



ارائه یک ربات خودکار زیرسطحی و طراحی کنترلر مسیر آن به منظور بازرسی بدن کشتی ها

فریار شمشیری امیرکلایی^۱، رضا حسن‌زاده قاسمی^{۲*}

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

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

* سبزوار، صندوق پستی ۳۹۷ r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۳ تیر ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۳ مرداد ۱۳۹۴
ارائه در سایت: ۳۱ مرداد ۱۳۹۴

کلید واژگان:
ربات هوشمند زیرسطحی
بازرسی بدن کشتی

چکیده
در این مقاله یک ربات هوشمند زیرسطحی برای بازرسی قسمت آبخور بدن کشتی‌ها ارائه شده است. انجام این گونه عملیات تنها با استفاده از رباتی که دارای قابلیت مانور بالا، قابلیت هاورینگ و کنترل پذیری بالا باشد به درستی امکان پذیر 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 ترااسترها با توجه به کاربرد مورد نظر شده است تا بهترین ترکیب، از نظر مصرف انرژی و پیچیدگی کنترلر به دست آید و مانور پذیری مطلوب ربات برای بازرسی تأمین شده. از ۶ درجه آزادی فقط حرکت در جهت زاویه رول محدود شده است. کنترلر پیشنهادی در این مقاله روی مدل دینامیکی خطی‌سازی شده است. کنترلر فیدبک حالت از یک PID برای کنترل مسیر در صفحه عمودی، دیگری برای کنترل مسیر در صفحه افقی که هر دو کنترلر فیدبک حالت است و از یک کنترلر 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.

عمیقی از جمله نحوه بهره‌برداری بهینه، مهار قدرت بی‌پایان دریا و کنترل عبور و مرور همراه بوده است. تعمیر و نگهداری سدها، سکوهای 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

۱- مقدمه

۱-۱- ایده‌پردازی

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 بدست آوردن اطلاعات دقیق نیاز است. قابلیت مانور بالا و حرکت در فاصله هرچه نزدیک‌تر ربات اطراف سازه‌های زیر سطحی نیز بسیار پرکاربرد است. بازرسی این 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 از درگون ربات‌هایی با خصوصیات منحصر به فرد مانند میزان مصرف انرژی پایین، نیروی درگ پایین و سرعت مناسب به این اهداف نزدیک شود. برای مأموریت‌هایی مانند نقشه‌برداری از کف اقیانوس‌ها، 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 بدن کشته تقریباً غیرممکن است، استفاده از ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور^۱ 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 به عنوان رابط بین اپراتور و ربات هر کدام مشکلات خاص خود را دارد. ربات‌های هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ^۲ یک ایده تازه در صنعت ربات‌های زیرسطحی است که از ادغام قابلیت مانوردهی بالای ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور^۳ و انعطاف‌پذیری ربات‌های هوشمند زیرسطحی از درگون^۴ به وجود آمده که دارای قابلیت انجام مأموریت‌های با حجم اطلاعات بالا و دقیق در ارتباط با سازه‌های دریایی است [۳,4].

2-1- پیشگامان در زمینه بازرسی بدن کشته‌ها

پیش از این برخی از شناورهای نظامی برای بازرسی در موقعیت‌های خاص، از ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور جهت بازرسی بدن کشته‌ها 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 بازرس تجاری با نام لمپری^۵ در سال ۱۹۹۹ توسط هریس و اسلیت معرفی شد [۵]. این ربات زیرسطحی کنترل از راه دور کوچک با حرکتی شبیه به خزیدن بر سطح خارجی بدن کشته اقدام به بازرسی کشته می‌کرد، این ربات توسط اپراتور کنترل شده و خود را به قسمت مورد نظر بدن کشته می‌رساند و سپس با استفاده از تراسترهایی که در قسمت جلویی ربات قرار دارد با مکش آب، خود را به بدن کشته می‌چسباند. در ادامه اپراتور باید ربات را روی چرخهایی که با بدن کشته 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.

ستوس^۶ یک ربات هوشمند زیرسطحی است که قادر به گشتزنی آزادانه زیر سطح است که برای بررسی بدن کشته‌ها توسط تریمبلر و بلچر در سال ۲۰۰۲ معرفی شده است. این ربات با استفاده از فاصله‌سنج به حفظ فاصله نسبی از بدن کشته می‌پردازد [۶]. اودیسه^۷ نمونه‌ای دیگر از ربات‌های هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ است که توسط دیست و همکاران از

دست چالش‌های است [۱]. آسیب دیدن بخش آبخور کشته‌ها در صورت عدم رسیدگی مناسب خطرات مالی و جانی جبران ناپذیری به دنبال خواهد داشت، بهویژه هنگام وقوع حادثه یا فعالیت‌های مخرب علیه کشته‌های نظامی و بازرسانی خارج از مرزهای آبی، مشکلات را دوچندان می‌کند. روش متداول برای عیوب‌یابی و تعمیر این گونه نقص‌ها استفاده از غواص‌های است، 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 کشته‌ها مساله‌ای است که روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد، در ادامه برخی از دلایل این امر مهم را بیان خواهیم کرد:

۱. ابعاد بسیار بزرگ کشته‌ها و ناوها: سطح خارجی این شناورها در

حدود صدها مترمربع است که در بندرگاه‌هایی با وسعت هزاران مترمربع پهلو می‌گیرند این در حالی است که ابعاد یک مین آبی در حدود ۲۰ سانتی‌متر است، این اختلاف زیاد در ابعاد از جمله نخستین چالش‌هایی است که سبب نیاز به بازرسی‌های مکرر می‌شود.

۲. اهداف کوچک: هنگامی که سطح خارجی شناور مشکوک به

عیوب ساختاری باشد، بازرسی هر سانتی‌متر با اهمیت است که با توجه به ابعاد کشته‌ها و دید کم در زیر آب به انجام رساندن درست و دقیق این عملیات کار آسانی نخواهد بود.

۳. 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 کشته [۲].

یک روش متداول برای بازرسی بدن کشته‌ها استفاده چندین غواص است که زیر بدن کشته در یک خط مستقیم کنار هم شنا می‌کنند. این چیدمان و روش منحصر به فرد برای اطمینان ۱۰۰ درصد از بازرسی کل بدن کشته در شرایط محیطی دشوار به وجود آمده است. این عملیات زمان بر 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.

خوب‌بختانه 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 به کارگیری یک سیستم عیوب‌یابی و تعمیر کارآمد با استفاده از ربات‌ها، ویژگی‌های زیر مورد نظر است.

۱. سطح مورد نظر باید با اطمینان ۱۰۰ درصد بازرسی شود.

۲. عکس‌های تهیه شده از بدن کشته توسط ربات باید به اندازه کافی با کیفیت بوده تا بتوان اهداف موردنظر را نسبت به بیرون‌زدگی‌ها و ویژگی‌های ساختاری فلز و رسوب دریایی تشخیص داد.

۳. 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.

۴. به کارگیری 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.

۵. 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

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 قنواتی [20]، موراس و سیلس [21] انیربان و سورنдра [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 اختشاشات فراوان همراه است [3,18]. کنترل 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. کنترل مود لغزشی برای مرتفع کردن مشکل فقدان قطعیت در یک بازه معلوم برای ضرایب معادله دینامیکی سیستم استفاده می‌شود [18.27]. کنترلرها ویژوال‌سروو 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 کنترلرها بر پایه بینایی، جز در موارد خاص چندان کاربردی نیست. در عمل، پیاده‌سازی کنترلرهای هوشمند و کنترلرها مقاوم مانند کنترلر مود لغزشی دارای پیچیدگی‌های سخت‌افزاری بوده و گاهی لختی عملگرها و دینامیک سیستم مشکلاتی را در اجرا ایجاد می‌کند. استفاده از کنترل 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 تندری 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: در ک دقيقی 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 به دست 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 عیوب‌یابی 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 رفت، 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 رباتیکس²» و دانشگاه تکنولوژی ماساچوست برای بازرسی بدن کشته 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 بدن شناورها برای مأموریت‌های ضد تروریسم و عملیات حفاظتی بوده است [2,7,8]. کنترل استفاده شده در این ربات مانند بیشتر ربات‌های مشابه PID است [9].

نگهداری‌پور و فیروزفام در سال 2005 فعالیت‌هایی در راستای بهبود سیستم تصویربرداری یک ربات زیرسطحی کنترل از راه دور جهت بازرسی بدن کشته 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 بدن کشته و تصویربرداری داشته باشند. انگلوت و هاور در سال 2010 بر مسئله 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.

