J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 47, 2025. (108-123)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Improving Dynamic Positioning (DP) System Performance Using a Two-Stage Control System

Javad Khodabandehloo far[*1], Amirhossein Najari[2], Siavash Soleimany[3], Mohammad Saeed Seif [4]

[1] *Master's Student in Naval Architecture at Sharif University of Technology; Khodabandelofarjavad@gmail.com*
[2] *Ph.D. candidate in Marine Engineering at Sharif University of Technology; amir.najari78@sharif.edu*
[3] *B.Sc. Graduate in Marine Engineering from Sharif University of Technology; siavashsoleymani151@gmail.com*
[4] *Faculty Member at Sharif University of Technology; seif@sharif.edu*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 15 Oct 2025
Last modification: 9 Dec 2025
Accepted: 9 Dec 2025
Available online: 11 Dec 2025

Article type:
Research paper

Keywords:
Autonomous Vessel
Dynamic Positioning
Path Following
PID

ABSTRACT

Dynamic Positioning (DP) systems face control challenges due to the vessel's nonlinear dynamics and environmental disturbances (such as wind, current, and waves). These issues, coupled with the continuous operation and ready-state of thrusters, lead to a significant increase in energy consumption and operational costs in conventional systems. This paper aims to improve the performance of vessel DP systems by introducing a hierarchical and stable control algorithm that simultaneously ensures dynamic stability and positioning accuracy. In this architecture, the first phase (Path Following) operates at large distances from the target (exceeding 5 meters), utilizing a PD controller for rapid guidance and optimization of energy usage. Upon the vessel's approach to the target position, the second phase (Dynamic Positioning) is activated with a PID controller for precise position and heading stabilization. Three-degree-of-freedom (3-DOF) simulation results on the KVLCC2 model vessel demonstrate the proposed system's stable and robust performance across four different scenarios, achieving a maximum steady-state positioning error of 19 cm (10% of the vessel length). In scenarios without environmental disturbances, a smooth transient response and rapid convergence from (0, 0) to (20, 20) meters were observed. Furthermore, in the presence of severe environmental disturbances, the positioning performance of the proposed system, based on the RMSE (Root Mean Square Error) criterion, registered a value of 0.27 meters, showing an average improvement of 30% compared to a conventional PID controller. Additionally, the selective activation of the precise DP system in the second stage effectively contributes to reduced energy consumption and operational costs.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.9
Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۷، ۱۴۰۴، (۱۲۳-۱۰۸)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بهبود عملکرد سیستم تثبیت موقعیت پویا (DP) با استفاده از سیستم کنترل دومرحله‌ای

جواد خدابنده لوفر*[۱]، امیر حسین نجاری[۲]، سیاوش سلیمانی[۳]، محمد سعید سیف[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری کشتی دانشگاه صنعتی شریف، Khodabandelofarjavad@gmail.com

[۲] دانشجوی دکتری مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف، amir.najari78@sharif.edu

[۳] فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف، siavashsoleymani151@gmail.com

