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دمپرها از یک سری رشته‌های فولادی تشکیل شده‌اند که به دور یک رشته هسته پیچ خورده‌اند و در نتیجه یک طناب سیمی به وجود می‌آورند، که به شکل مارپیچ چیده شده‌اند. جداکننده‌های کابلی به دلیل اصطکاک ایجاد شده بین رشته‌های سیم در هنگام بارگیری و تخلیه، توانایی زیادی برای اتلاف انرژی دارند. آنها می‌توانند در حالت‌های کششی، برشی و پیچشی کار کنند و ویژگی‌های سفتی غیرخطی را در جهات مختلف مانند فشار، پیچش و برش ارائه دهند. علاوه بر این، آنها میرایی اصطکاک خشک را نشان می‌دهند که بیشتر به توانایی آنها در کاهش شوک و لرزش کمک می‌کند. همچنین بیان کردند پاسخ ضربه‌ای دمپرهای سیمی به طور کلی بهتر از سیستم‌های خطی معادل است. این به این دلیل است که دمپرهای کابلی دارای سفتی غیرخطی و میرایی اصطکاک خشک هستند که به آنها اجازه می‌دهد انرژی بیشتری را هدر دهند و بهتر شوک و لرزش را کاهش دهند. سفتی غیر خطی جداکننده‌های کابلی به این معنی است که آنها می‌توانند بارهای بالاتر را بدون تغییرات شکل (انحرافات) زیاد تحمل کنند، که این ویژگی برای جداسازی ضربه بسیار مهم و کاربردی است. در نتیجه، جداکننده‌های کابلی بهتر می‌توانند انرژی را در طول ضربات با سرعت بالا هدر دهند، که این قابلیت برای جداسازی ضربه بسیار مهم است (۳). برخی از نمونه‌هایی از کاربردهایی که ممکن است از جداکننده‌های کابلی استفاده شود شامل تجهیزات نظامی و هوافضا، دستگاه‌های الکترونیکی و سیستم‌های حمل‌ونقل است. در این کاربردها، جداکننده‌های کابلی می‌توانند به کاهش اثرات ارتعاشات مکانیکی و ضربه‌ها بر روی تجهیزات حساس کمک کنند که می‌تواند قابلیت اطمینان و طول عمر آنها را بهبود بخشد (۴). نکته مهم در طراحی دمپرهای کابلی این است که هم سفتی و هم میرایی این دمپرها را می‌توان با تغییر قطر طناب، ساختار سیم بکسل، جنس سیم و تعداد سیم پیچ‌ها تنظیم کرد (۵). دو نوع بسیار رایج دمپرهای کابلی، دمپرهای کابلی پولیکال و دمپرهای کابلی هلیکال است.



شکل ۲- دمپر کابلی پلیکال



شکل ۱- دمپر کابلی هلیکال

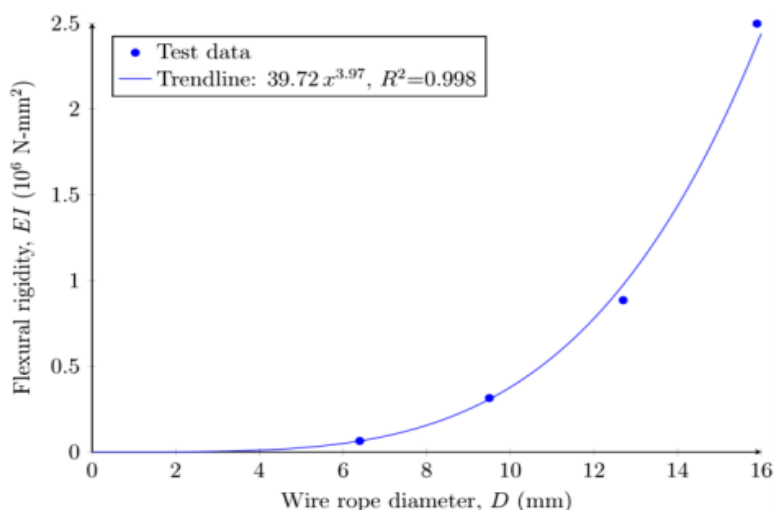
پارامتر بسیار مهم در طراحی این نوع دمپر، مقدار سفتی در جهات مختلف است. تینگ یوک شیه یک مطالعه عددی بسیار کامل بر روی دمپرهای کابلی پولیکال انجام داده است و مقدار سفتی این دمپرها را در دو جهت افقی و عمودی بصورت تحلیلی و تجربی محاسبه کرده است و نتیجه گرفته است که با استفاده از قضیه دوم کاستیگیلیانو می‌توان سفتی را تخمین زد. رابطه سفتی عمودی را می‌توان برای دمپر کابلی پولیکال طبق فرمول زیر بدست آورد (۶).