3-1- مرواری 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. کنترلرها PID برای سیستم‌های تک‌وروپی تک‌خروجی مناسب است [18]. کنترلرهای هوشمند مانند کنترلرها 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

1- MIT

2- Bluefin Robotics

3- Office of Naval Research (ONR)

4- Path planning

جدول ۱ نام‌گذاری متغیرها				
نیرو/گشتاور	تغییر مکان/زوایای زاویه‌ای	سرعت خطی/اولر	درجه آزادی	
X	U	X	سرج	
Y	V	y	اسوی	
Z	W	Z	هیو	
K	p	φ	رول	
M	q	θ	پیچ	
N	r	ψ	یاو	

فاصله بین نیروهای بیانسی 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 ۲). در این شکل محل قرارگیری تراسترهای روی ربات قابل نمایش است. برای پیاده‌سازی کنترلر از خصوصیات فیزیکی و ماتریس جرم افروده به دست‌آمده توسط انگ و همکاران [33] و ضرایب هیدرودینامیک به دست‌آمده توسط چین و لو [34] برای ربات RRC استفاده شده است.

برای مدل‌سازی دینامیکی شناور زیرسطحی ارائه شده، مختصات جهانی و مختصات بدنه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. پارامترها و متغیرهای استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

بردار نیروی تراسترهای به صورت 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, \dots, D_6 به ترتیب فاصله عمودی تراسترهای F_1, F_2, \dots, F_6 از مرکز بیانسی ربات است که مبدا دستگاه مختصات بدنه نیز است. این مقادیر در رابطه (2) آورده شده است.

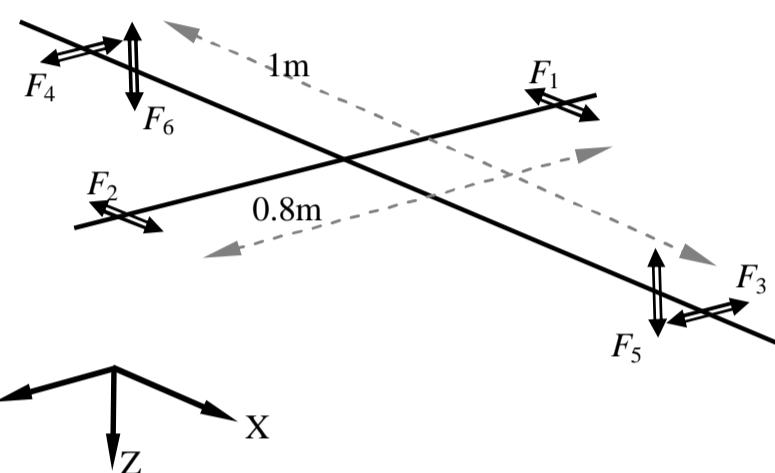
$$\begin{aligned} D_1 &= -0.4m & D_2 &= 0.4m & D_3 &= 0.5m \\ D_4 &= -0.5m & D_5 &= 0.5m & D_6 &= -0.5m \end{aligned} \quad (2)$$

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 اسوی^۱ و یاو^۲ که برای کنترل در صفحه افقی به کار برده می‌شود، مطابق معادله (3) خواهد بود.

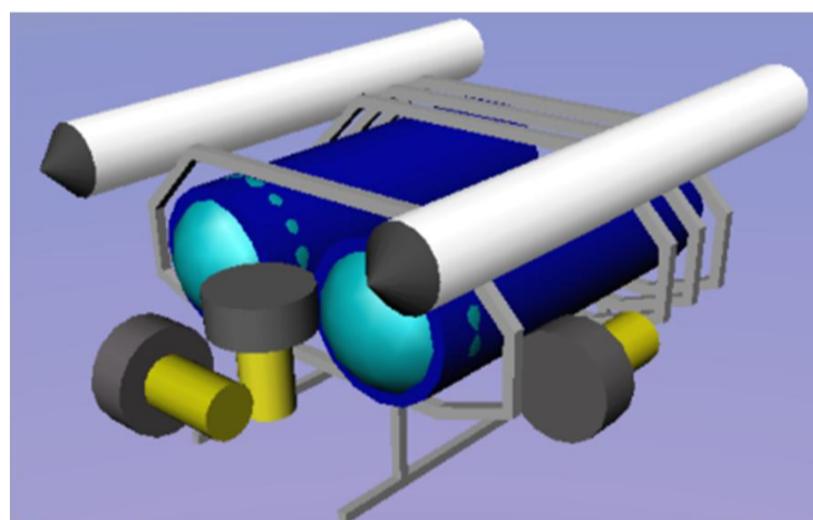
$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

زیرسطحی مانند پیدا کردن نشته‌ها و ترک در این لوله‌ها ساخته شد. وزن خشک این ربات ۱۱۵ کیلوگرم است. این ربات ۶ درجه آزادی با ۴ تراستر است [33].

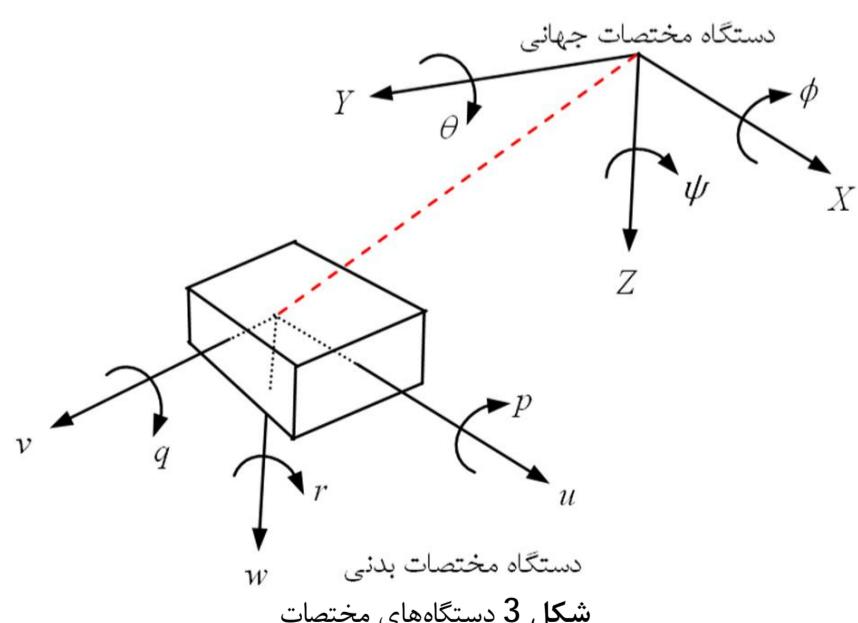
در این مقاله برای دستیابی به ربات زیرسطحی برای بازرسی سازه‌های زیر آب و عملیات دقیق در مواجهه با محیط پیرامون ربات، تغییرات دینامیکی از جمله استفاده از شش تراستر، تغییر موقعیت و جهت قرارگیری تراسترهای (شکل ۱) و مقید کردن درجه آزادی رول، اعمال شده است. با تنظیم فاصله بین مرکز جرم و مرکز بیانسی می‌توان پایداری استاتیکی کافی در جهت‌های رول و پیچ ایجاد کرد. در ربات ارائه شده در این مقاله فاصله مرکز جرم تا مرکز بیانسی ۰/۱ متر است، در نتیجه با وجود این



شکل ۱ محل قرارگیری تراسترهای



شکل ۲ تصویر ربات در نرم‌افزار V-Realm



شکل ۳ دستگاه‌های مختصات

1- Sway
2- Yaw

نیروی تراسترهاست را تولید کرده و به سیستم وارد می‌کند. بدینه است که ماکزیمم نیروی قابل دریافت از تراسترهای 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 افروده⁴، 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.

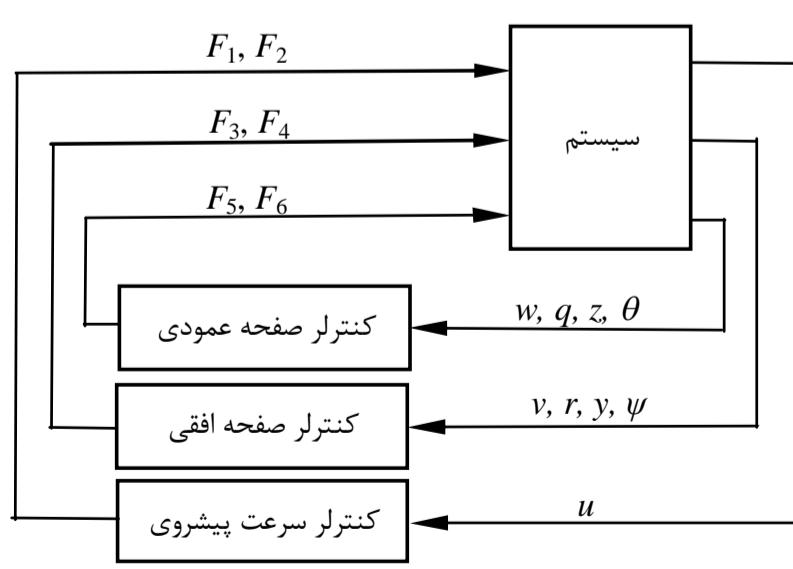
با توجه به محیط اغتشاشی در اطراف شناور زیرسطحی، نیروهایی با اندازه‌های مختلف و در زمان‌های مختلف به صورت یک تابع پله به صورت جداگانه و سپس با هم، در جهت‌های متفاوت به سیستم اعمال شده است تا چگونگی عملکرد تراسترهای برای تطبیق با شرایط به وجود آمده، مورد بررسی قرار گیرد. اعمال این اغتشاش به سیستم نیز، 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 درنظر 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 تراسترهای 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 w و z به طور همزمان تحت