[۴] استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

شناور هوشمند

موقعیت یابی پویا

مسیر یابی

PID

چکیده

سیستم‌های تثبیت موقعیت پویا (DP) به‌واسطه دینامیک غیرخطی شناور و اغتشاشات محیطی (مانند باد، جریان، و موج) با چالش‌های کنترلی مواجه‌اند. این مسائل، در کنار فعالیت پیوسته و حالت آماده‌باش تراسترها، موجب افزایش چشمگیر مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های متعارف می‌شوند. این مقاله، بهبود عملکرد DP شناورها را با معرفی یک الگوریتم کنترلی سلسله‌مراتبی و پایدار، که به‌طور هم‌زمان پایداری دینامیکی و دقت موقعیت‌یابی را تضمین می‌کند، هدف قرار داده است. در این ساختار، فاز نخست (Path Following)، در فواصل زیاد از هدف (بیش از ۵ متر)، با استفاده از کنترلر PD برای هدایت سریع و بهینه‌سازی مصرف انرژی عمل می‌کند. پس از نزدیک شدن شناور به موقعیت هدف، فاز دوم (Dynamic Positioning) با کنترلر PID برای تثبیت دقیق موقعیت و جهت فعال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی سه‌درجه‌آزادی بر روی شناور مدل KVLCC2، عملکرد پایدار و مقاوم سیستم پیشنهادی را در چهار سناریوی مختلف، با حداکثر خطای تثبیت موقعیت ۱۹ سانتی‌متر (۰.۱٪ طول شناور) نشان می‌دهد. در سناریوهای فاقد اغتشاش محیطی، گذار نرم و همگرایی سریع از (۰،۰) به (۲۰،۲۰) متر مشاهده شد. همچنین در حضور اغتشاشات محیطی شدید، عملکرد تثبیت موقعیت سیستم پیشنهادی بر اساس معیار RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، با ثبت مقدار ۰/۲۷ متر، بهبود میانگین ۳۰٪ را نسبت به یک کنترلر PID نشان داده است. افزون بر این، فعال‌سازی سیستم DP دقیق در مرحله دوم، موجب کاهش مؤثر مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی شده است.

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.9

ISSN: 2645-8136

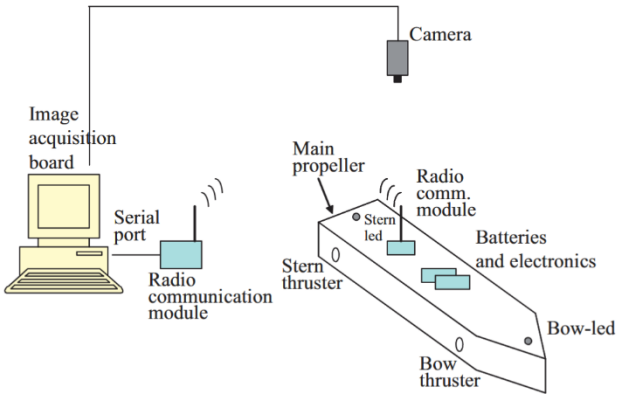
حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

۱- مقدمه

از دیرباز دریا به عنوان یک بستر عظیم از این کره خاکی مورد استفاده بشر قرار گرفته است و همواره به دنبال گسترش توانمندی خود در این حوزه ی نیلگون می‌باشد. در عصری که ما در آن حضور داریم برای کشورهای موجود دریا به عنوان یک منبع درآمد عظیم و منطقه استراتژیک نقش ایفا میکند، اما دستیابی به این جایگاه بالا در دریا نیاز مند توانایی انجام عملیات های دریایی و ایجاد بستر مناسب برای رشد در این حوزه می‌باشد.

راهکار های هوشمند میتواند امکان بهره‌برداری از دریا را برای کشورهای دارای خط ساحلی گسترش دهد و با در نظر گرفتن اینکه بیش از هفتاد درصد سطح زمین را آب‌های آزاد پوشانده و این گستره وسیع، بستر اصلی تجارت بین‌المللی، اکتشافات نفت و گاز فراساحلی و فعالیت‌های تحقیقاتی دریایی محسوب می‌شود به سمت اقتصادی خودکفا و پویا حرکت کنند[۱]. در دهه‌های اخیر با گسترش صنایع دریایی، توسعه تجهیزات دریایی پیشرفته و هوشمند با هدف افزایش ایمنی، بهره‌وری سوخت و خودکارسازی عملیات دریایی رشد چشمگیری داشته است و افزایش نیاز به انجام عملیات دقیق در حضور عدم‌قطعیت‌های محیطی، ضرورت استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای کنترل و حفظ موقعیت شناورها بیش از پیش احساس می‌شود[۲]. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های نوین در این حوزه، سیستم تثبیت موقعیت پویا (DP[1]) است که امکان نگه‌داشتن شناور در موقعیتی مشخص را بدون استفاده از لنگر، صرفاً با بهره‌گیری از نیروی پیش‌ران‌ها و حسگرهای موقعیت فراهم می‌سازد[۳]. این سیستم نقش حیاتی در عملیات فراساحلی همچون حفاری، لوله‌گذاری و تعمیرات تجهیزات زیرسطحی دارد، بطوریکه دقت و پایداری موقعیت، مستقیماً بر ایمنی و کارایی مأموریت تأثیر می‌گذارد[۴].

