



ارائه یک ربات خودکار زیرسطحی و طراحی کنترلر مسیر آن به منظور بازرسی بدنه کشتی‌ها

فریار شمشیری امیرکلایی¹، رضا حسن‌زاده قاسمی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

* سبزوار، صندوق پستی 397، r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 تیر 1394
پذیرش: 13 مرداد 1394
ارائه در سایت: 31 مرداد 1394

کلید واژگان:

ربات هوشمند زیرسطحی

بازرسی بدنه کشتی

کنترلر فیدبک حالت

چکیده

در این مقاله یک ربات هوشمند زیرسطحی برای بازرسی قسمت آبخور بدنه کشتی‌ها ارائه شده است. انجام این گونه عملیات تنها با استفاده از رباتی که دارای قابلیت مانور بالا، قابلیت هاورینگ و کنترل‌پذیری بالا باشد به درستی امکان‌پذیر بوده و سبب افزایش دقت و سرعت در انجام کار، کاهش هزینه‌ها و خطر به کارگیری نیروی انسانی می‌شود. در ربات ارائه شده، تعداد، موقعیت و جهت تراسترها با توجه به کاربرد مورد نظر بهینه‌سازی شده است تا بهترین ترکیب، از نظر مصرف انرژی و پیچیدگی کنترلر به دست آید و مانورپذیری مطلوب ربات برای بازرسی تأمین شود. از 6 درجه آزادی فقط حرکت در جهت زاویه رول مقید شده است. کنترلر پیشنهادی در این مقاله روی مدل دینامیکی خطی‌سازی شده طراحی و پیاده‌سازی شده و سپس به مدل دینامیکی غیرخطی اعمال و اعتبارسنجی انجام شده است. کنترلر پیشنهادی دارای 3 حلقه است، یک حلقه برای کنترل مسیر در صفحه عمودی، دیگری برای کنترل مسیر در صفحه افقی که هر دو کنترلر فیدبک حالت است و از یک کنترلر PID برای کنترل سرعت رو به جلوی ربات استفاده شده است. میزان مقاوم بودن کنترلر به جریان‌های آبی که سبب اعمال نیروهای ناگهانی به ربات می‌شود و همچنین کارایی کنترلر در شرایط عدم قطعیت ضرایب هیدرودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. کنترلر فیدبک حالت که یکی از روش‌های کنترل مدرن است؛ به دلیل مناسب بودن برای سیستم‌های غیرخطی و قابلیت کنترل سیستم‌های چند ورودی چند خروجی و همچنین پیاده‌سازی آسان نسبت به دیگر کنترلرها از محبوبیت بالایی برخوردار است.

Representation of an Autonomous Underwater Vehicle and Trajectory Controller design for in-water ship hull inspection

Faryar Shamshiri Amirkolai, Reza Hasanzadeh Ghasemi*

- Department of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

* P.O.B. 397, Sabzevar, Iran, r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 July 2015
Accepted 04 August 2015
Available Online 21 August 2015

Keywords:
HAUV
Ship Hull Inspection
State Feedback Controller

ABSTRACT

This paper presents a trajectory controller for a Hovering type Autonomous Underwater (HAUV) Vehicle to meet the demands of in-water ship hull inspection. Accomplishing this task can just be done by a vehicle that has all special requirements like high maneuverability, precise controllability and especially, Hovering Capability. Utility of such vehicle causes increasing precision, saving time and money and less health hazard for divers. Thrusters' configuration in terms of the number of thrusters, position and the thrust direction of each thruster is presented to provide the most suitable formation in terms of less energy consumption, reduced complexity of control strategies and controlling the most degrees of freedom. In this paper, roll degree of freedom is just constrained. The controller that is demonstrated was designed based on the linear dynamic model and then applied to the non-linear model to validate the controller's practicality. This controller consists of 3 different loops, one for horizontal plane, another for the vertical plane, both were designed in state space and the last one is a PID controller which is developed to control the forward speed. In the next step, the robustness of the controller is investigated in the presence of underwater disturbance and uncertainty of the hydrodynamic coefficients. State feedback controllers have advantages such as being suitable for non-linear models, useful for MIMO system and simplicity in application development.

1- مقدمه

1-1- ایده‌پردازی

عمیقی از جمله نحوه بهره‌برداری بهینه، مهار قدرت بی‌پایان دریا و کنترل عبور و مرور همراه بوده است. تعمیر و نگهداری سدها، سکوها، نفتی، زیر نظر گرفتن عبور و مرور غیرقانونی مانند قاچاق کالا یا انسان و غیره از این

همواره ورود انسان به دریاها و بهره‌برداری از این نعمت الهی با چالش‌های

Please cite this article using:

F. Shamshiri Amirkolai, R. Hasanzadeh Ghasemi, Representation of an Autonomous Underwater Vehicle and Trajectory Controller design for in-water ship hull inspection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 12-22, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در بسیاری از مأموریت‌های زیر سطحی، به سطح بالایی از کنترل دقیق موقعیت ربات جهت به‌دست آوردن اطلاعات دقیق نیاز است. قابلیت مانور بالا و حرکت در فاصله هرچه نزدیک‌تر ربات اطراف سازه‌های زیر سطحی نیز بسیار پرکاربرد است. بازرسی ایمن در زیر آب نیازمند یک تصویر دقیق از منطقه هدف است و در جمع‌آوری اطلاعات دقیق بصری، ربات باید به اندازه کافی به هدف نزدیک شود. ربات‌های اژدرگون ربات‌هایی با خصوصیات منحصر به فرد مانند میزان مصرف انرژی پایین، نیروی درگ پایین و سرعت به نسبت بالا، برای مأموریت‌هایی مانند نقشه‌برداری از کف اقیانوس‌ها، گشت‌زنی و ... مناسب است. استفاده از این ابزار برای انجام عملیاتی که شرح داده شد چندان مناسب نیست، زیرا به دلیل مانورپذیری بسیار پایین این نوع ربات‌ها و همچنین وابسته بودن سطوح کنترلی مانند زاویه بالک‌ها به سرعت پیش‌رانش، انجام عملیاتی مانند بازرسی بدنه کشتی تقریباً غیرممکن است، استفاده از ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور¹ انتخابی مناسب‌تر به نظر می‌رسد، ولی در این ربات‌ها نیز به دلیل وجود اپراتور ریسک خطای انسانی بالا بوده و همچنین استفاده از کابل یا امواج الکترومغناطیس به‌عنوان رابط بین اپراتور و ربات هر کدام مشکلات خاص خود را داراست. ربات‌های هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ² یک ایده تازه در صنعت ربات‌های زیرسطحی است که از ادغام قابلیت مانوردهی بالای ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور³ و انعطاف‌پذیری ربات‌های هوشمند زیرسطحی اژدرگون⁴ به‌وجود آمده که دارای قابلیت انجام مأموریت‌های با حجم اطلاعات بالا و دقیق در ارتباط با سازه‌های دریایی است [3,4].

1-2- پیشگامان در زمینه بازرسی بدنه کشتی‌ها

پیش از این برخی از شناورهای نظامی برای بازرسی در موقعیت‌های خاص، از ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور جهت بازرسی بدنه کشتی‌ها استفاده می‌کردند. استفاده از این ابزارها سبب برطرف شدن برخی مشکلات از جمله جلوگیری از به خطر افتادن جان غواصان شده، ولی مشکلاتی مانند هدایت نه‌چندان دقیق و نیاز به اپراتور همچنان باقی است. یکی از نخستین ربات‌های بازرسی تجاری با نام لمپری⁵ در سال 1999 توسط هریس و اسلیت معرفی شد [5]. این ربات زیرسطحی کنترل از راه دور کوچک با حرکتی شبیه به خزیدن بر سطح خارجی بدنه کشتی اقدام به بازرسی کشتی می‌کرد، این ربات توسط اپراتور کنترل شده و خود را به قسمت مورد نظر بدنه کشتی می‌رساند و سپس با استفاده از تراسترهایی که در قسمت جلویی ربات قرار دارد با مکش آب، خود را به بدنه کشتی می‌چسباند. در ادامه اپراتور باید ربات را روی چرخ‌هایی که با بدنه کشتی تماس داشتند حرکت دهد، این در حالی است که قسمت‌هایی با شکل هندسی پیچیده‌تر مانند برآمدگی سونار یا اطراف پروانه و غیره با این روش قابل بازرسی نیست.

ستوس² یک ربات هوشمند زیرسطحی است که قادر به گشت‌زنی آزادانه زیر سطح است که برای بررسی بدنه کشتی‌ها توسط تریمبلر و بلچر در سال 2002 معرفی شده است. این ربات با استفاده از فاصله‌سنج به حفظ فاصله نسبی از بدنه کشتی می‌پردازد [6]. اودیسه⁶ نمونه‌ای دیگر از ربات‌های هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ است که توسط دیست و همکاران از

دست چالش‌هاست [1]. آسیب دیدن بخش آبخور کشتی‌ها در صورت عدم‌رسیدگی مناسب خطرات مالی و جانی جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد داشت، به‌ویژه هنگام وقوع حادثه یا فعالیت‌های مخرب علیه کشتی‌های نظامی و بازرگانی خارج از مرزهای آبی، مشکلات را دوچندان می‌کند. روش متداول برای عیب‌یابی و تعمیر این گونه نقص‌ها استفاده از غواص‌هاست، ولی این نیروهای انسانی همیشه در دسترس نبوده و کارشان همراه با خطاست و در آب‌های کم عمق این عملیات بسیار خطرناک است. تعمیر و نگهداری کشتی‌ها مساله‌ای است که روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد، در ادامه برخی از دلایل این امر مهم را بیان خواهیم کرد:

1. ابعاد بسیار بزرگ کشتی‌ها و ناوها: سطح خارجی این شناورها در حدود صدها مترمربع است که در بندرگاه‌هایی با وسعت هزاران مترمربع پهلوی می‌گیرند این در حالی است که ابعاد یک مین آبی در حدود 20 سانتی‌متر است، این اختلاف زیاد در ابعاد از جمله نخستین چالش‌هایی است که سبب نیاز به بازرسی‌های مکرر می‌شود.
2. اهداف کوچک: هنگامی که سطح خارجی شناور مشکوک به عیوب ساختاری باشد، بازرسی هر سانتی‌متر با اهمیت است که با توجه به ابعاد کشتی‌ها و دید کم در زیر آب به انجام رساندن درست و دقیق این عملیات کار آسانی نخواهد بود.
3. بندرگاه‌ها و عمق کم آب: وجود امواج و جریان‌های آب غیرقابل پیش‌بینی، میرایی امواج الکترومغناطیس زیر آب، خواص مغناطیسی ضعیف، میدان دید کم به دلیل وجود ذرات معلق و فاصله کم بین کف دریا تا سطح زیر کشتی [2].

یک روش متداول برای بازرسی بدنه کشتی‌ها استخدام چندین غواص است که زیر بدنه کشتی در یک خط مستقیم کنار هم شنا می‌کنند. این چیدمان و روش منحصر به فرد برای اطمینان 100 درصد از بازرسی کل بدنه کشتی در شرایط محیطی دشوار به وجود آمده است. این عملیات زمان‌بر و خطرناک است و این احتمال که مورد مهمی از چشم غواصان پنهان بماند وجود دارد، به این دلیل که مسیریابی دقیق و بازرسی هم‌زمان در دید کم و شرایط به‌ویژه زیر آب برای انسان بسیار دشوار است.

خوشبختانه در سال‌های اخیر صنعت ربات‌های زیرسطحی به سرعت در حال پیشرفت بوده و استفاده از این ربات‌ها با قابلیت‌های مختلف، برای انجام عملیات بازرسی بسیار مفید واقع شده‌اند، ولی برای انجام صحیح مأموریت و برای به‌کارگیری یک سیستم عیب‌یابی و تعمیر کارآمد با استفاده از ربات‌ها، ویژگی‌های زیر مورد نظر است.