شکل 4 نمودار بلوکی سیستم و کنترلر

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

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

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

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 جایگذاری ثوابت فیزیکی و هیدرودینامیکی و سرعت پیشروی $U = 0.8 \text{ m/s}$ حاصل از معادله (2) به صورت روابط (6) خواهد بود.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0.4810 & -1.4534 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2937 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0.1245 & -0.1245 & 0.1556 & -0.1556 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C &= [0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D = 0 \\ x &= [v \ r \ y \ \psi]' \quad u = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]' \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 2.5722 & 4.0800 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3490 & 0 & -33.7927 \\ 1 & 0 & 0 & -0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0.0443 & 0.0443 \\ 0.1498 & -0.1498 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C &= [0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D = 0 \\ x &= [w \ q \ z \ \theta]' \quad u = [F_5 \ F_6]' \end{aligned} \quad (7)$$

3- کنترل ربات زیرسطحی

کنترلر طراحی شده با روش جایابی قطب‌ها³ با ورودی کنترلی نیروی تراسترهای در فضای حالت انجام گرفته است. نمودار بلوکی کنترل 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

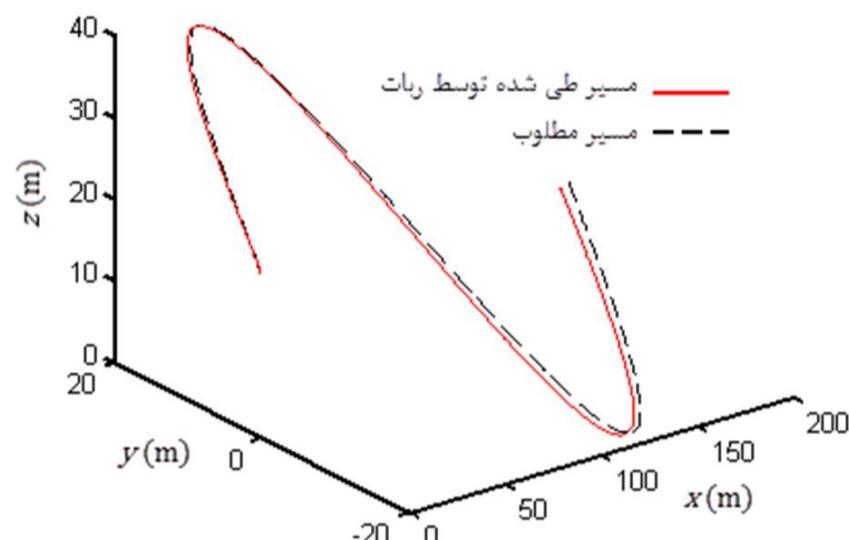
1- Heave

2- Pitch

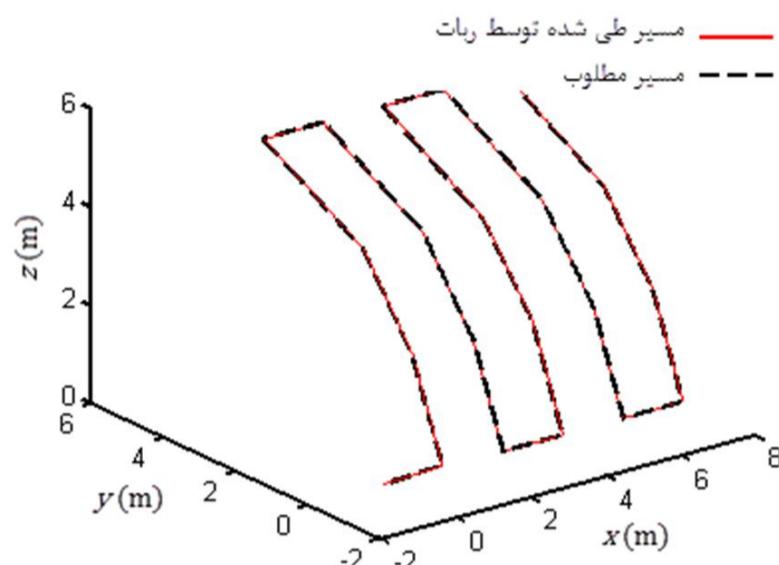
3- Pole Placement

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 به دست آمده است. در شکل‌های 13-15 نیروی تراسترهای برای به دست آمدن این مانور مشاهده می‌شود.

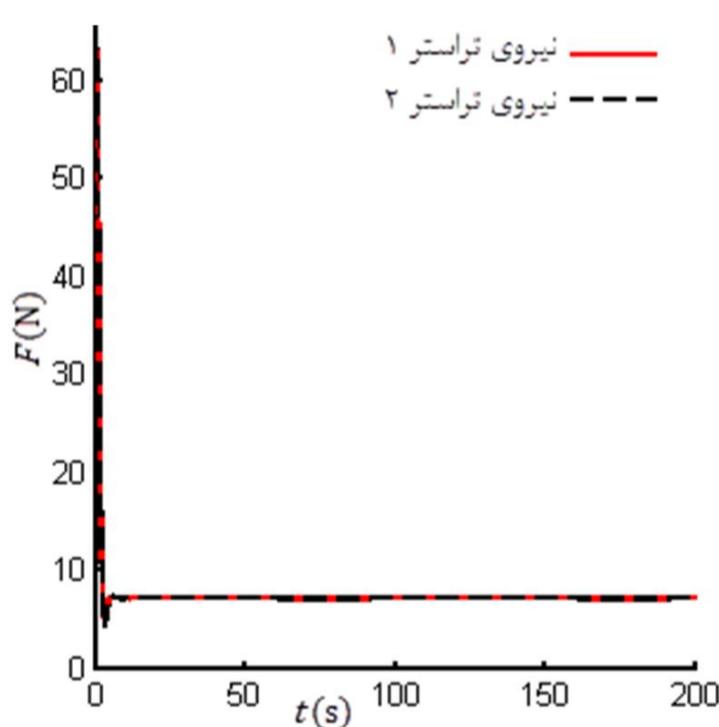
یک مزیت مهم ربات هوشمند زیرسطحی با قابلیت هاورینگ آغاز حرکت در جهت افقی و عمودی از حالت سکون است. در این حالت سرعت پیشروی



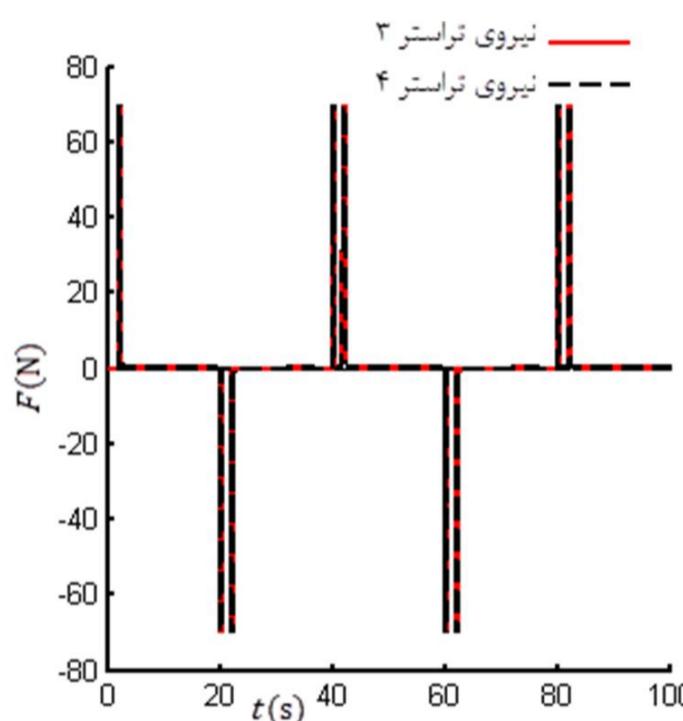
شکل 8 مسیر حرکت ربات با ورودی موج سینوسی در صفحه افقی و عمودی