ترکیب سیستم‌های موقعیت‌یابی پویا با سامانه‌های هوشمند، امکان انجام عملیات طولانی‌مدت در محیط‌های متغیر را فراهم کرده است. این هم‌افزایی فناوری، کارایی شناورهای خودران را در مأموریت‌های اکتشافی و تحقیقاتی افزایش می‌دهد [۵]. وجود سامانه‌های DP در شناورهای تحقیقاتی و پشتیبانی، امکان انجام مأموریت‌های دقیق در شرایط باد و جریان متغیر را فراهم می‌کند. اهمیت این سامانه‌ها به‌ویژه در محیط‌های عمیق که پهلوگیری و ثابت‌ماندن حیاتی است، دوچندان می‌شود [۶]. تانوری و همکارانشان (۲۰۱۰) در یک پژوهش به ارزیابی یک کنترل‌کننده مُد لغزشی برای غلبه بر مشکلات کنترل‌کننده‌های PID[2] معمولی در سیستم‌های تثبیت موقعیت دینامیکی می‌پردازد. این مشکلات شامل دشواری تنظیم، تغییر عملکرد با شرایط محیطی و بارگیری و ماهیت غیرخطی دینامیک شناور است. نویسندگان، عملکرد کنترل کننده مُد لغزشی را به صورت عددی و تجربی با کنترل‌کننده‌های PID معمولی مقایسه کرده و تأکید می‌کنند که SMC[3] در برابر تغییرات محیطی مقاوم است. فرآیند طراحی SMC شامل تعریف یک سطح لغزش و انتخاب قانون کنترل مناسب است. برای کاهش خطای ماندگار، از یک تابع اشباع به همراه یک جمله انتگرالی استفاده شده است. تنظیم پارامترهای SMC بر اساس فرکانس‌های تشدید مدل‌نشده، تأخیر زمانی و نرخ نمونه‌برداری و حداکثر خطاهای ردیابی انجام می‌شود. آزمایش‌های تجربی با یک مدل کوچک‌شده (۱:۱۵۰) از یک تانکر در حوضچه کشش دانشگاه سائوپائولو، تحت شرایط مختلف بارگیری شناور و سرعت‌های مختلف باد صورت گرفت که در شکل۱ چیدمان و تجهیزات مورد استفاده در تست تجربی قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که SMC حتی در شرایط پیچیده که امکان اشباع تراسترها وجود دارد، عملکرد خوبی دارد اما در بعضی از تست ها کنترلر PID عملکرد مشابه یا بهتری داشته است[۷].



شکل۱- چیدمان و ترتیب آزمایش تجربی[۷].

این مشکل، به همراه عدم قطعیت‌های مدل و خطای عملگرها، نیاز به توسعه الگوریتم‌های کنترلی مقاوم و پیشرفته را تشدید می‌کند[۸]. کاربرد سیستم‌های موقعیت‌یابی پویا تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش حوادث دریایی ناشی از رانش و لغزش شناور داشته است[۹]. تلفیق این سیستم‌ها با حسگرهای ناوبری موجب ارتقای سطح ایمنی در عملیات فراساحلی شده است.

در سال های گذشته با گسترش هوش مصنوعی، پژوهش های انجام گرفته در این زمینه افزایش یافته است، و نوآوری های روز افزون در سیستم های DP در حال تزریق به صنعت دریایی جهان است.