1. سطح مورد نظر باید با اطمینان 100 درصد بازرسی شود.
2. عکس‌های تهیه شده از بدنه کشتی توسط ربات باید به اندازه کافی با کیفیت بوده تا بتوان اهداف مورد نظر را نسبت به بیرون‌زدگی‌ها و ویژگی‌های ساختاری فلز و رسوب دریایی تشخیص داد.
3. در صورتی که هدف شناسایی شد، مکان دقیق آن باید با دقت مناسبی ثبت و ضبط شود تا بتوان دوباره برای ارجاعات بعدی به محل بازگشت.
4. به‌کارگیری ربات باید آسان و سریع و کنترل ربات نسبت به امواج و جریان‌ها به اندازه کافی مقاوم باشد، اندازه کوچک ربات در فضاهای کوچک یک مزیت محسوب می‌شود.
5. مدت زمان کارکرد ربات در هر مأموریت باید به مقدار بیشینه برسد.

1- ROV

2- Hovering type Autonomous Underwater Vehicle (HAUV)

3- Remotely Operated Vehicle (ROV)

4- Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

5- Lamp ray

6- Odyssey

با قابلیت هاورینگ به ندرت استفاده شده‌اند. قنبرزاده و قنوازی [20]، موراس و سیلس [21] انیربان و سورندرا [22] این نوع کنترلرها را برای ربات‌های اژدرگون به کار گرفته‌اند. نعیم و همکاران [23] از تنظیم‌کننده‌های مربعی خطی⁵ که یکی از روش‌های تئوری کنترل بهینه است استفاده کردند. فیدبک حالت تنظیم کننده‌های مربعی خطی با فرض قابل اندازه‌گیری بودن تمامی حالت‌های سیستم قابل حل می‌باشد، که این فرض همیشه درست نیست به این دلیل که سنسور برای اندازه‌گیری همه حالت‌ها موجود نیست و یا گاهی اندازه‌گیری برخی از سنسورها با اغتشاشات فراوان همراه است [3,18]. کنترلر مود لغزشی⁶ توسط یورگر و اسلوتین [24]، هیلی و لینارد [25] برای ربات‌های زیرسطحی اژدرگون مطرح شد، ارشد و رزداک [26] این نوع کنترلر را بر یک ربات هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ پیاده‌سازی کرد. کنترلر مود لغزشی برای مرتفع کردن مشکل فقدان قطعیت در یک بازه معلوم برای ضرایب معادله دینامیکی سیستم استفاده می‌شود [18,27]. کنترلرهای ویژوال سروو با این هدف که با استفاده از علائم موجود در دریا، اقدام به ناوبری شناور کنند، طراحی شده‌اند [29,28]. با توجه به فقدان شفافیت و میدان دید کم در بخش‌های کم عمق بندرگاه‌ها، اعمال کنترلرهای بر پایه بینایی، جز در موارد خاص چندان کاربردی نیست. در عمل، پیاده‌سازی کنترلرهای هوشمند و کنترلرهای مقاوم مانند کنترلر مود لغزشی دارای پیچیدگی‌های سخت‌افزاری بوده و گاهی لختی عملگرها و دینامیک سیستم مشکلاتی را در اجرا ایجاد می‌کند. استفاده از کنترلر فیدبک حالت به دلیل سادگی اعمال به سیستم‌های چند ورودی چند خروجی مانند شناورهای زیرسطحی با قابلیت هاورینگ و نیز قدرت آن در کنترل متغیرها بسیار مناسب است.

هدف بلند مدت در صنعت ربات‌های هوشمند زیرسطحی، توسعه استراتژی‌ها و ابزارهای مناسب برای مانور مؤثر و کنترل دقیق حرکت است. به‌گونه‌ای که ربات قادر به انجام مانورهای دشوار با عملکرد مطلوب باشد مانند انجام مانور تهاجمی مانند پیچ تند با سرعت بالا، زوایای حمله بالا، سرعت بسیار بالا یا خیلی پایین، عملکرد مطلوب در شرایط جریان آشفته و به‌طور کل عملیاتی خارج از شرایط معمول. شرط هاورینگ نیز از اهمیت عملی بالایی برخوردار است، شناورهایی که قادر به انجام هاورینگ است به‌طور فزاینده‌ای برای انجام وظایف بازرسی دقیق، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در همین راستا اهداف علمی را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم کرد: درک دقیقی از دینامیک ربات‌های هوشمند زیرسطحی و توسعه سیستم‌های کنترل مقاوم برای آن‌ها که مناسب با سطح هر مأموریت خاص باشند [9].

2- مدل‌سازی دینامیکی

معادلات حاکم بر حرکت شناورهای زیرسطحی نخستین بار توسط گرتلر و هاگن [30] در سال 1967 به‌دست آمد و در سال‌های بعد مدل‌های دیگری توسط افرادی از جمله لوگان [31]، ژاو و همکاران [32] و چن [27] نیز معرفی شد.

ربات زیرسطحی ارائه شده در این مقاله براساس ربات RRC⁷ است. مدل اولیه و آزمایشی ربات زیرسطحی RRC دارای شاسی فضایی⁸ بوده و در دانشگاه NTU⁹ جهت انجام عملیاتی از جمله بازرسی و عیب‌یابی لوله‌های

دانشگاه تکنولوژی ماساچوست¹ معرفی شده است [6]. این ربات که به نسبت ارزان‌تر و در هر مأموریت تنها برای یک ساعت (15 دقیقه برای به عمق رفتن، 30 دقیقه انجام عملیات و 15 دقیقه پایانی برای برگشت به سطح) قادر به ذخیره انرژی است.

یکی از ربات‌های موفق از این دست به‌طور مشترک توسط شرکت «بلوفین رباتیکس»² و دانشگاه تکنولوژی ماساچوست برای بازرسی بدنه کشتی تحت بودجه دفتر تحقیقات نیروی دریایی آمریکا³ توسعه داده شد. هدف از این پروژه طراحی یک ربات کوچک و کم هزینه بوده که قادر به حرکت در آب‌های بسیار کم عمق، با دقت بسیار بالا باشد. تمرکز طراحی این شناورها بر بازرسی بدنه شناورها برای مأموریت‌های ضد تروریسم و عملیات حفاظتی بوده است [2,7,8]. کنترلر استفاده شده در این ربات مانند بیشتر ربات‌های مشابه PID است [9].

نگهداری پور و فیروزفام در سال 2005 فعالیت‌هایی در راستای بهبود سیستم تصویربرداری یک ربات زیرسطحی کنترل از راه دور جهت بازرسی بدنه کشتی ارائه کردند [1]، همچنین فعالیت‌های بسیاری برای ربات در راستای برنامه‌ریزی مسیر مناسب⁴، جهت بازرسی قسمت‌هایی مانند اطراف پروانه، موتور و در کل بخش‌های دارای خمیدگی‌های به نسبت زیاد انجام شده تا سنسورها بهترین بازده را در ایجاد شکل سه‌بعدی بدنه کشتی و تصویربرداری داشته باشند. انگلوت و هاور در سال 2010 بر مسأله مشابه آن‌چه بیان شد فعالیت کردند [10]. در مقالات [11,12] هولینگر و همکاران روشی برای ساخت مدل پروانه با مش‌بندی‌های سه‌بعدی که از ابر نقطه‌های سونار مشتق شده است، معرفی کرده و عدم قطعیت مدل‌سازی را از طریق رگرسیون بیزی غیرپارامتری نشان می‌دهند.

1-3- مروری بر فعالیت‌های پیشین در زمینه دینامیک و کنترل

به دلیل محیط‌کاری و خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد آب، وجود نیروهای متعدد در جهت‌های مختلف، رفتار بسیار غیرخطی و متغیر با زمان سیستم و ضرایب هیدرودینامیکی تقریبی که به شکل ظاهری و سرعت ربات وابسته‌اند، سبب افزایش پیچیدگی مدل‌سازی دینامیکی شناور زیرسطحی می‌شود. با توجه به ساده‌سازی‌های مختلف در مدل‌سازی این سیستم‌ها، روش‌های کنترلی متعددی جهت انجام مأموریت‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند که هر یک دارای نقاط ضعف و قوت خاصی است. یو [13] و کراون [14] انواع این کنترلرها را نقد و بررسی کرده‌اند.

کنترلر PID به دلیل پیاده‌سازی آسان دارای محبوبیت فراوانی است و توسط افرادی از جمله پرسترو [15]، پیو [16] و چوی [17] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کنترلرهای PID برای سیستم‌های تک‌ورودی تک‌خروجی مناسب است [18]. کنترلرهای هوشمند مانند کنترلرهای منطق فازی یا کنترلر شبکه عصبی یک انتخاب متداول برای ربات‌های زیرسطحی هستند. استفاده از این کنترلرها یک راه حل برای کنترل سیستم‌هایی است که مدل دینامیکی دقیقی از آن‌ها در دسترس نیست یا در کل مدل دینامیکی سیستم موجود نیست، از این رو اعمال کردن یک کنترلر فازی بی‌نیاز از داشتن یک مدل پیچیده هیدرودینامیکی است، اما پیاده‌سازی این کنترلرها به دلایلی از جمله فرایند زمان‌بر تنظیم پارامترها بسیار دشوار است [19]. این کنترلرها برای ربات‌های اژدرگون محبوب‌تر بوده و برای ربات‌های هوشمند زیرسطحی

5- LQR

6- Sliding Mode

7- Robotics Research Center

8- Open Space Frame

9- Nanyang Technological University

1- MIT

2- Bluefin Robotics

3- Office of Naval Research (ONR)

4- Path planning

جدول 1 نام‌گذاری متغیرها

درجه آزادی	تغییر مکان / زوایای اولر	سرعت خطی / زاویه‌ای	نیرو / گشتاور
سرج	x	u	X
اسوی	y	v	Y
هیو	z	w	Z
رول	ϕ	p	K
پیچ	θ	q	M
یاو	ψ	r	N

فاصله بین نیروهای بویانسی و نیروی گرانش، گشتاور خودتنظیم‌کننده ایجاد شده و پایداری ربات را تضمین می‌کند، همچنین با برداشتن تراسترهای عمودی در طرفین ربات تغییرات زاویه رول بسیار کوچک بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. برای درک آسان‌تر حرکت ربات، شبیه‌سازی ربات در نرم‌افزار V-Realm انجام گرفته است (شکل 2). در این شکل محل قرارگیری تراسترها روی ربات قابل نمایش است. برای پیاده‌سازی کنترلر از خصوصیات فیزیکی و ماتریس جرم افزوده به‌دست‌آمده توسط انگ و همکاران [33] و ضرایب هیدرودینامیک به‌دست‌آمده توسط چین و لو [34] برای ربات RRC استفاده شده است.

برای مدل‌سازی دینامیکی شناور زیرسطحی ارائه شده، مختصات جهانی و مختصات بدنی مطابق شکل 3 در نظر گرفته شده است. پارامترها و متغیرهای استفاده شده، در جدول 1 ارائه شده است.

بردار نیروی تراسترها به‌صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_5 & D_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 \\ F_3 + F_4 \\ F_5 + F_6 \\ 0 \\ F_5 * D_5 + F_6 * D_6 \\ F_1 * D_1 + F_2 * D_2 + F_3 * D_3 + F_4 * D_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن D_1, D_2 و $D_6 \dots$ به ترتیب فاصله عمودی تراسترهای F_1, F_2 و $F_6 \dots$ از مرکز بویانسی ربات است که مبدا دستگاه مختصات بدنی نیز است. این مقادیر در رابطه (2) آورده شده است.