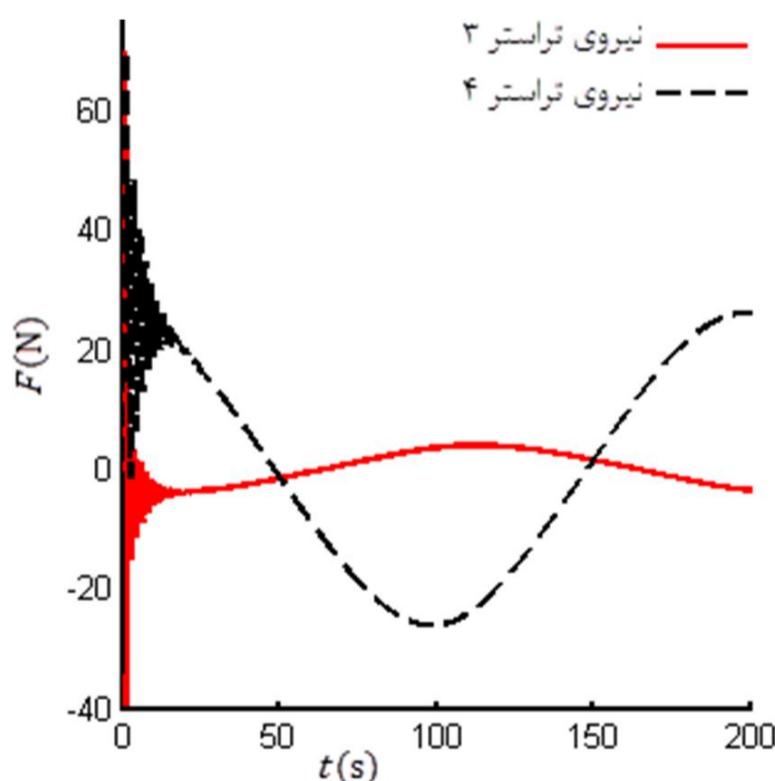
شکل 5 مسیر مطلوب، مشابه با مسیر بازرسی بدن کشته با کنترلر اعمال شده به مدل خطی



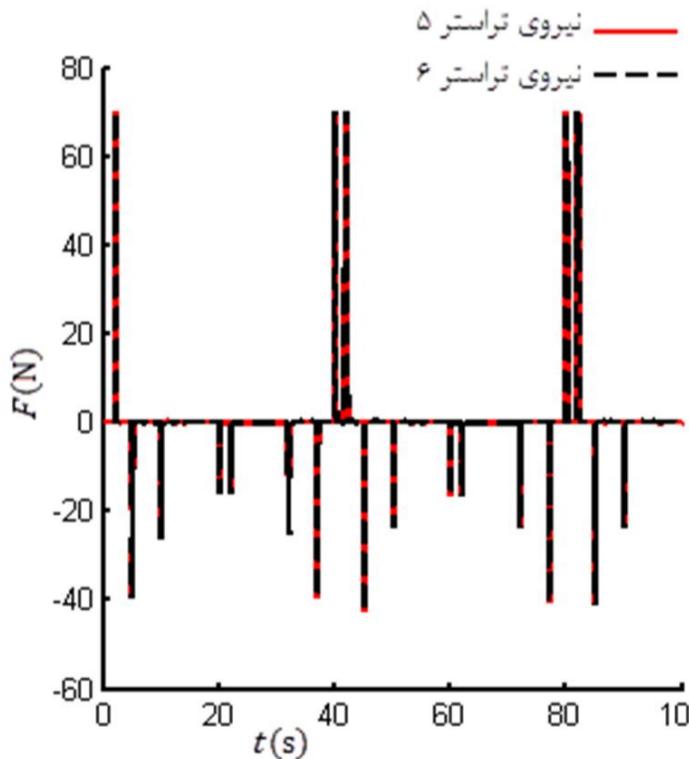
شکل 9 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در جهت‌های u و z



شکل 6 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدن کشته، مدل خطی



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

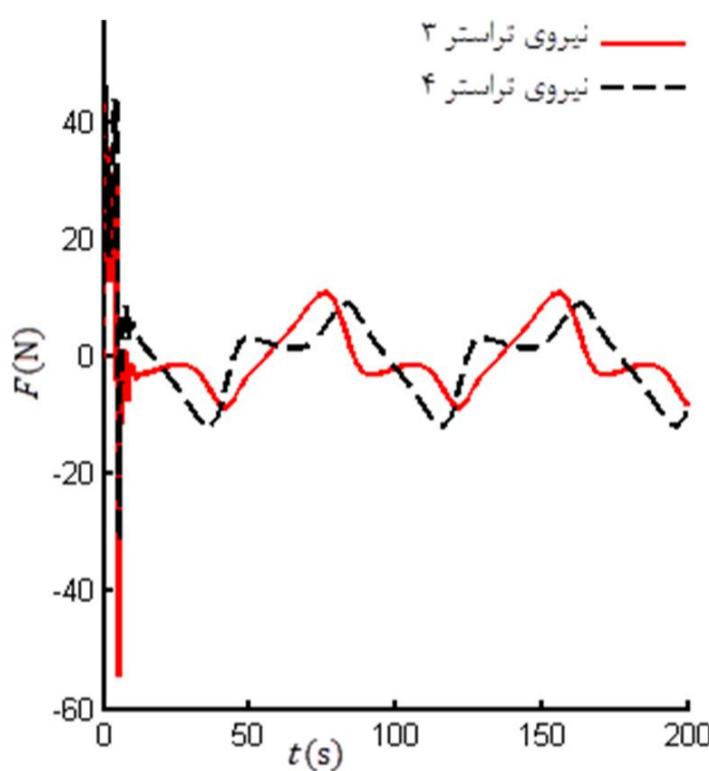


شکل 7 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدن کشته، مدل خطی

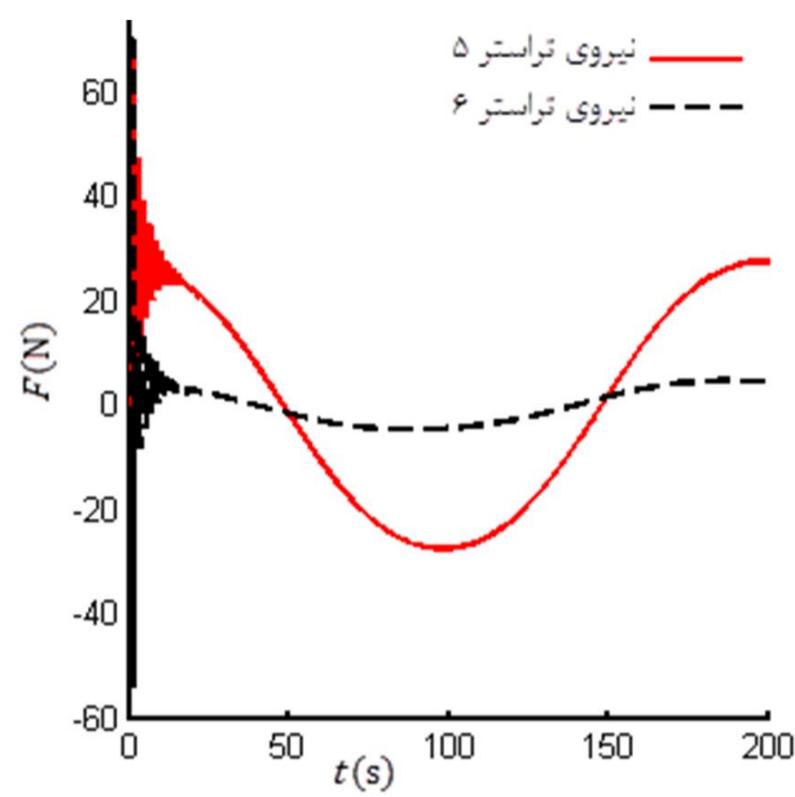
یک موج سینوسی با دامنه 19m و فرکانس $\frac{1}{200} \text{ rev/s}$ گرفته‌اند. شکل 8 مسیر مطلوب و پاسخ سیستم کنترلی نشان داده شده است. رهگیری مسیر مطلوب نشان دهنده عملکرد مناسب کنترلر در مقابل سیستم غیر خطی است. شکل‌های 9، 10 و 11 نیروی تراسترهای برای تأمین این مانور را نشان می‌دهند.

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 بدن کشته قرار داد. این مسیر به دلیل آغاز به حرکت و توقف‌های پیاپی، از جمله مانورهای دشوار محسوب می‌شود. در شکل‌های 17-19 نیروی تراسترهای برای بدست‌آمدن این مانور مشاهده می‌شود.