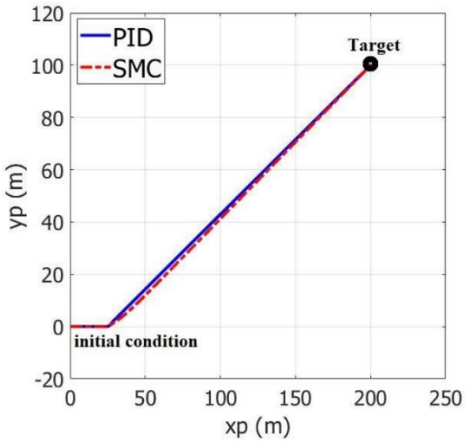
در پژوهشی توسط آدریانا و همکاران (۲۰۰۹)، کاربرد یک کنترل‌کننده مبتنی بر تکنیک کنترل مُد لغزشی غیرخطی برای سیستم‌های تثبیت موقعیت دینامیکی شناورهای نفتکش مورد بررسی قرار گرفته است[۱۰]. نویسندگان پیشنهاد کردند که این کنترل‌کننده که شامل یک حلقه پیش‌خور برای جبران نیروهای

[1] Dynamic Positioning
[2] Proportional-Integral-Derivative
[3] Sliding Mode Control

محیطی و یک حلقه بازخورد برای حذف خطاها باشد، که عملکرد و پایداری را در تمام زوایای هدینگ تضمین می‌کند.
آن‌ها عملکرد کنترل‌کننده را از طریق شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی با یک مدل در یک حوضچه آزمایشگاهی در دانشگاه سائوپائولو ارزیابی کردند. آزمایش‌ها شامل بررسی تحت دو شرایط بارگیری (بارگیری شده و بالاست) و با تأثیر باد (با سرعت ۲/۴ متر بر ثانیه) بود. همچنین، از فیلترهایی برای کاهش اثر امواج دریا و حذف نویزهای فرکانس بالا از اندازه‌گیری‌های سیستم تخمینگر حالت استفاده شد. نوآوری اصلی این کار، اعمال کنترل‌کننده مُد لغزشی غیرخطی و مقاوم به سیستم‌های تثبیت موقعیت دینامیکی است. این کنترل‌کننده پایداری و عملکرد را در طیف وسیعی از شرایط محیطی، بدون افت کارایی حفظ می‌کند.
فو و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود یک روش برای بازپیکربندی برخط[4] کنترل مقاوم به خطا برای شناورهای دارای سیستم تثبیت موقعیت پویا، پس از وقوع خرابی در تراسترها، با استفاده از مفهوم تراستر مجازی ارائه می‌کند[۱۱]. ایده اصلی این روش، قرار دادن یک بلوک بین خروجی کنترل‌کننده نامی و عملگرهای معیوب است تا سیستم معیوب با کنترل‌کننده نامی سازگار شود و نیاز به طراحی مجدد کنترل‌کننده اصلی از بین برود. نویسندگان، یک مدل خطی فضای حالت برای شناور DP با سه درجه آزادی (surge، sway و yaw) استخراج کرده و سپس تراستر مجازی را با ترکیب عملگر مجازی و مدل شناور DP طراحی می‌کنند. بلوک بازپیکربندی، ورودی‌های مناسبی را برای شناور معیوب بر اساس خروجی کنترل‌کننده‌های نامی تولید می‌کند. اهدافی مانند پنهان‌سازی خطا، بازیابی مسیر و پایداری دینامیکی برای تراستر مجازی تعریف شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک شناور DP با سه تراستر تونلی و دو پروانه اصلی انجام شد، که در آن خرابی کامل یک تراستر در زمان ۲۵ ثانیه و اجرای کنترل مقاوم به خطا در زمان ۶۵ ثانیه نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی، قابلیت و اثربخشی این روش را در بازگرداندن شناور به موقعیت تعادل پس از خرابی تراستر، به طور موفقیت‌آمیزی نشان می‌دهد.
حسنوند و همکاران در پژوهشی (۲۰۲۳) به طراحی یک سیستم هوشمند برای شناورهای نفتکش پرداختند که با در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی آن‌ها بتوانند موقعیت و حالت مناسب را ردیابی کنند[۱۲]. ایشان رفتار سیستم را در حالت غیرخطی با استفاده از روش‌های کنترل PID و کنترل مُد لغزشی برای کنترل عملگرها بررسی کردند. عملکرد کنترل‌کننده برای ماموریت‌های مختلف از جمله کنترل سرعت، کنترل زاویه هدینگ و ردیابی مسیر ارزیابی شد. مدل‌سازی ریاضی حرکت شناور با تمرکز بر حرکات افقی ۳درجه آزادی برای تثبیت موقعیت دینامیکی انجام شده است.