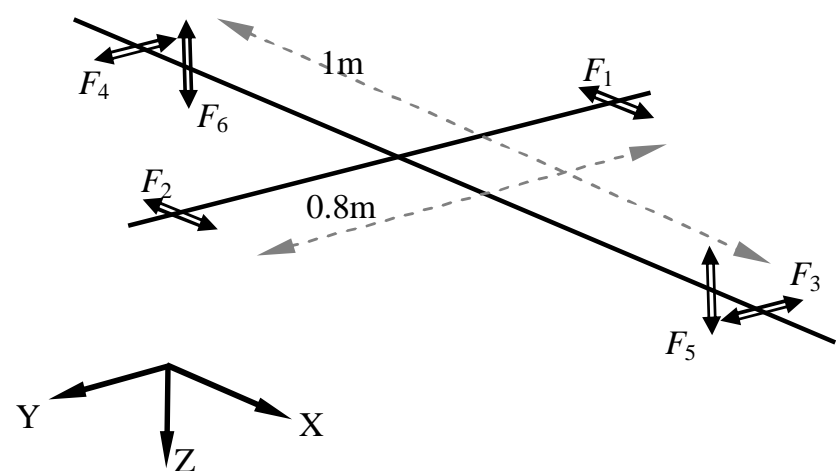
$$\begin{aligned} D_1 &= -0.4\text{m} & D_2 &= 0.4\text{m} & D_3 &= 0.5\text{m} \\ D_4 &= -0.5\text{m} & D_5 &= 0.5\text{m} & D_6 &= -0.5\text{m} \end{aligned} \quad (2)$$

معادلات کلی حاکم بر حرکت شناور زیرسطحی توسط افرادی از جمله مک اووین و استریتلین [35] و رزداک و ارشد [36] ارائه و خطی‌سازی شده است. برای مدل ارائه شده در مقاله حاضر، معادلات دینامیکی مربوط به درجات آزادی اسوی¹ و یاو² که برای کنترل در صفحه افقی به‌کار برده می‌شود، مطابق معادله (3) خواهد بود.

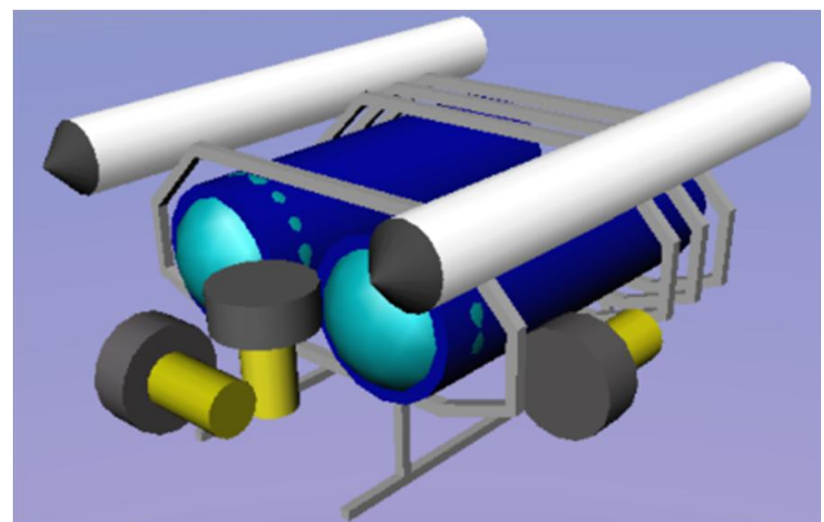
$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

زیرسطحی مانند پیدا کردن نشی‌ها و ترک در این لوله‌ها ساخته شد. وزن خشک این ربات 115 کیلوگرم است. این ربات 6 درجه آزادی با 4 تراستر است [33].

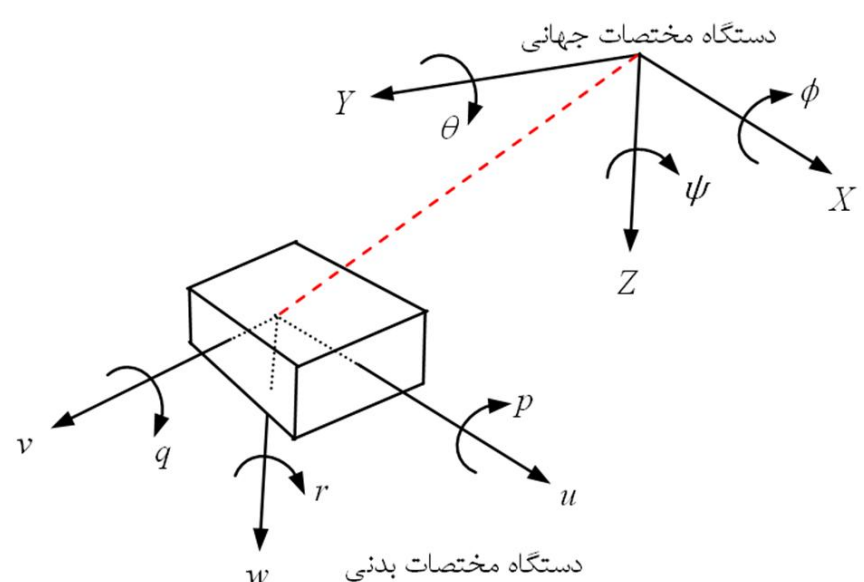
در این مقاله برای دستیابی به ربات زیرسطحی برای بازرسی سازه‌های زیر آب و عملیات دقیق در مواجهه با محیط پیرامون ربات، تغییرات دینامیکی از جمله استفاده از شش تراستر، تغییر موقعیت و جهت قرارگیری تراسترها (شکل 1) و مقید کردن درجه آزادی رول، اعمال شده است. با تنظیم فاصله بین مرکز جرم و مرکز بویانسی می‌توان پایداری استاتیکی کافی در جهت‌های رول و پیچ ایجاد کرد. در ربات ارائه‌شده در این مقاله فاصله مرکز جرم تا مرکز بویانسی 0/1 متر است، در نتیجه با وجود این



شکل 1 محل قرارگیری تراسترها



شکل 2 تصویر ربات در نرم‌افزار V-Realm



شکل 3 دستگاه مختصات

1- Sway
2- Yaw

نیروی تراسترهاست را تولید کرده و به سیستم وارد می‌کند. بدیهی است که ماکزیمم نیروی قابل دریافت از تراسترها در دنیای واقعی محدود بوده و برای انواع مختلف تراسترهای مورد استفاده در ربات‌های متفاوت، دامنه وسیعی را شامل می‌شود، این امر در شبیه‌سازی نیز اعمال شده و با انجام یک مصالحه، ماکزیمم نیروی 70 نیوتن برای هر تراستر در نظر گرفته شد.

با توجه به طراحی کنترلر فیدبک حالت برای سیستم خطی، کنترلر فیدبک حالت در صورتی مورد تایید خواهد بود که برای سیستم غیرخطی با وجود عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش نیز نتایج مطلوبی را تأمین نماید.

برای بررسی میزان مقاوم بودن سیستم، دو موضوع بررسی شده است، الف) عدم قطعیت ضرایب هیدرودینامیک ب) اغتشاش خارجی به سیستم.

با توجه به فرضیات متعدد در محاسبه ضرایب هیدرودینامیک و جرم افزوده⁴، یکی از دلایل عدم قطعیت مدل‌سازی، مقادیر این ضرایب است. در این مقاله با تغییر این ضرایب در محدوده مشخص (با توجه به مقادیر محتمل)، مقاوم بودن کنترلر مورد تایید قرار گرفته است.

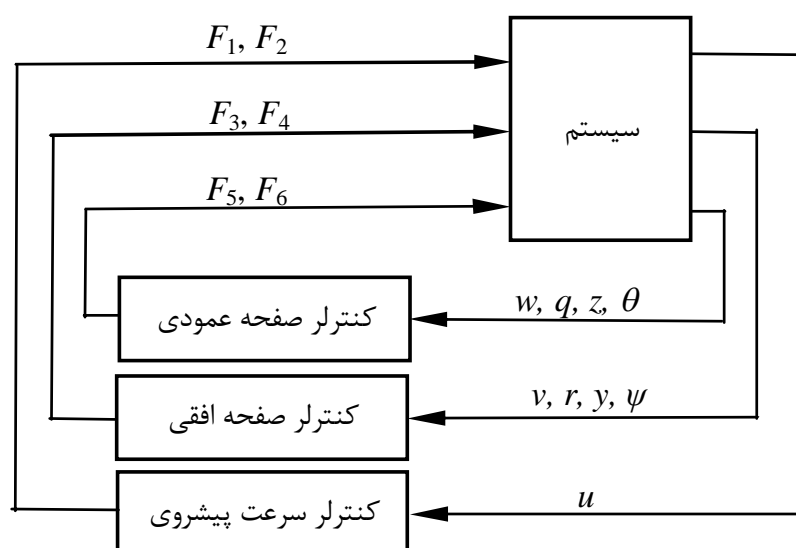
با توجه به محیط اغتشاشی در اطراف شناور زیرسطحی، نیروهایی با اندازه‌های مختلف و در زمان‌های مختلف به صورت یک تابع پله به صورت جداگانه و سپس با هم، در جهت‌های متفاوت به سیستم اعمال شده است تا چگونگی عملکرد تراسترها برای تطبیق با شرایط به وجود آمده، مورد بررسی قرار گیرد. اعمال این اغتشاش به سیستم نیز، نشان دهنده مقاوم بودن کنترلر طراحی شده بوده است.

4- بحث و نتایج

در نخستین گام در بررسی عملکرد کنترلر، کنترلر به سیستم خطی اعمال شده است. مسیر در نظر گرفته شده برای رهگیری شناور زیرسطحی، مشابه مسیر مورد استفاده برای بازرسی کشتی انتخاب شده است. با توجه به شکل 5، عملکرد کنترلر بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود. شکل‌های 6 و 7 نیروهای تراسترها برای این مانور را نشان می‌دهد. در مدل خطی‌سازی شده، سرعت سرچ مقداری ثابت بوده و مستقیماً در معادلات وارد می‌شود و از آن‌جا که تراسترهای 1 و 2 در این مانور تنها در حرکت رو به جلو دخالت دارند، بنابراین بدون تغییر خواهد بود.

به منظور تایید کنترلر، در ادامه عملکرد سیستم غیر خطی تحت تاثیر این کنترلر مورد بررسی قرار می‌گیرد. سه ورودی مطلوب مختلف به سیستم اعمال و پاسخ سیستم کنترلی در مانورهای متنوع ارائه می‌شود.

در ورودی مطلوب اول هر دو متغیر حالت y و z به طور همزمان تحت



شکل 4 نمودار بلوکی سیستم و کنترلر

$$= \begin{bmatrix} Y_v U & (Y_r - m)U & 0 & 0 \\ N_v U & (N_r - m x_g)U & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ y \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_3 + F_4 \\ F_1 * D_1 + F_2 * D_2 + F_3 * D_3 + F_4 * D_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

همچنین معادلات مربوط به درجات آزادی هیو¹ و پیچ² برای کنترل ربات در صفحه عمودی مطابق معادله (4) است.

$$\begin{bmatrix} m - Z_v & -m x_g - Z_q & 0 & 0 \\ -m x_g - M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w U & (Z_q + m)U & 0 & 0 \\ M_w U & (M_q - m x_g)U & 0 & w(z_b - z_b) \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_5 + F_6 \\ F_5 * D_5 + F_6 * D_6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

جهت استفاده از این معادلات برای کنترل فیدبک حالت، باید به صورت استاندارد رابطه (5) نوشته شود.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5)$$

پس از جای گذاری ثوابت فیزیکی و هیدرودینامیکی و سرعت پیشروی $u = 0.8 \text{ m/s}$ ماتریس‌های A, B, C و D بردار حالت x و بردار ورودی u حاصل از معادله (2) به صورت روابط (6) خواهد بود.

$$A = \begin{bmatrix} 0.4810 & -1.4534 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2937 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.0158 & 0.0158 \\ 0.1245 & -0.1245 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D = 0 \quad (6)$$

$$x = [v \ r \ y \ \psi]' \quad u = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]'$$

ماتریس‌های A, B, C و D بردار حالت x و بردار ورودی u برای معادله (4) نیز به صورت روابط (7) به دست می‌آید.

$$A = \begin{bmatrix} 2.5722 & 4.0800 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3490 & 0 & -33.7927 \\ 1 & 0 & 0 & -0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.0443 & 0.0443 \\ 0.1498 & -0.1498 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D = 0 \quad (7)$$

$$x = [w \ q \ z \ \theta]' \quad u = [F_5 \ F_6]'$$

3- کنترل ربات زیرسطحی

کنترلر طراحی شده با روش جایابی قطب‌ها³ با ورودی کنترلی نیروی تراسترها، در فضای حالت انجام گرفته است. نمودار بلوکی کنترلر سیستم، مطابق شکل 4 است، همان‌طور که در شکل هم پیداست هر کدام از کنترلرها با دریافت سیگنال مشخصی از سیستم، سیگنال فیدبک کنترلی را که همان