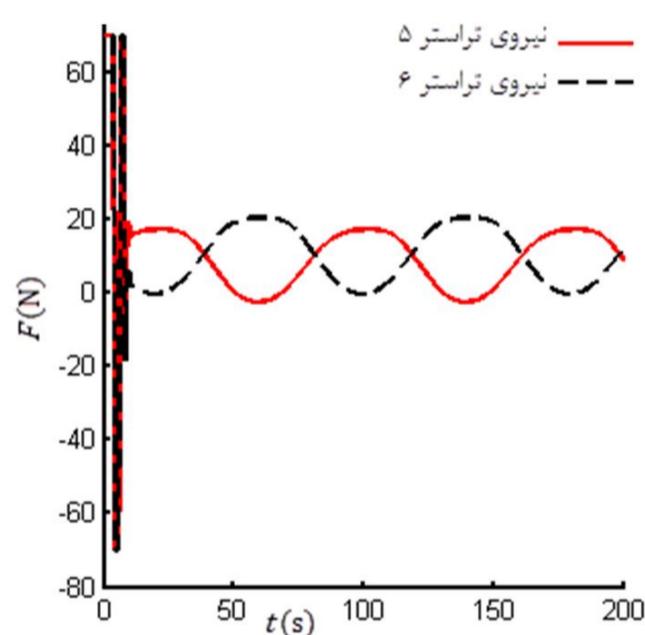
با توجه به شکل 8 مشاهده می‌شود مسیر ورودی و مسیر طی شده



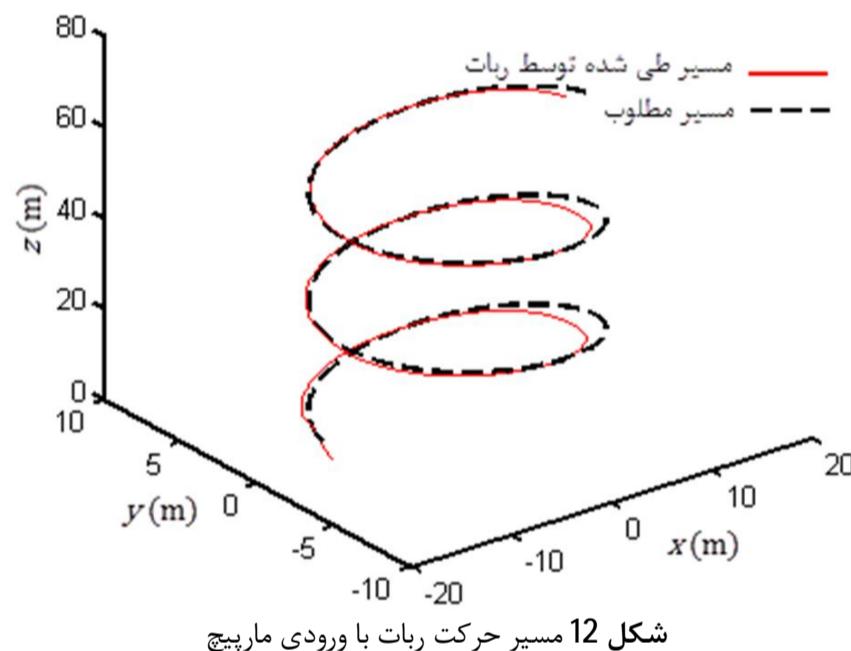
شکل 14 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ



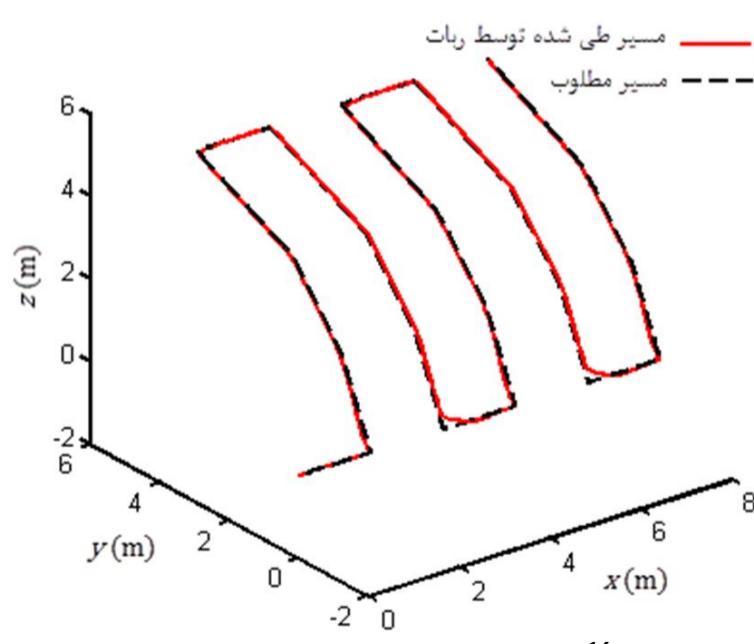
شکل 11 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی در جهت‌های y و z



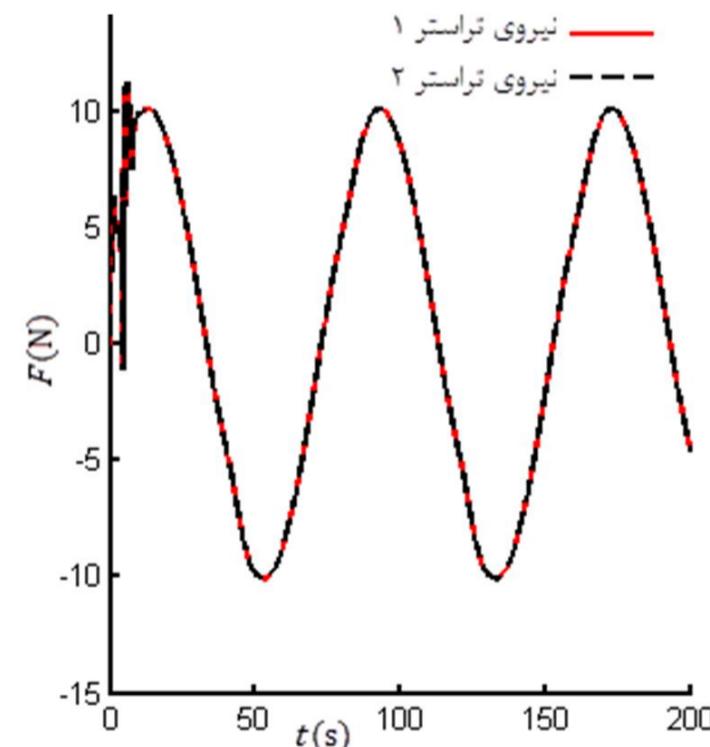
شکل 15 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ



شکل 12 مسیر حرکت ربات با ورودی مارپیچ



شکل 16 مسیر حرکت ربات با ورودی مسیر بازرسی بدن کشته



شکل 13 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ

و زوایای پیچ و یا صفر هستند، در شکل 16 نیز که مسیر ورودی به شکل بدن کشته 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

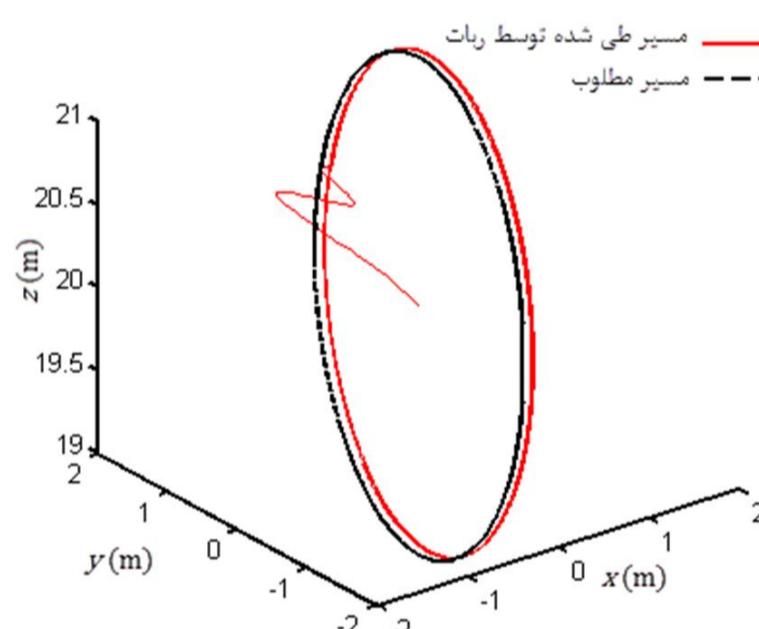
ولی همچنان کنترلر با دقت مطلوبی قادر به کنترل ربات در مسیر دلخواه بوده است.

در شکل 20 یک مسیر دایروی به عنوان مسیر مطلوب به ربات اعمال شده است که در واقع ترکیب دو موج سینوسی در راستای محورهای z و y است. برای به دست آوردن این مانور سرعت روبه جلو ربات ($s_{reg} = 0$) 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.