[4] on-line reconfiguration

سیستم‌های هدایت و کنترل، شامل ردیابی نقطه راه و هدایت خط دید(LOS[5]) نیز توسعه یافتند. شبیه‌سازی سیستم با استفاده از مدل تانکر KVLCC2 انجام شد. برای نزدیک شدن به حالت عملیاتی محدودیت‌هایی بر روی فرمان‌های کنترلی عملگرها (حداکثر نرخ تغییر و حداکثر مقدار) اعمال شد.



شکل۲- مسیر حرکت شناور با کنترل های مد نظر[۱۲]

عملکرد PID و SMC در کنترل سرعت و حرکت در صفحه افقی (ورودی پله) و ردیابی مسیر با هم مقایسه شد. همانطور که درشکل ۲ قابل مشاهده است کنترلر غیرخطی عملکرد بهتری در کنترل زاویه سکان و ردیابی مسیر با نوسانات مطلوب در حضور دینامیک غیرخطی نشان داد. در مقابل، PID عملکرد بهتری در کنترل سرعت پیشروی و نوسانات کمتر در فرمان‌های کنترلی ارائه کرد.
نجاری و سیف در یک پژوهش به ایجاد رابطه‌ی دینامیکی بین زاویه سکان و نرخ انحراف برای یک شناور سطحی بدون سرنشین با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی بازگشتی آموزش‌دیده پرداختند[۱۳]. به دلیل عدم دسترسی به شرایط آزمایش واقعی، از یک مدل شبیه‌سازی شده شناور استفاده شده است. شبکه با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های مانور زیگزاگ آموزش دید و فرآیند آموزش شامل مراحل استاتیک و دینامیک بود؛ ابتدا آموزش استاتیک برای تنظیم اولیه وزن‌ها و بایاس‌ها و جلوگیری از واگرایی و سپس آموزش دینامیک برای پیش‌بینی بهتر رفتار سیستم در شرایط واقعی انجام شد. عملکرد شبکه‌ی آموزش‌دیده با ورودی‌های متفاوت از داده‌های آموزشی، مانند سیگنال‌های سینوسی، دندان‌اره‌ای و زیگزاگ با فرکانس‌های متفاوت برای یک شناور KCS در مقیاس مدل ارزیابی شده است. افزایش دقت مدل دینامیکی با روش مذکور می‌تواند فرایند طراحی سیستم کنترل را تسهیل نماید. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در طراحی سیستم‌های DP، چالش‌هایی همچون تأخیر پاسخ دینامیکی، مصرف بالای انرژی و اختلالات ناشی از جریان، باد و موج همچنان

[5] Line of Sight

بر عملکرد سیستم تاثیرگذار است. از این‌رو توسعه راهکارهایی برای کاهش خطای موقعیت و بهبود پایداری دینامیکی شناور ضروری است. در این پژوهش، بهبود عملکرد سیستم DP از طریق استفاده از یک ساختار کنترل دومرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختار، مرحله نخست وظیفه‌ی برنامه‌ریزی و هدایت مسیر هدف را بر عهده دارد و مرحله دوم با اجرای کنترل دقیق، پایداری موقعیت نهایی شناور را تضمین می‌کند. به‌کارگیری چنین سیستم کنترل دومرحله‌ای می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، افزایش دقت تثبیت موقعیت و بهبود پاسخ دینامیکی شناور در شرایط دریایی متغیر شود. نتایج این پژوهش گامی مؤثر در جهت ارتقای قابلیت اعتماد و عملکرد سامانه‌های DP در عملیات پیچیده دریایی خواهد بود.