$$k_V = N \times \frac{24\pi EI}{\left(\left(9\pi^2 + 6\pi - 2\frac{11}{2} - 48 \right) \times R^3 \right)} \quad (7)$$

رابطه سفتی در راستای افقی را نیز می توان طبق فرمول زیر بدست آورد.

$$k_L = N \times \frac{8EI(3\pi + 2)}{R^3(-64\sqrt{2} + 27\pi^2 - 3\pi(8\sqrt{2} - 4) - 72)} \quad (8)$$

در روابط بالا N بیانگر تعداد حلقه ها و R بیانگر شعاع انحنای کابل است. همان طور که از روابط بالا مشخص است سفتی با مدول الاستیک کابل رابطه مستقیم و با شعاع انحنای کابل رابطه عکس دارد (7) یکی از چالش ها در تحلیل دمپره های کابلی همواره مقدار EI است. بالاجی و همکاران با آزمایشات تجربی بر روی سری کابل های فولادی ضد زنگ 6 X 19، با یک سرگردار کردن آنها و محاسبه خیز انتهای کابل ها به محاسبه EI برای این کابل ها پرداختند و نتایج را طبق شکل زیر بیان کردند (7).



شکل ۳- مقادیر EI بر حسب قطر های مختلف کابل فولادی ضد زنگ 6 X 19 (7)

۳- نتیجه گیری

از دمپره های کابلی می توان در محیط های خشن استفاده کرد. زیرا این دمپره ها تحت تأثیر دماهای زیاد، مواد شیمیایی، روغن ها، ازن و سایش ها قرار نمی گیرند. دمپره های کابلی می توانند در تمام جهات آزادی عمل کنند و به کاهش ارتعاشات و شوک ورودی بپردازند. از مزیت های دمپره های کابلی می توان به غیرخطی بودن زیاد، طول عمر بالا، قابلیت انحراف زیاد، محدوده دمایی قابل توجه و میرایی نزدیک به ۲۰ درصد اشاره کرد. همچنین روابط بیان شده در این مطالعه نشان می دهد که سفتی دمپره های کابلی پولیکال در هر دو جهت افقی و عمودی با مدول الاستیک رابطه مستقیم و با شعاع انحنای کابل رابطه عکس دارد.



۴ - منابع

- (۱) Klembczyk AR. Introduction to shock and vibration isolation and damping systems. InIMAC-XXVII: Conference & Exposition on Structural Dynamics 2009 (pp. 58-66).
- (۲) Kandasamy R, Cui F, Townsend N, Foo CC, Guo J, Sheno A, Xiong Y. A review of vibration control methods for marine offshore structures. *Ocean Engineering*. 2016 Nov 15; 127:279-97.
- (۳) Tapia-González PE, Ledezma-Ramírez DF. Experimental characterisation of dry friction isolators for shock and vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2017 Mar;36(1):83-95.
- (۴) Rashidi S, Ziaei-Rad S. Experimental and numerical vibration analysis of wire rope isolators under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Structures*. 2017 Oct 1; 148:328-39.
- (۵) Gerges RR, Vickery BJ. Design of tuned mass dampers incorporating wire rope springs: Part I: Dynamic representation of wire rope springs. *Engineering Structures*. 2005 Apr 1;27(5):653-61.
- (۶) Ting YS. An Analytical and Experimental Investigation of Polycal Wire Rope Vibration Isolators for Industrial Equipment (Doctoral dissertation, Curtin University).
- (۷) Balaji PS, Moussa L, Rahman ME, Ho LH. An analytical study on the static vertical stiffness of wire rope isolators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016 Jan; 30:287-95.