1- Heave

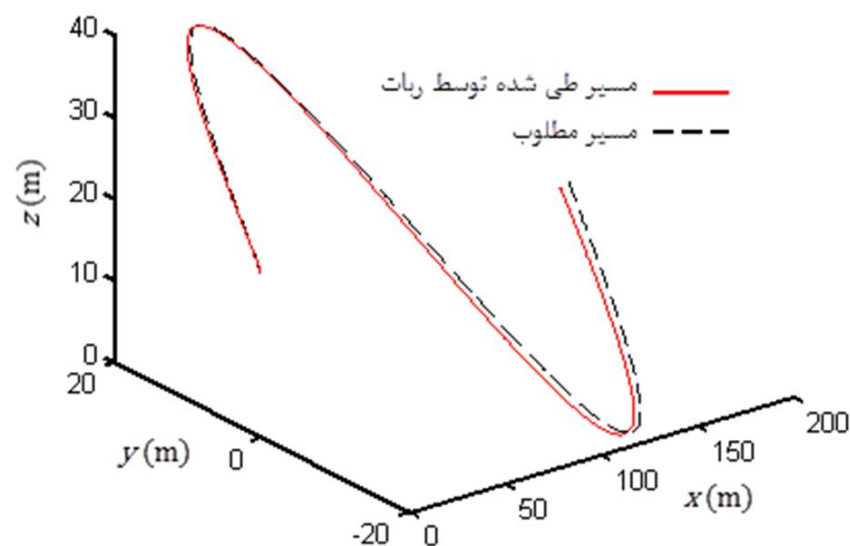
2- Pitch

3- Pole Placement

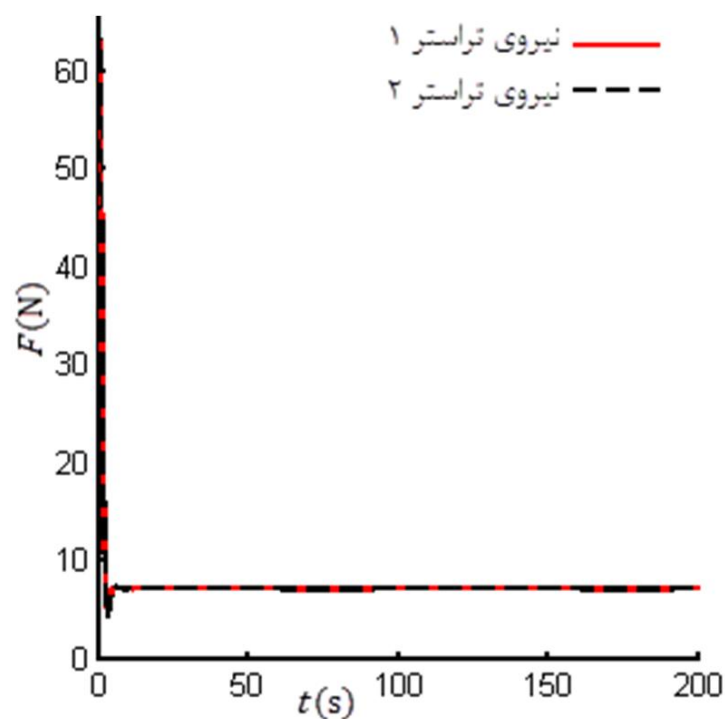
4- Added mass

در شکل 12 مسیر مارپیچ مطلوب و پاسخ سیستم کنترلی، ارائه شده است. این مسیر با اعمال مسیر سینوسی به متغیرهای حالت x ، y و یک خط صاف با شیب 0.5 برای عمق به‌دست آمده است. در شکل‌های 13-15 نیروی تراسترها برای به‌دست آمدن این مانور مشاهده می‌شود.

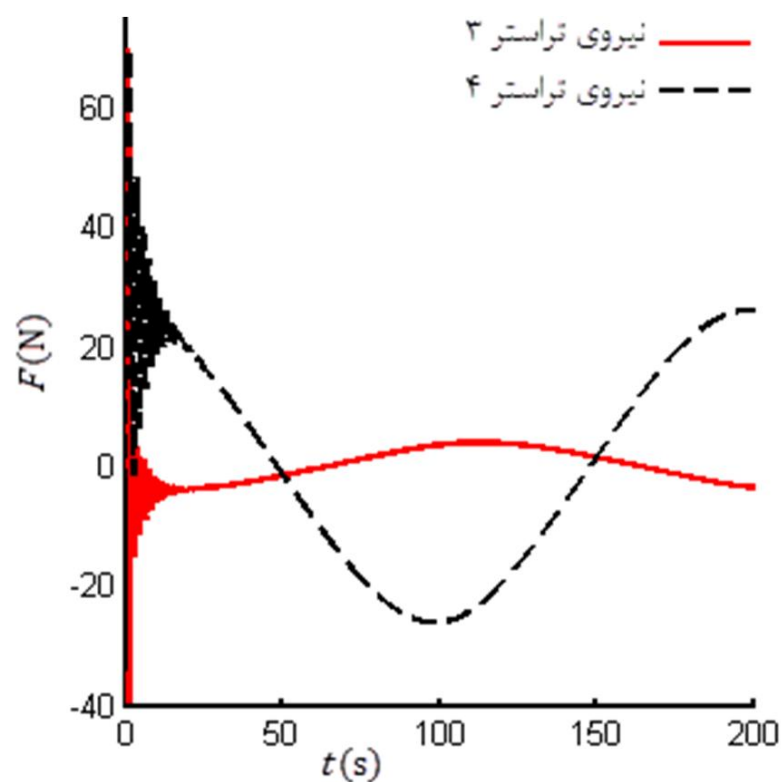
یک مزیت مهم ربات هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ آغاز حرکت در جهت افقی و عمودی از حالت سکون است. در این حالت سرعت پیشروی



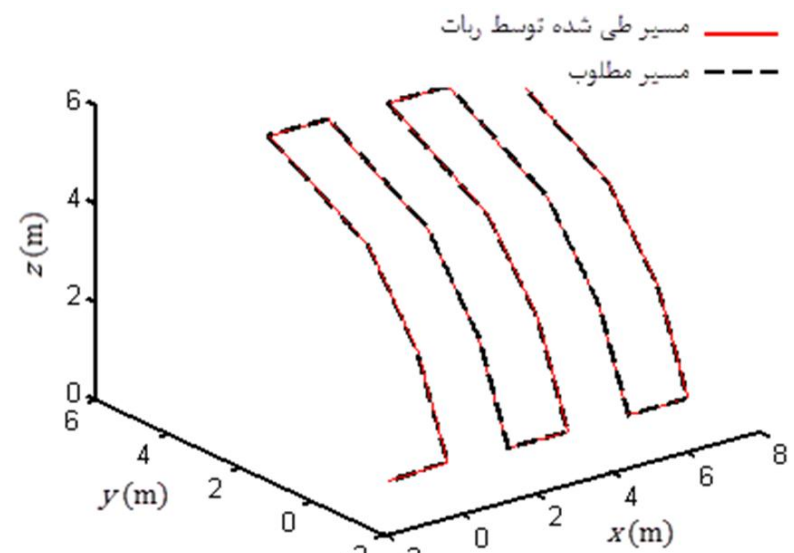
شکل 8 مسیر حرکت ربات با ورودی موج سینوسی در صفحه افقی و عمودی



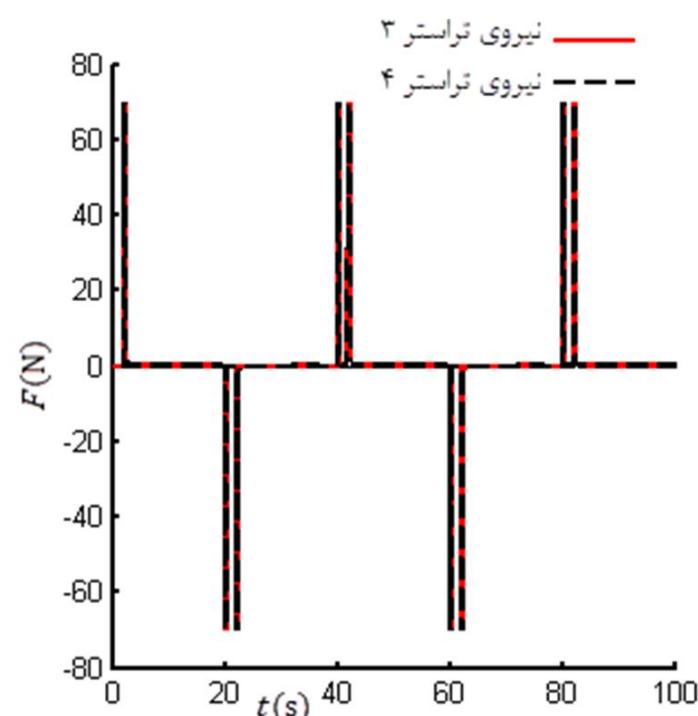
شکل 9 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در جهت‌های y و z



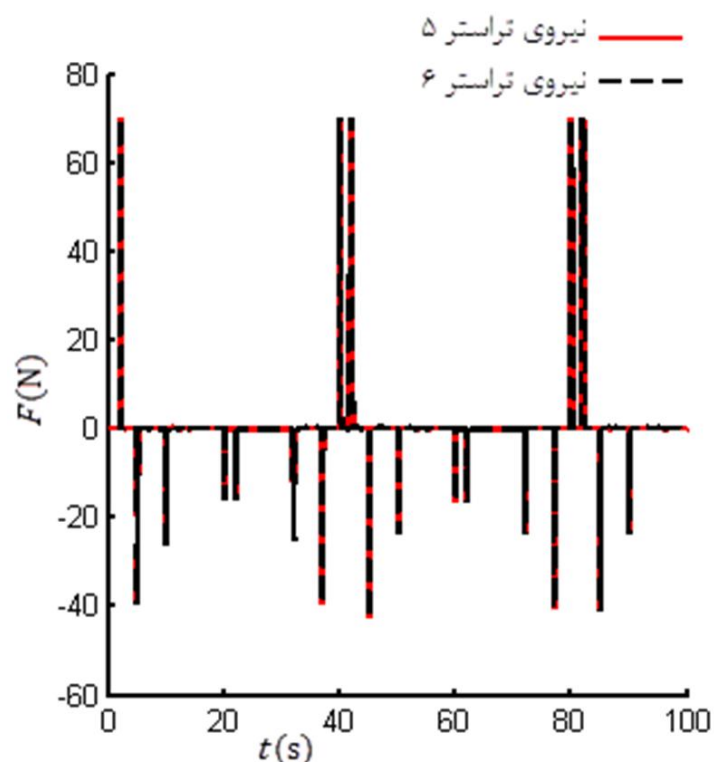
شکل 10 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در جهت‌های y و z



شکل 5 مسیر مطلوب، مشابه با مسیر بازرسی بدنه کشتی با کنترلر اعمال‌شده به مدل خطی



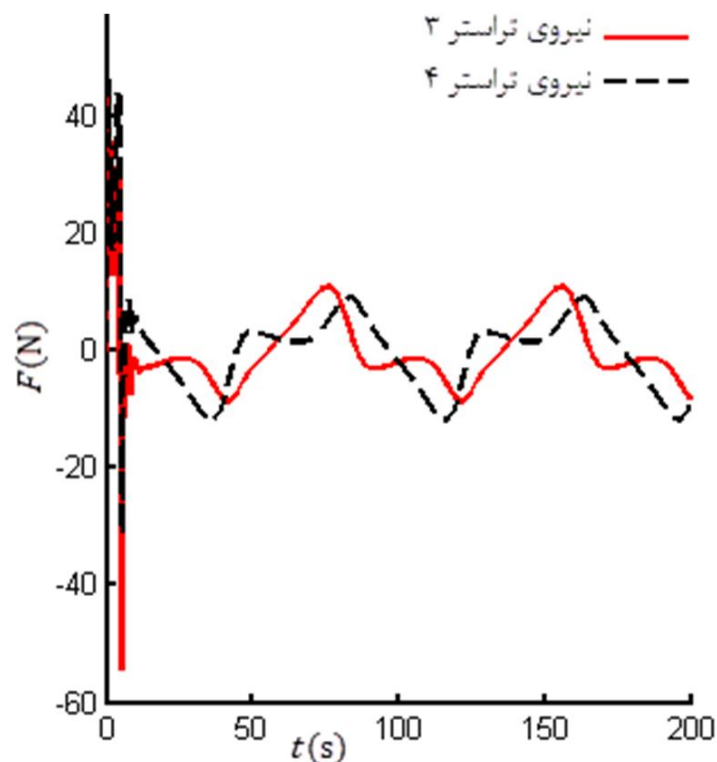
شکل 6 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدنه کشتی، مدل خطی