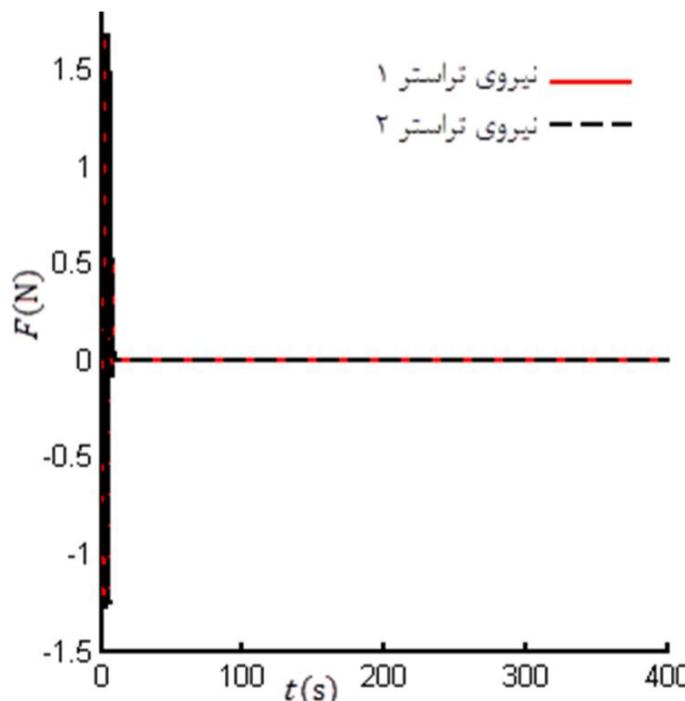
برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترلر به اغتشاشات خارجی، یک نیروی دلخواه در زمان دلخواه در راستای محور z و یک نیرو در راستای محور z به ربات اعمال شده است. این نیروها به بزرگی 100 نیوتن بوده و در زمان‌های 120 و 130 ثانیه به ترتیب در راستاهای z و z هر کدام به مدت 20 ثانیه

اعمال شده‌اند و در ثانیه 130 تا 140 هم پوشانی دارند (شکل 24).

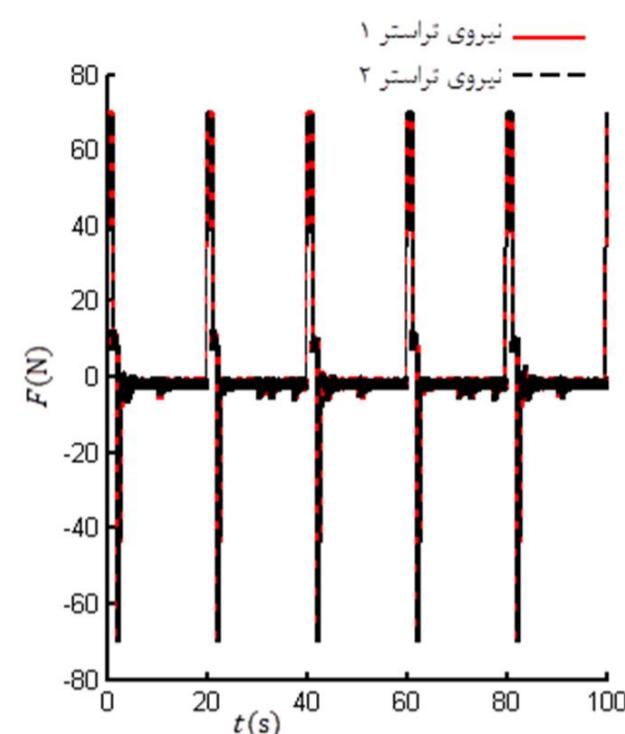
در شکل 25 مسیر طی شده توسط ربات با وجود این اغتشاشات مشاهده می‌شود. در شکل‌های 26-28 نیز نیروی تراسترها که توسط کنترلر برای به دست آمدن این مانور تولید شده مشاهده می‌شود. نتایج به خوبی نشان می‌دهد در زمان اعمال این نیروهای اغتشاشی به ربات، تراسترها با عکس العمل متقابل با این نیروها مانع از منحرف شدن ربات از مسیر خود شده‌اند.



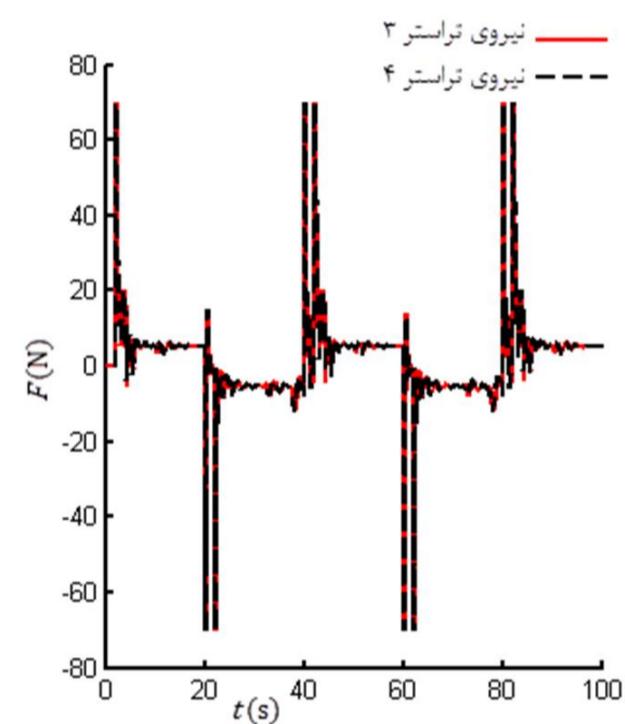
شکل 20 مسیر حرکت ربات با ورودی مطلوب دایره



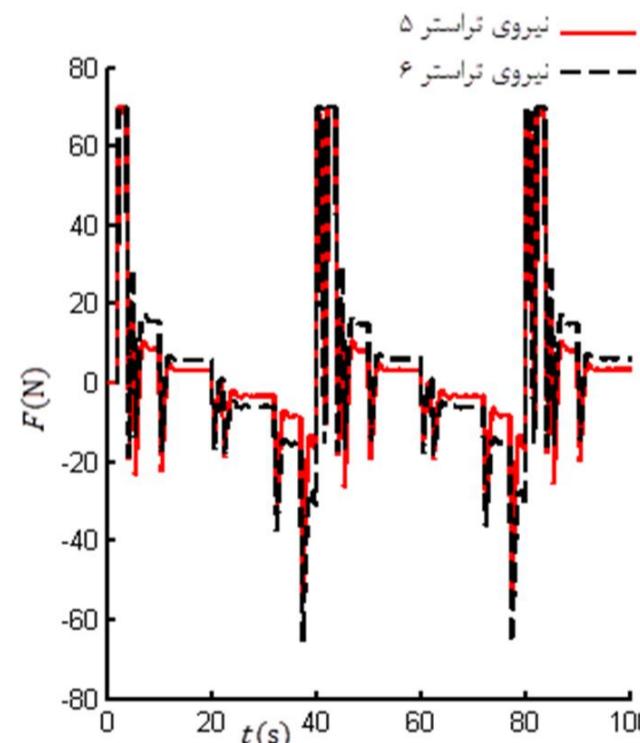
شکل 21 ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره



شکل 17 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدن کشته، مدل غیرخطی



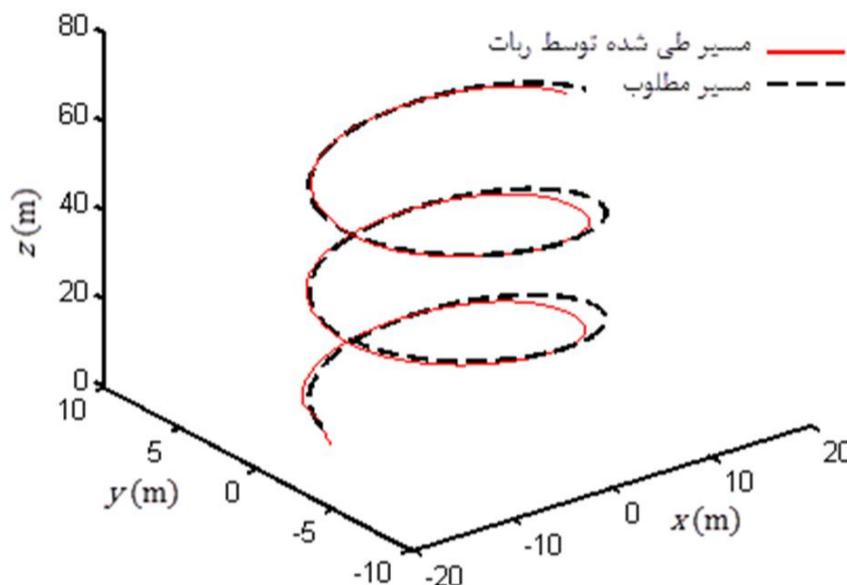
شکل 18 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدن کشته، مدل غیرخطی