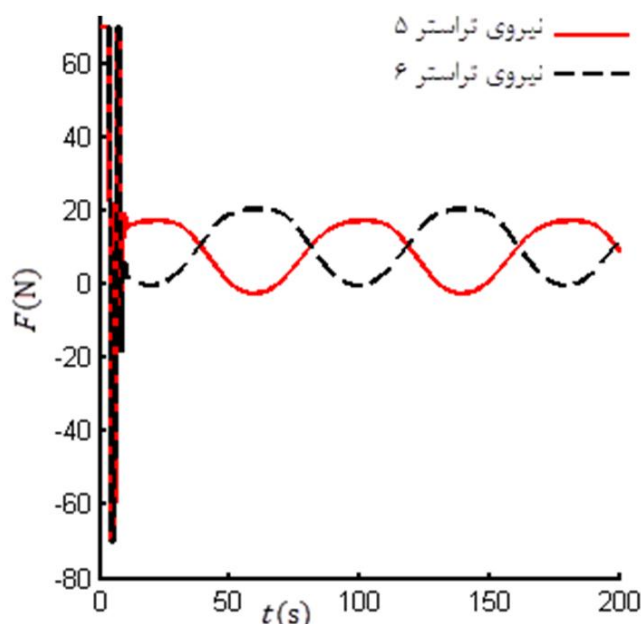
شکل 7 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدنه کشتی، مدل خطی

یک موج سینوسی با دامنه 19m و فرکانس $\frac{1}{200}$ (rev/s) قرار گرفته‌اند. شکل 8 مسیر مطلوب و پاسخ سیستم کنترلی نشان داده شده است. رهگیری مسیر مطلوب نشان دهنده عملکرد مناسب کنترلر در قبال سیستم غیر خطی است. شکل‌های 9، 10 و 11 نیروی تراسترها برای تأمین این مانور را نشان می‌دهد.

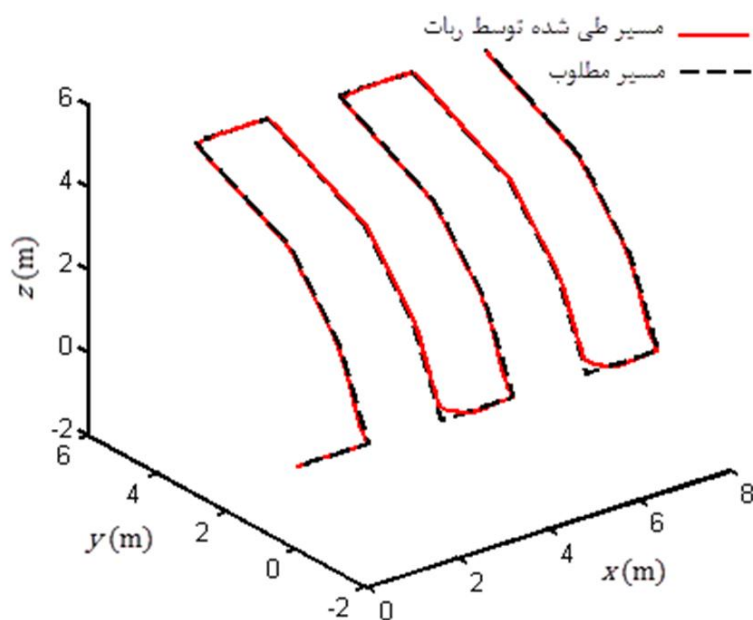
می‌یابد. این شکل مانور برای بازرسی مناسب است، ولی در صورت وجود بازوی مکانیکی روی ربات می‌توان با چرخش ربات همواره بازوی مکانیکی را مقابل بدنه کشتی قرار داد. این مسیر به دلیل آغاز به حرکت و توقف‌های پیاپی، از جمله مانورهای دشوار محسوب می‌شود. در شکل‌های 17-19 نیروی تراسترها برای به‌دست‌آمدن این مانور مشاهده می‌شود. با توجه به شکل 8 مشاهده می‌شود مسیر ورودی و مسیر طی‌شده



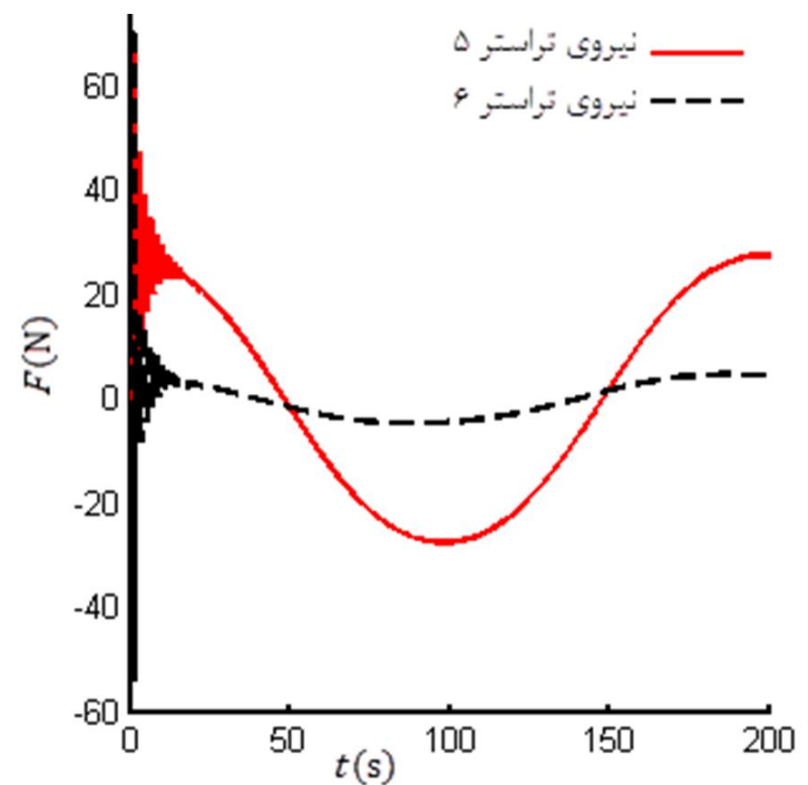
شکل 14 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ



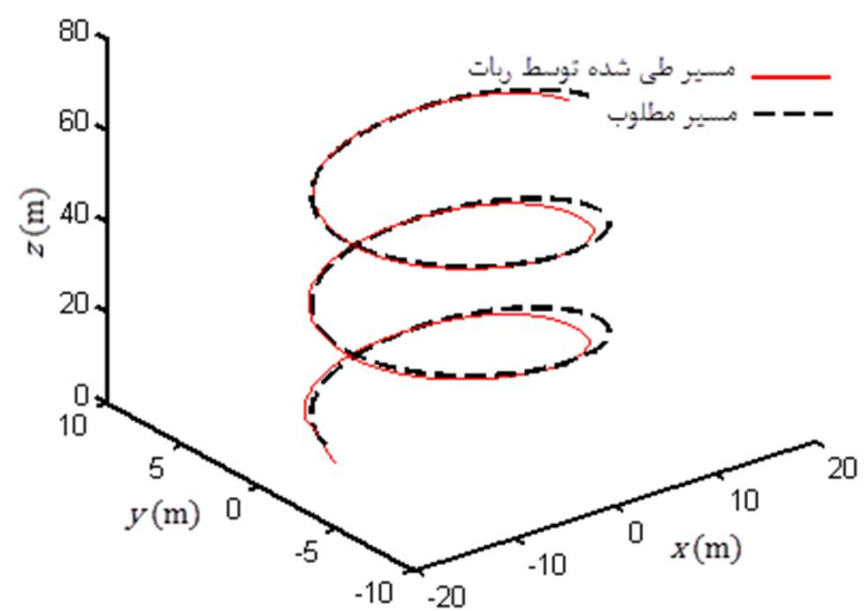
شکل 15 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ



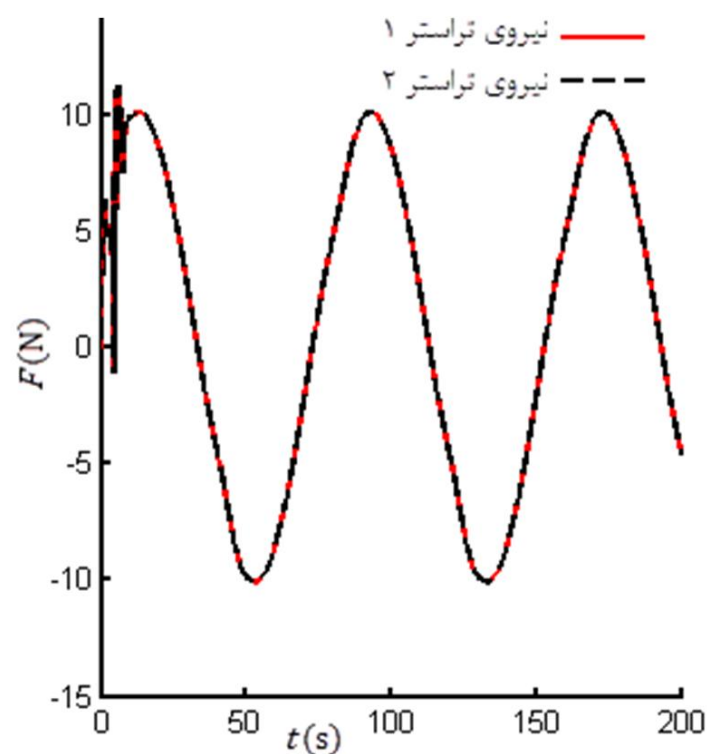
شکل 16 مسیر حرکت ربات با ورودی مسیر بازرسی بدنه کشتی



شکل 17 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در جهت‌های y و z



شکل 18 مسیر حرکت ربات با ورودی مارپیچ



شکل 19 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ

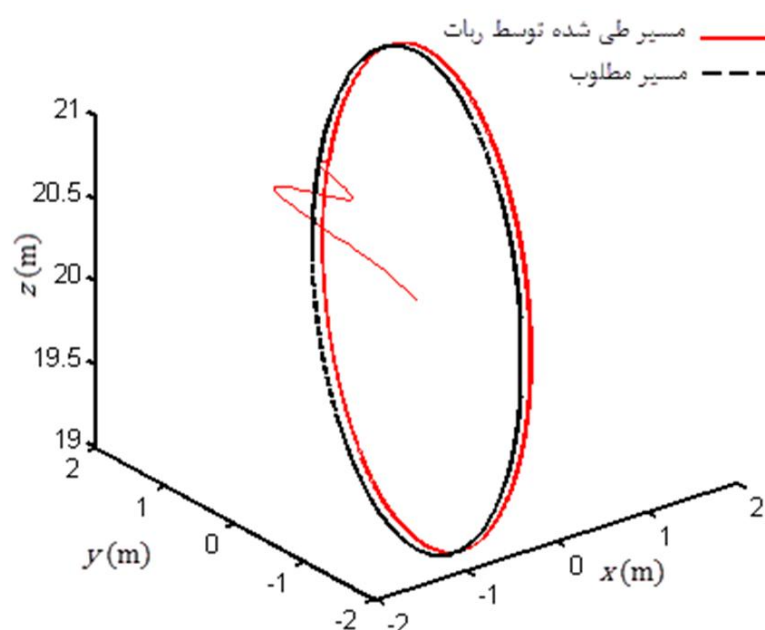
و زوایای پیچ و یا صفر هستند، در شکل 16 نیز که مسیر ورودی به شکل بدنه کشتی انتخاب شده است تغییر جهت مسیر ربات نه با چرخش 90 درجه‌ای ربات به سمت‌های چپ و راست، بلکه با توقف از حرکت رو به جلو و شروع به حرکت جانبی امکان‌پذیر است. با این مانور زمان بسیار کاهش

ولی همچنان کنترلر با دقت مطلوبی قادر به کنترل ربات در مسیر دلخواه بوده است.

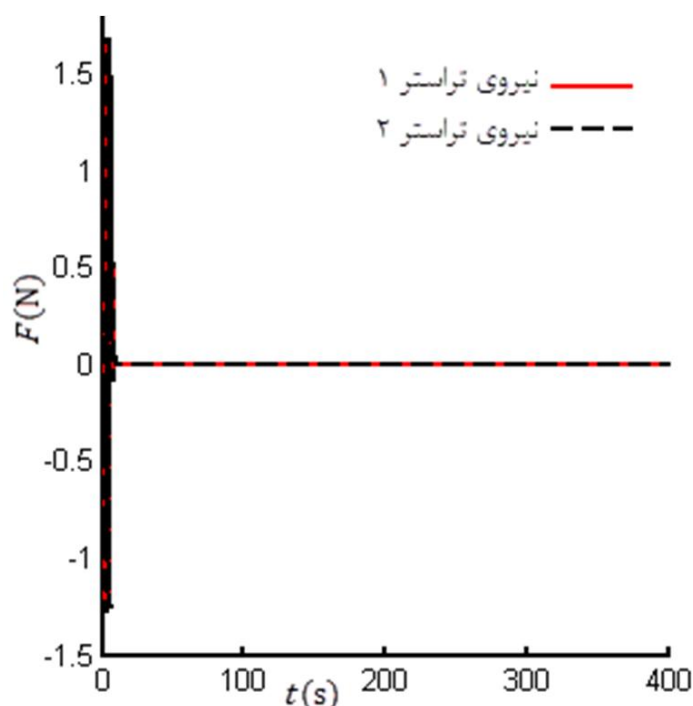
در شکل 20 یک مسیر دایروی به‌عنوان مسیر مطلوب به ربات اعمال شده است که در واقع ترکیب دو موج سینوسی در راستای محورهای y و z است. برای به‌دست‌آوردن این مانور سرعت روبه جلو ربات (سرچ) $u = 0$ تنظیم شد. در نتایج مشاهده می‌شود که ربات در صفحه $y-z$ به خوبی و با دقت بسیار بالایی کنترل شده و خطای در راستای محور x در حدود 10 سانتی‌متر می‌باشد. در شکل‌های 21-23 ورودی‌های کنترلی برای این مانور ارائه شده است.

برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترلر به اغتشاشات خارجی، یک نیروی دلخواه در زمان دلخواه در راستای محور y و یک نیرو در راستای محور z به ربات اعمال شده است. این نیروها به بزرگی 100 نیوتن بوده و در زمان‌های 120 و 130 ثانیه به‌ترتیب در راستاهای z و y هر کدام به مدت 20 ثانیه اعمال شده‌اند و در ثانیه 130 تا 140 هم‌پوشانی دارند (شکل 24).

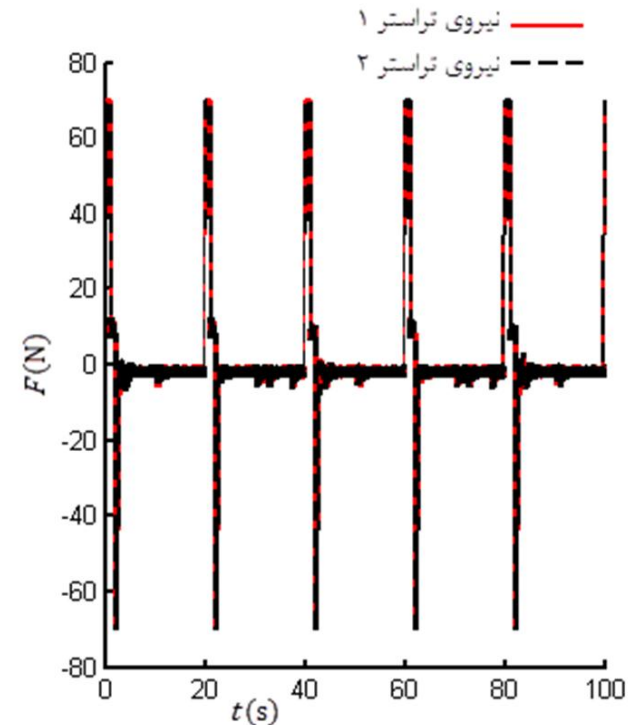
در شکل 25 مسیر طی‌شده توسط ربات با وجود این اغتشاشات مشاهده می‌شود. در شکل‌های 26-28 نیز نیروی تراسترها که توسط کنترلر برای به‌دست‌آوردن این مانور تولیدشده مشاهده می‌شود. نتایج به خوبی نشان می‌دهد در زمان اعمال این نیروهای اغتشاشی به ربات، تراسترها با عکس‌العمل متقابل با این نیروها مانع از منحرف شدن ربات از مسیر خود شده‌اند.



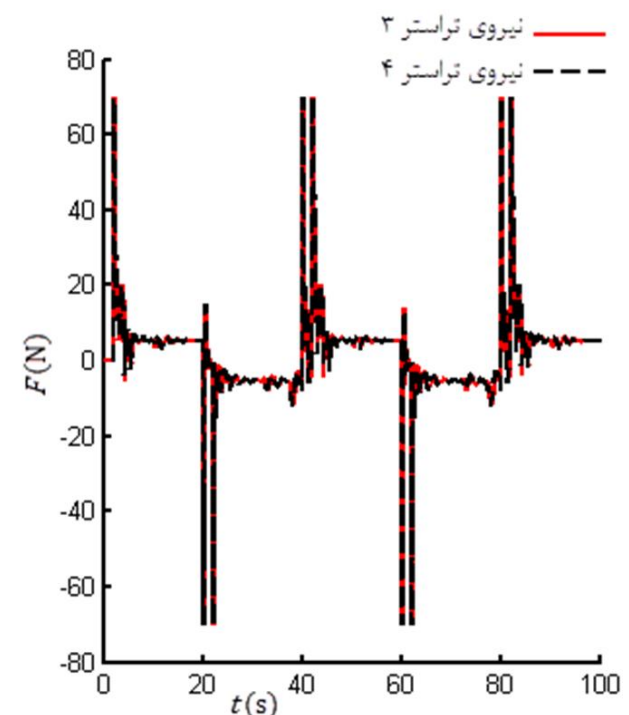
شکل 20 مسیر حرکت ربات با ورودی مطلوب دایره



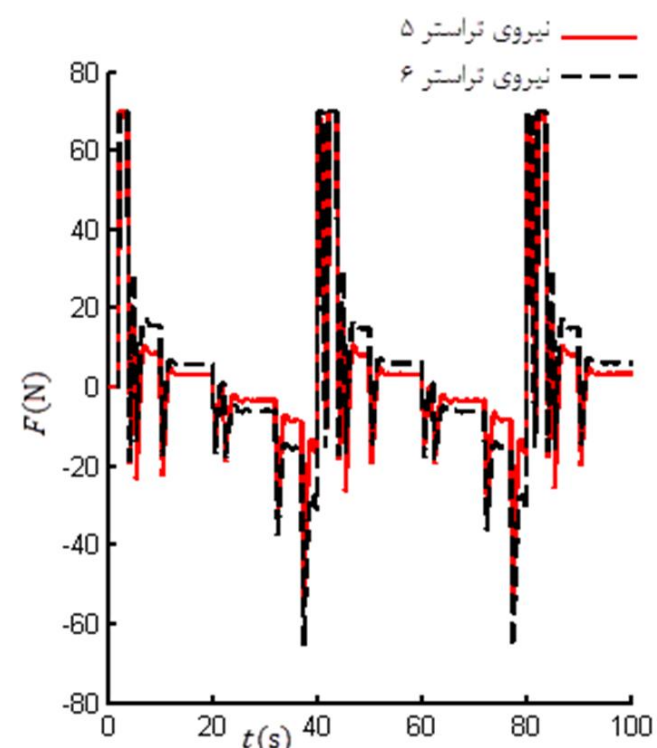
شکل 21 ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره



شکل 17 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدنه کشتی، مدل غیرخطی



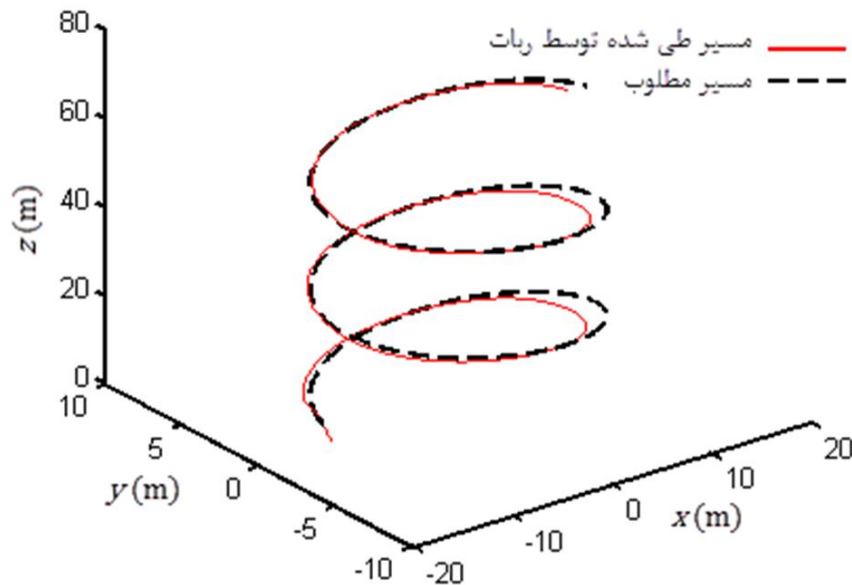
شکل 18 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدنه کشتی، مدل غیرخطی



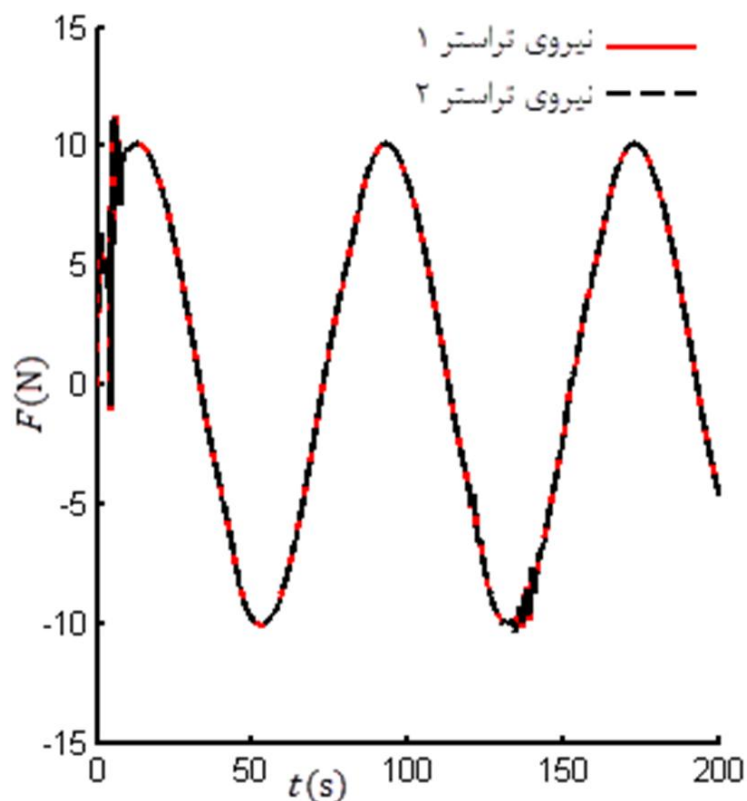
شکل 19 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدنه کشتی، مدل غیرخطی

توسط ربات تقریباً برهم منطبق هستند و اختلافی در حدود 0/02 متر با هم دارند، در باقی مسیرها به دلیل پیچیدگی مسیر اختلاف کمی بیشتر است،