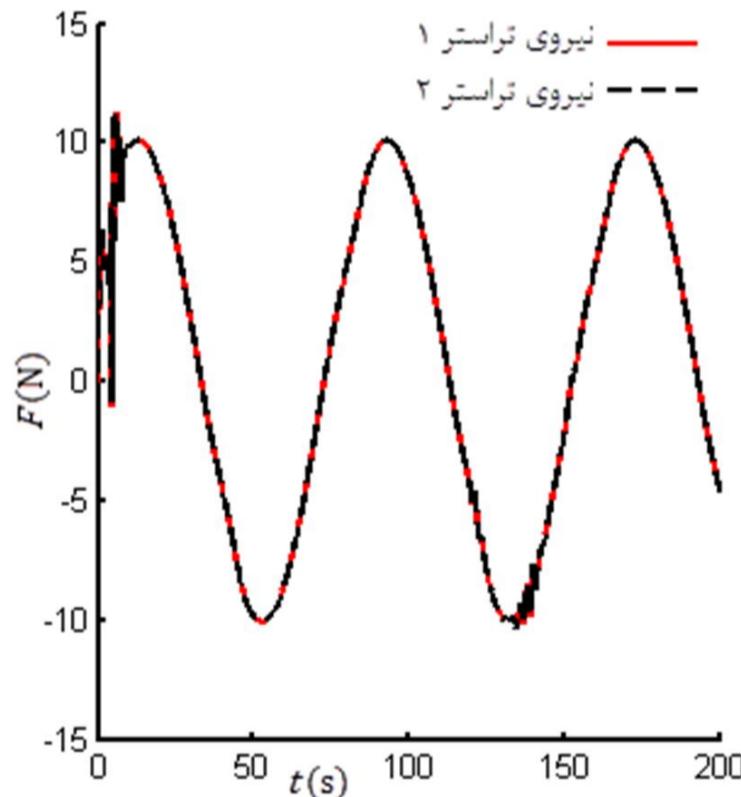
شکل 19 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مشابه بازرسی بدن کشته، مدل غیرخطی

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،

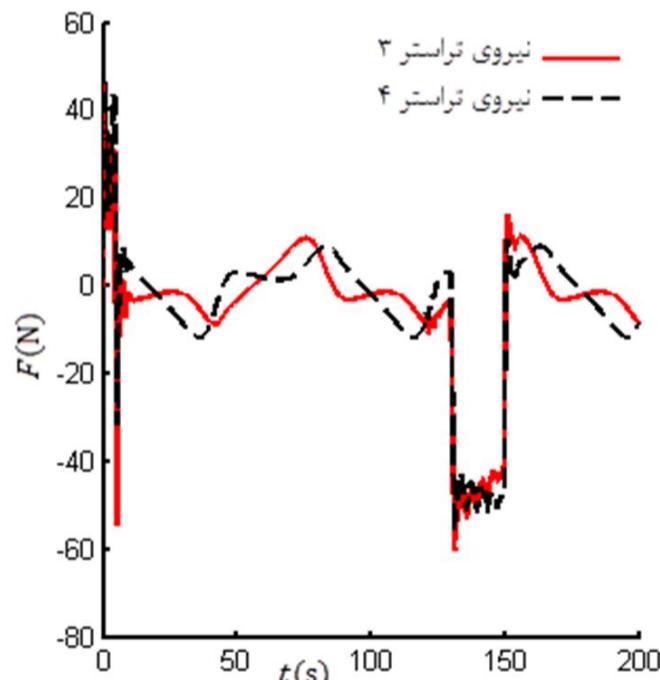
مقاوم بودن کنترلر مورد آزمایش قرار گرفته است. مسیر مطلوب مشابه شکل ۸، برای بررسی عملکرد کنترلر به سیستم اعمال شد. شکل ۲۹، نشان می‌دهد در شرایط وجود این کمبود قطعیت پارامتری شدید، پاسخ سیستم کنترلی تا حد مناسبی، مسیر مطلوب را دنبال کرده است. ورودی‌های کنترلی نیز در شکل‌های ۳۰-۳۱ مشاهده می‌شوند.



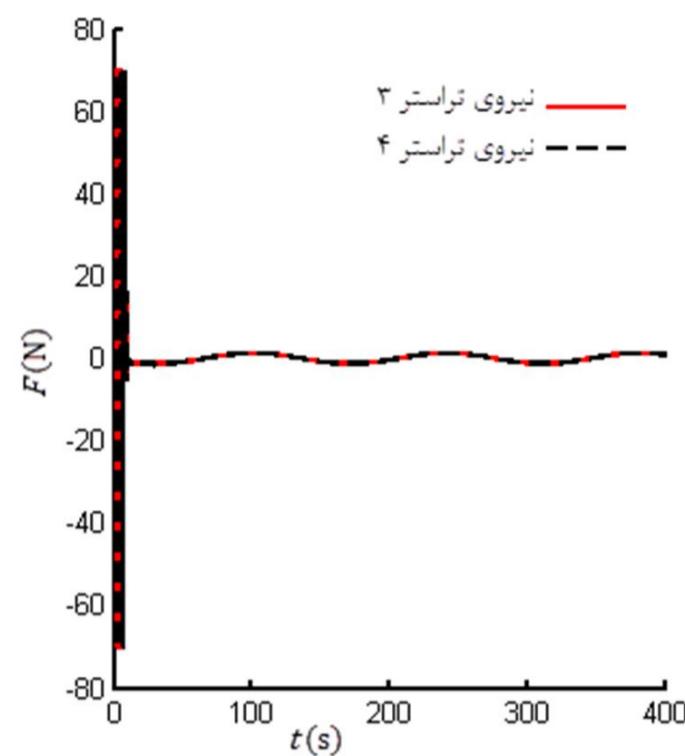
شکل ۲۵ مسیر طی شده توسط ربات با وجود نیروهای اغتشاشی



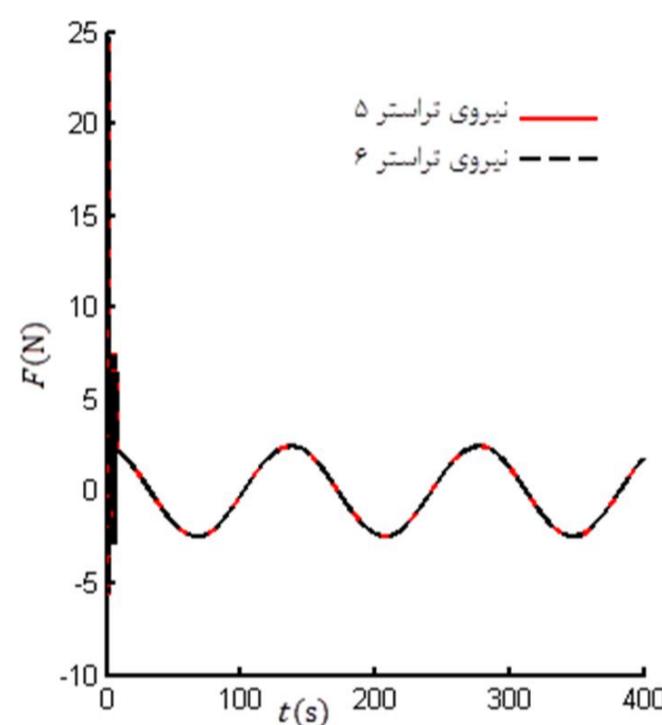
شکل ۲۶ ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



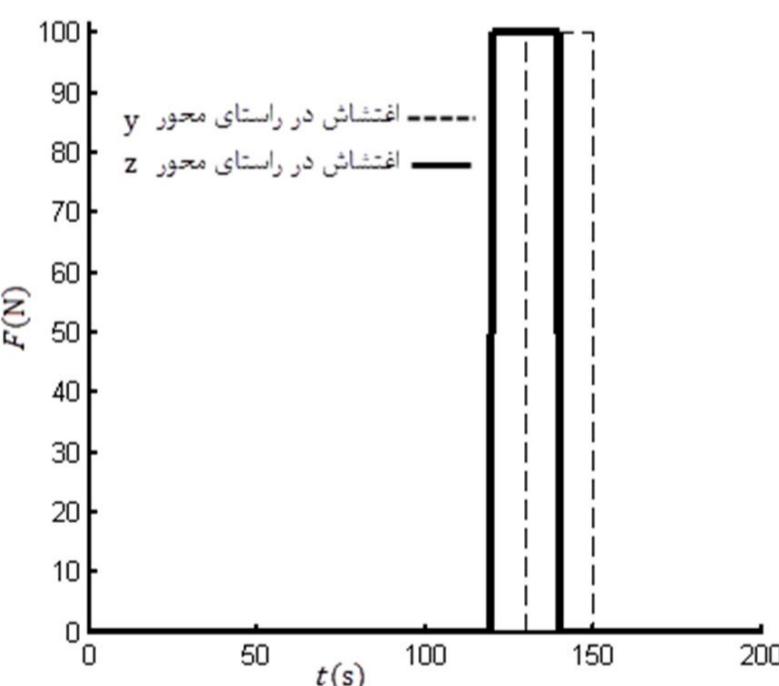
شکل ۲۷ ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