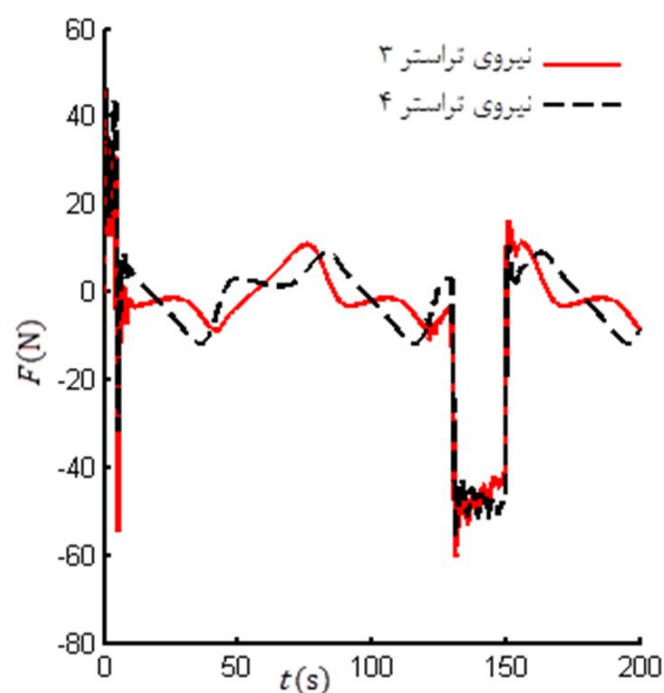
مقاوم بودن کنترلر مورد آزمایش قرار گرفته است. مسیر مطلوب مشابه شکل 8، برای بررسی عملکرد کنترلر به سیستم اعمال شد. شکل 29، نشان می‌دهد در شرایط وجود این کمبود قطعیت پارامتری شدید، پاسخ سیستم کنترلی تا حد مناسبی، مسیر مطلوب را دنبال کرده است. ورودی‌های کنترلی نیز در شکل‌های 30-32 مشاهده می‌شوند.



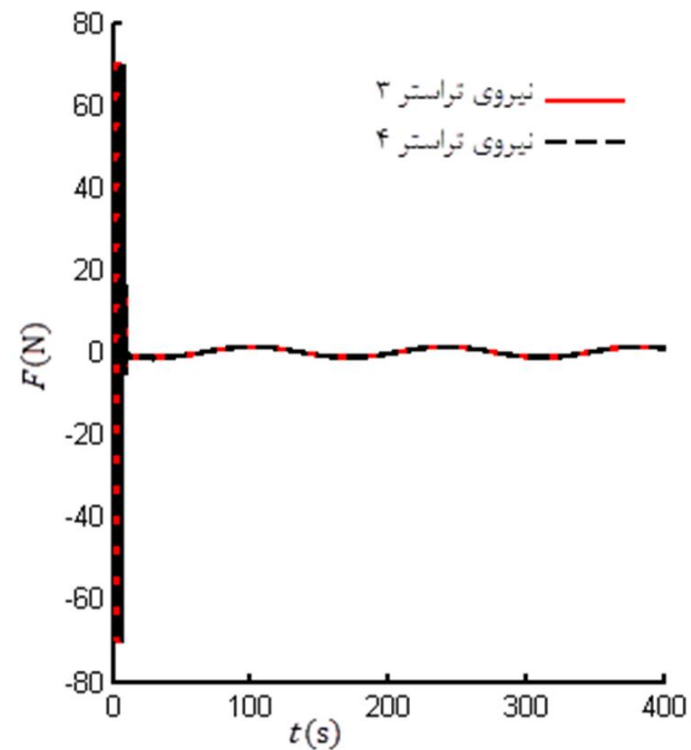
شکل 25 مسیر طی شده توسط ربات با وجود نیروهای اغتشاشی



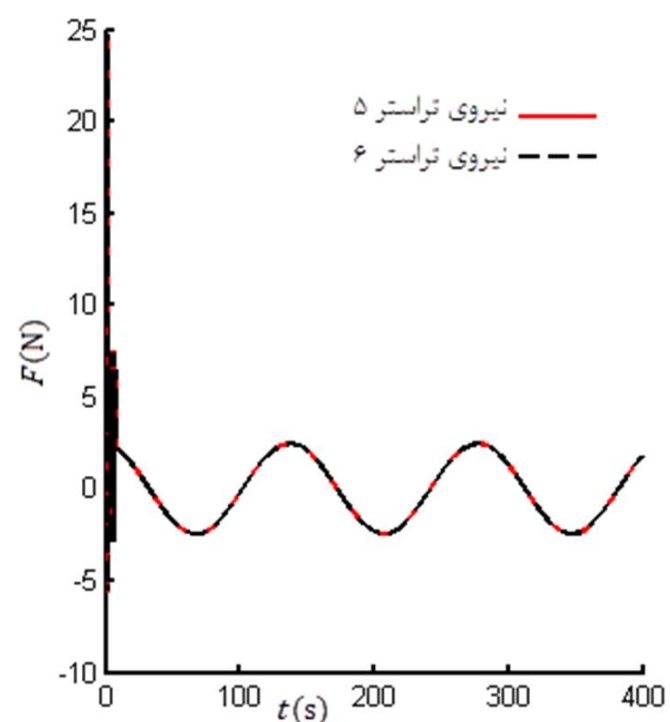
شکل 26 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



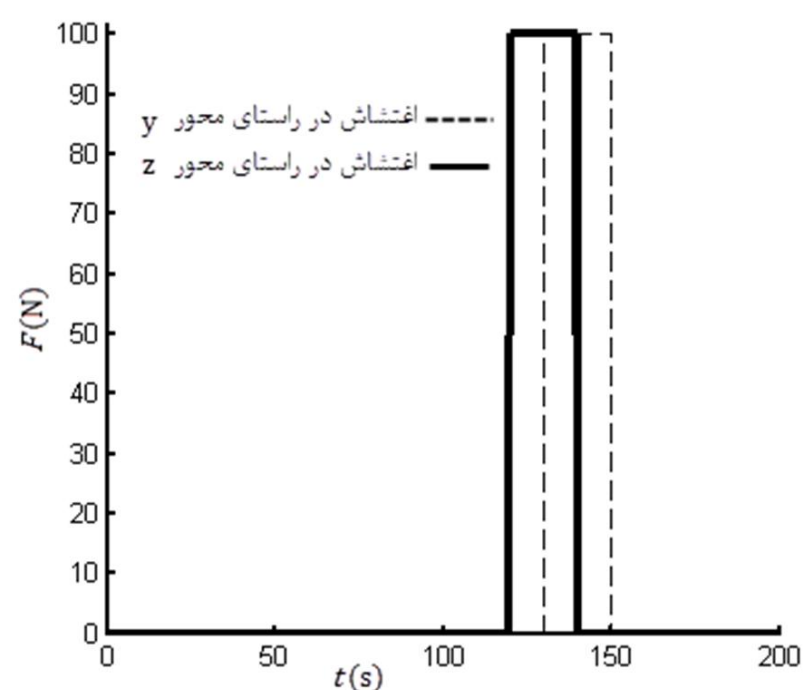
شکل 27 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



شکل 22 ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره

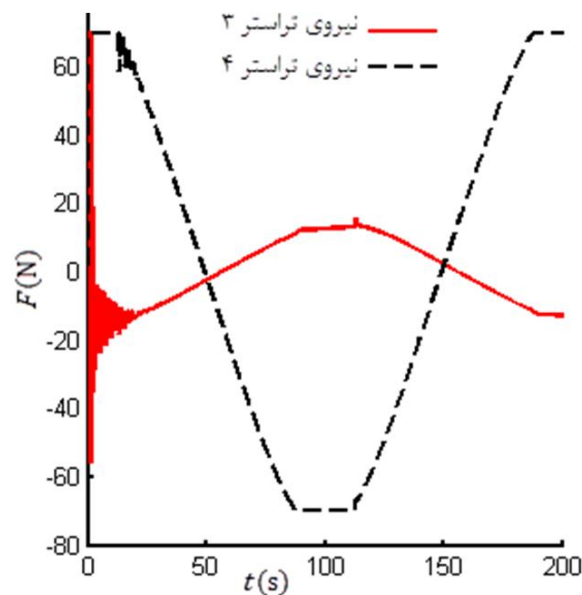


شکل 23 ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره

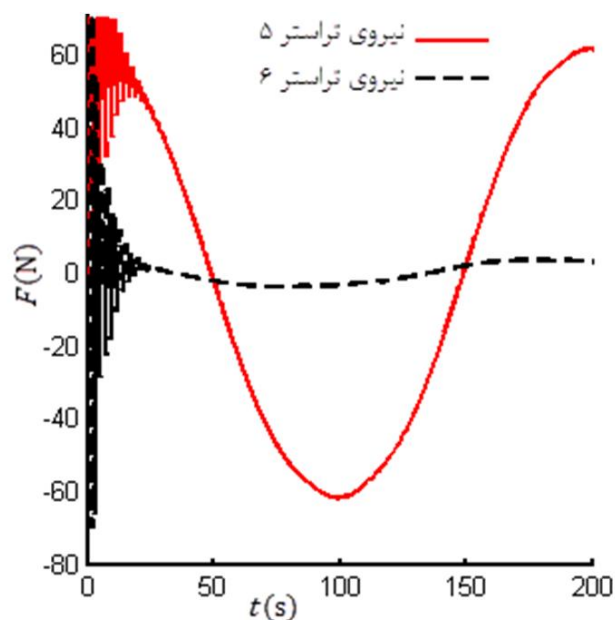


شکل 24 نیروهای اغتشاشی وارد شده به ربات

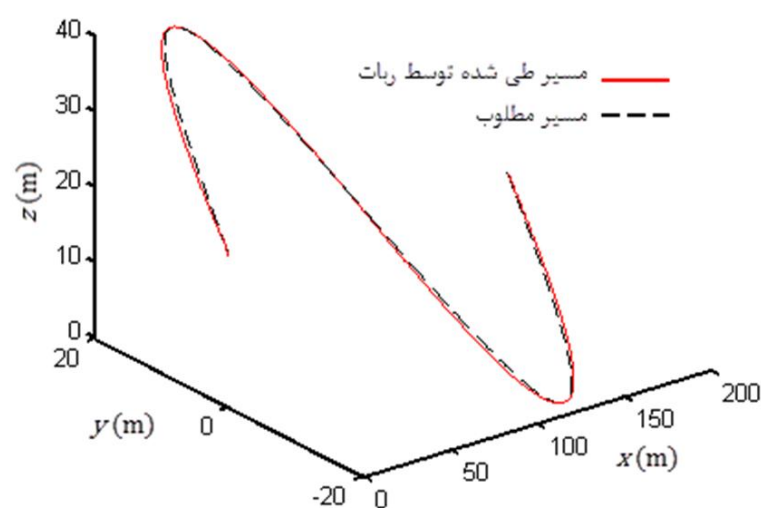
می‌توان انتظار داشت که ضرایب هیدرودینامیک به‌دست‌آمده از شرایط آزمایشگاهی در بدترین حالت تا 3 برابر با مقادیر واقعی مغایرت داشته باشد؛ بنابراین با افزایش ضرایب هیدرودینامیک در مدل غیرخطی تا 300 درصد،



شکل 31 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی با وجود کمبود قطعیت ضرایب

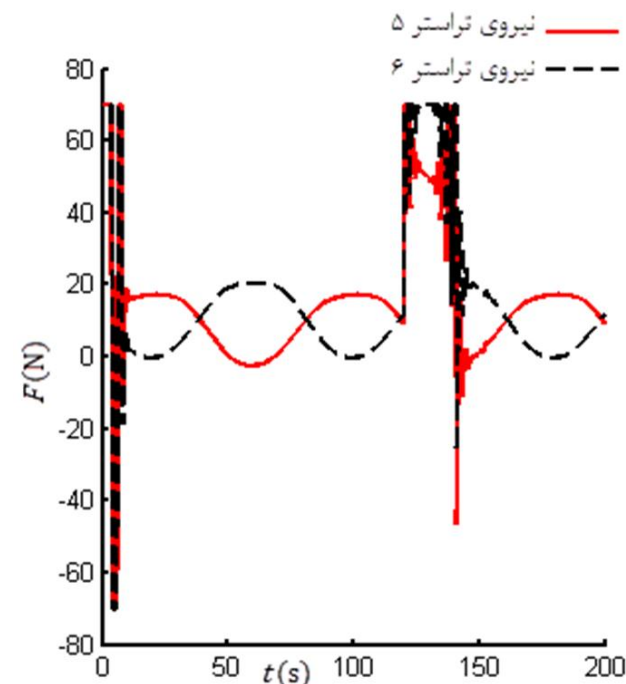


شکل 32 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در با وجود عدم قطعیت ضرایب

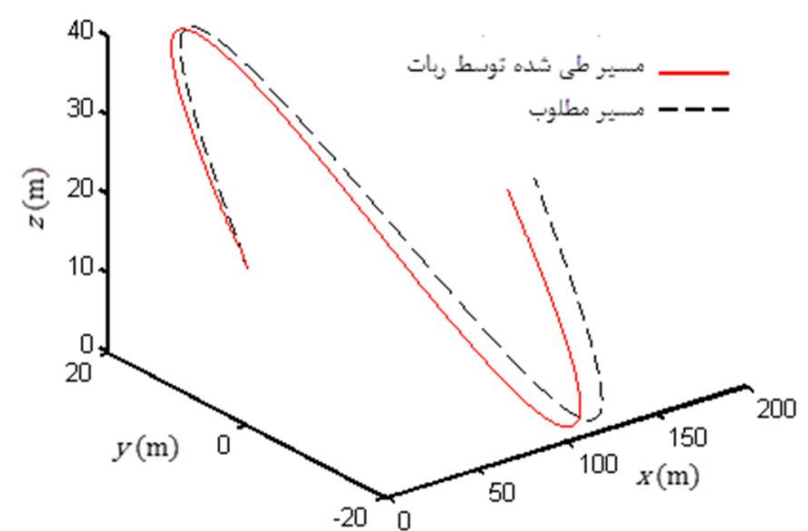


شکل 33 مسیر طی شده با وجود کمبود قطعیت در ضرایب هیدرودینامیک و افزایش سرعت سرج

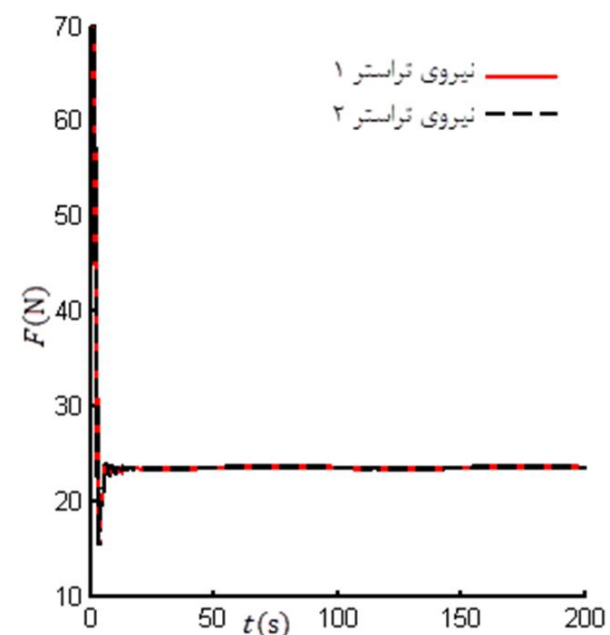
منظور بازرسی بخش آب‌خور کشتی‌ها ارائه شد. برای کارایی مطلوب و کامل این ربات، کنترل دقیق آن به کمک کنترلر فیدبک حالت انجام گرفت. با توجه به طراحی کنترلر فیدبک حالت براساس مدل خطی‌سازی شده و برای تأیید عملکرد کنترلر برای سیستم واقعی، پاسخ سیستم در چند مانور پیچیده برای سیستم غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت و مطلوب بودن عملکرد کنترلر مشاهده شد. برای بررسی مقاوم بودن کنترلر، به سیستم اغتشاش و فقدان قطعیت ضرایب هیدرودینامیکی اعمال و نشان داده شد، کنترلر همچنان وظیفه خود را تا حد بسیار مطلوبی انجام داده است. با توجه به توانمندی و مانورپذیری بالای ربات ارائه شده، این ربات می‌تواند در مأموریت‌های متنوع زیر سطح به کار گرفته شود.



شکل 28 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



شکل 29 مسیر طی شده توسط ربات با وجود کمبود قطعیت در ضرایب هیدرودینامیک



شکل 30 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در با وجود کمبود قطعیت ضرایب

با توجه به شکل 29 مشاهده می‌شود ربات کمی از مسیر در جهت محور x عقب‌افتاده و می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر PID به اندازه کنترلر فیدبک حالت به کمبود قطعیت ضرایب هیدرودینامیک مقاوم نبوده است. با توجه به این که کنترلر PID تنها برای کنترل سرعت رو به جلو استفاده شده است، این نقص را می‌توان با تنظیم دوباره سرعت سرج مطابق با شکل 33 برطرف کرد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله ربات هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ و مانور بالا به

6- مراجع

- Balanzar, R. Hernández-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma, Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 11, pp. 1, 2014.
- [20] M. Ghanavati, A. Ghanbarzadeh, Control and Guidance of an Underwater Robot via Fuzzy Control Method, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-32, 2011.
- [21] H. F. Moraes, R. M. Sales, H. Cumming, W. M. Silva, A comparative study of some control systems for a submersible, in *Proceeding of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, IEEE, Cambridge, MA, USA pp. 242-246, 1994.
- [22] A. Nag, S. S. Patel, S. Akbar, Fuzzy logic based depth control of an autonomous underwater vehicle, in *Proceeding of Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing*, IEEE, Kottayam, India, pp. 117-123, 2013.
- [23] W. Naeem, R. Sutton, J. Chudley, System identification, modelling and control of an autonomous underwater vehicle, in *Proceeding of MMCMC conference*, Girona, Spain, 2003.
- [24] D. R. Yoerger, J.-J. Slotine, Robust trajectory control of underwater vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 462-470, 1985.
- [25] A. J. Healey, D. Lienard, Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
- [26] M. R. Arshad, M. Y. Radzak, Design and development of an autonomous underwater vehicle test-bed (USM-AUV I), in *Proceeding of MUCEET2009 Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, IEEE, Kuantan, Pahang, Malaysia, pp. 257-260, 1993.
- [27] C. Yang, *Modular modeling and control for autonomous underwater vehicle (AUV)*, Thesis of Master of Engineering Department of Mechanical Engineering National University of Singapore, 2008.
- [28] A. Balasuriya, T. Ura, Underwater cable following by twin-burger 2, in *Proceeding of Robotics and Automation*, IEEE, pp. 920-92, 5, 2001.
- [29] C. Silpa-Anan, S. Abdallah, D. Wettergreen, Development of autonomous underwater vehicle towards visual servo control, in *Proceeding of the Australian Conference on Robotics and Automation. Melbourne, Australia*, 105-110, 2000.
- [30] M. Gertler, G. R. Hagen, *Standard equations of motion for submarine simulation*, DTIC Document, pp. 1967.
- [31] C. L. Logan, A comparison between H-infinity/ μ -synthesis control and sliding-mode control for robust control of a small autonomous underwater vehicle, in *Proceeding of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, IEEE, pp. 399-416, 1994.
- [32] X. Liang, J. Zhang, Y. Qin, H. Yang, Dynamic Modeling and Computer Simulation for Autonomous Underwater Vehicles with Fins, *Journal of Computers*, Vol. 8, No. 4, pp. 1058-1064, 2013.
- [33] Y. Eng, M. Lau, C. Chin, Added mass computation for control of an open-frame remotely-operated vehicle: Application using WAMIT and MATLAB, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-14, 2013.
- [34] C. Chin, M. Lau, Modeling and testing of hydrodynamic damping model for a complex-shaped remotely-operated vehicle for control, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, No. 2, pp. 150-163, 2012.
- [35] R. McEwen, K. Streitlien, Modeling and control of a variable-length auv, *12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH, USA *Proc 12th UUST*, 2001.
- [36] M. Radzak, M. Arshad, AUV Controller Design And Analysis Using Full-State Feedback, *WSEAS Transactions on Systems*, pp 1083-1086, 2005.
- [1] S. Negahdaripour, P. Firoozfam, An ROV stereovision system for ship-hull inspection, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 551-564, 2006.
- [2] F. Hover, J. Vaganay, M. Elkins, S. Willcox, V. Polidoro, J. Morash, R. Damus, S. Desset, A vehicle system for autonomous relative survey of in-water ships, *Marine Technology Society Journal*, Vol. 41, No. 2, pp. 44-55, 2007.
- [3] F. Shamshiri Amirkolai, R. Hasanzadeh Ghasemi, designing a discrete controller for an Autonomous Underwater Vehicle under sensing malfunction, in *The 16th Marine Industries Conference*, Bandar Abbas, 2014. (In Persian)
- [4] F. Shamshiri Amirkolai, R. Hasanzadeh Ghasemi, Designing a Trajectory controller in State Space for a Hovering type Autonomous Underwater Vehicle, in *6th international offshore industries conference*, Tehran, 2015. (In persian)
- [5] S. E. Harris, E. V. Slate, Lamp ray: ship hull assessment for value, safety and readiness, in *Proceeding of OCEANS MTS/IEEE*, Seattle, WA, USA, pp. 493-500, 1999.
- [6] S. Desset, R. Damus, F. Hover, J. Morash, V. Polidoro, Closer to deep underwater science with Odyssey class hovering autonomous underwater vehicle (HAUV), in *Proceeding of OCEANS/IEEE*, pp. 758-762, 2005.
- [7] J. Vaganay, M. Elkins, S. Willcox, F. Hover, R. Damus, S. Desset, J. Morash, V. Polidoro, Ship hull inspection by hull-relative navigation and control, in *Proceeding of OCEANS MTS/IEEE*, pp. 761-766, 2005.
- [8] J. Vaganay, M. Elkins, D. Esposito, W. O'Halloran, F. Hover, M. Kokko, Ship hull inspection with the HAUV: US Navy and NATO demonstrations results, in *Proceeding of OCEANS*, IEEE, Boston, MA, USA, pp. 1-6, 2006.
- [9] F. S. Hover, *Maneuvering Performance of Autonomous Underwater Vehicles*, DTIC Document, pp. 2006.
- [10] B. Englot, F. Hover, Inspection planning for sensor coverage of 3D marine structures, *Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, pp. 4412-4417, 2010.
- [11] G. A. Hollinger, B. Englot, F. Hover, U. Mitra, G. S. Sukhatme, *Robotics and Automation (ICRA)* Uncertainty-driven view planning for underwater inspection, pp. 4884-4891, 2012.
- [12] G. A. Hollinger, B. Englot, F. S. Hover, U. Mitra, G. S. Sukhatme, Active planning for underwater inspection and the benefit of adaptivity, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 3-18, 2012.
- [13] J. Yuh, Design and control of autonomous underwater robots: A survey, *Autonomous Robots*, Vol. 8, No. 1, pp. 7-24, 2000.
- [14] P. J. Craven, R. Sutton, R. S. Burns, Control strategies for unmanned underwater vehicles, *Journal of Navigation*, Vol. 51, No. 01, pp. 79-105, 1998.
- [15] T. T. J. Prestero, *Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle*, Thesis, Massachusetts institute of technology, 2001.
- [16] J. Pyo, H.-G. Joe, J.-H. Kim, A. Elibol, S.-C. Yu, Development of Hovering-Type AUV "Cyclops" for Precision Observation, in *Proceeding of OCEANS MTS/IEEE*, San Diego, pp 1-5, 2013.
- [17] H. T. Choi, A. Hanai, S. K. Choi, J. Yuh, Development of an underwater robot, ODIN-III, in *Proceeding of Intelligent Robots and Systems*, IEEE/RSJ, pp. 836-841, 2003.
- [18] L. A. Cooney, *Dynamic response and maneuvering strategies of a hybrid autonomous underwater vehicle in hovering*, DTIC Document, pp. 2009.
- [19] L. G. Garcia-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-