شکل ۲۲ ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره

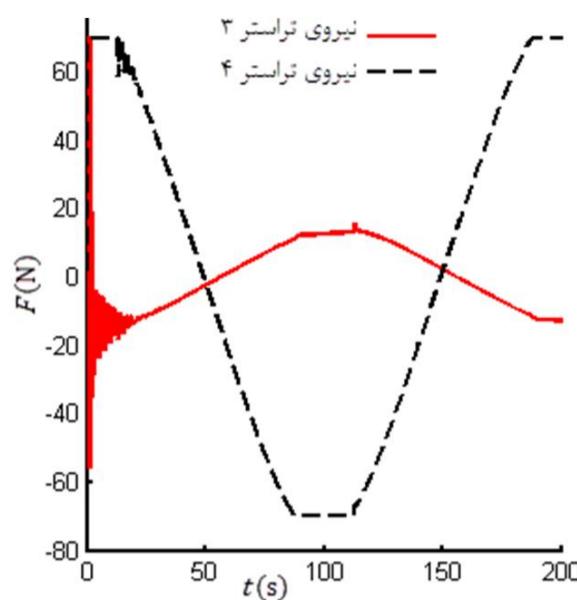


شکل ۲۳ ورودی‌های کنترلی برای مسیر دایره

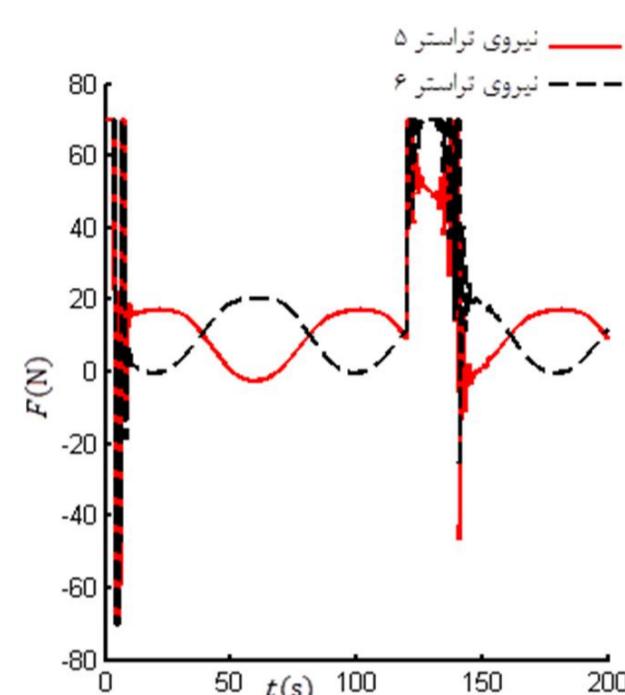


شکل ۲۴ نیروهای اغتشاشی وارد شده به ربات

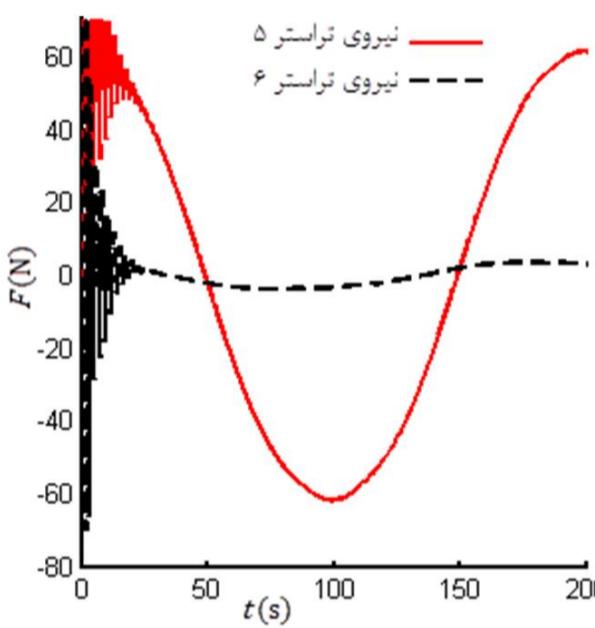
می‌توان انتظار داشت که ضرایب هیدرودینامیک به دست آمده از شرایط آزمایشگاهی در بدترین حالت تا ۳ برابر با مقادیر واقعی مغایرت داشته باشد؛ بنابراین با افزایش ضرایب هیدرودینامیک در مدل غیرخطی تا ۳۰۰ درصد،



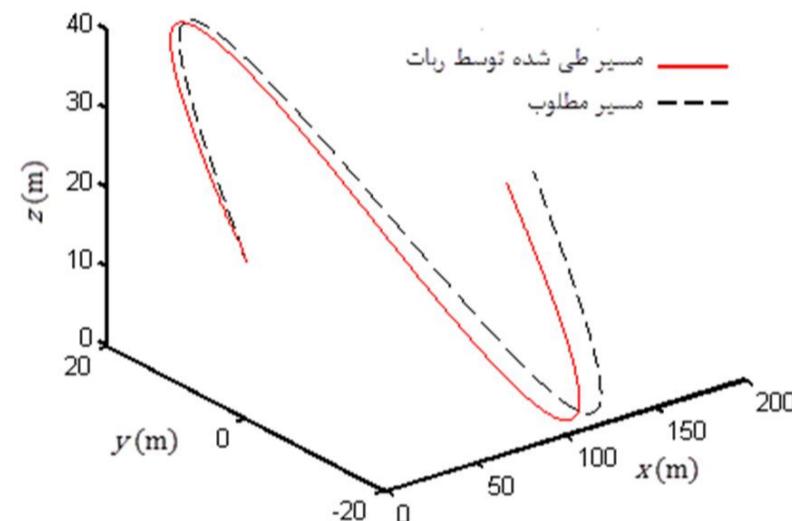
شکل 31 ورودی‌های کنترلی برای مسیر سینوسی با وجود کمبود قطعیت ضرایب



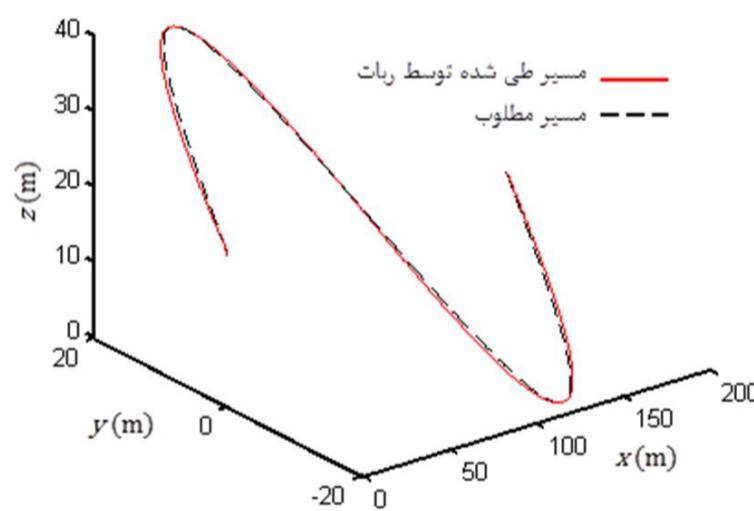
شکل 28 ورودی‌های کنترلی برای مسیر مارپیچ در حضور نیروهای اغتشاشی



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

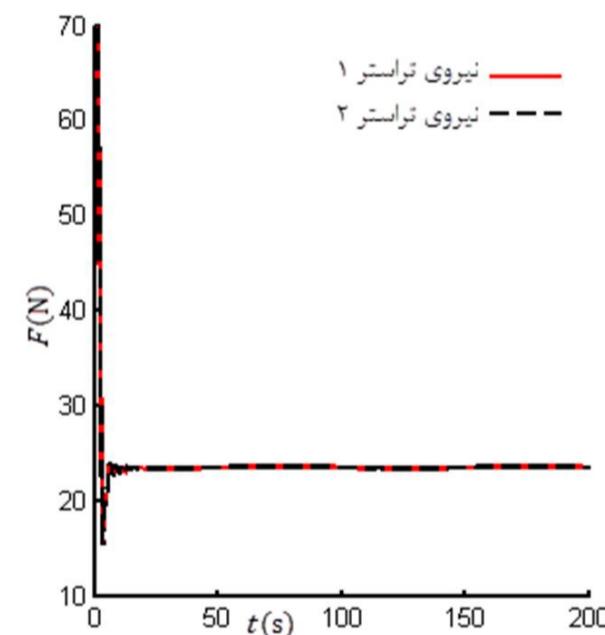


شکل 29 مسیر طی شده توسط ربات با وجود کمبود قطعیت در ضرایب هیدرودینامیک



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

منظور بازرسی بخش آبخور کشته‌ها ارائه شد. برای کارایی مطلوب و کامل این ربات، کنترل دقیق آن به کمک کنترل فیدبک حالت انجام گرفت. با توجه به طراحی کنترل 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 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 عقب‌افتداده 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/mu-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 sensoring 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, *Intelligents 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. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-