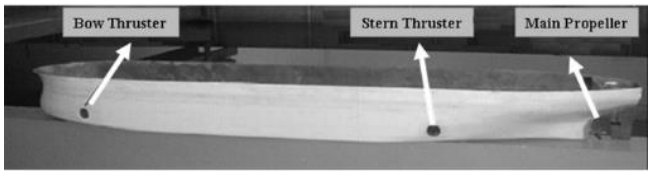
۲- مشخصات شناور مورد بررسی

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترل تثبیت موقعیت پویای طراحی شده، از یک مدل شبیه‌سازی شده بر اساس مشخصات فیزیکی یک شناور نفتکش در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است. اطلاعات این شناور مدل از پژوهش تانوری و همکاران (۲۰۱۰) استخراج گردیده است. در این تحقیق، برای تحلیل رفتار سیستم، حالت بارگذاری بالاست[6] شناور در نظر گرفته شده است که در این حالت، کشتی سبک‌تر بوده و آبخور کمتری دارد. مشخصات جرمی و هیدرودینامیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - مشخصات نفت کش مدل شده[7]

مشخصه	مقدار
جرم $[kg]$	۳۰/۵
ممان اینرسی حول محور قائم $[kg.m^2]$	۵/۱۸
طول $[m]$	۱/۷۸
عرض $[m]$	۰/۲۹
آبخور $[m]$	۰/۰۸
جرم افزوده در راستای Surge $[kg]$	۳/۰۵
جرم افزوده در راستای sway $[kg]$	۱۵/۲۵
جرم افزوده در راستای yaw $[kg.\ m^2]$	۴/۹۴

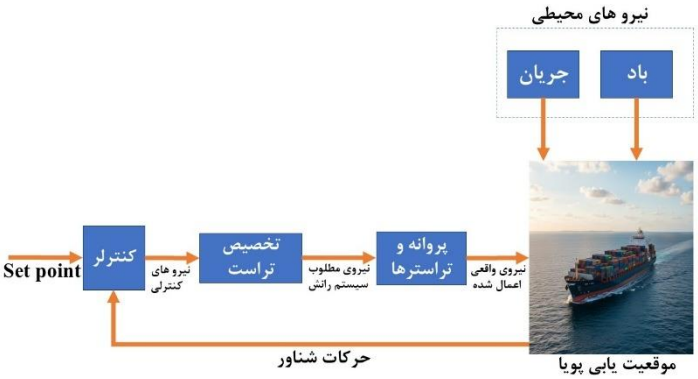
این پارامترها به عنوان ورودی در معادلات حاکم به کار گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی بر اساس آن‌ها استوار است. در شکل شماره ۳ نمای کلی شناور نشان داده شده است.



شکل۳- مدل مورد استفاده در آزمایش تجربی[۷]

۳- مدل‌سازی دینامیکی شناور

در این پژوهش هدف توسعه یک الگوریتم کنترل دومرحله‌ای بر اساس ترکیب کنترل کننده PID و PD است. این کنترل‌کننده شامل یک مسیر پیش‌خور برای جبران نیروهای محیطی و یک حلقه بازخورد به‌منظور حذف خطاها است. در شکل ۴ یک نمودار بلوکی ساده‌شده از یک سیستم DP ارائه شده است.



شکل۴- نمودار بلوکی سیستم تثبیت موقعیت پویا

در سیستم‌های تثبیت موقعیت مدرن، رویکردهای نوین کنترلی با هدف بهینه‌سازی عملکرد در شرایط مختلف عملیاتی توسعه یافته‌اند. یکی از این راهکارها، استفاده از یک استراتژی کنترل دومرحله‌ای است که با تقسیم‌بندی فرآیند ناوبری به دو فاز مجزا، به صورت هوشمندانه بین اهداف متناقض سرعت و دقت تعادل برقرار می‌کند. در فاز اول که به Path Following موسوم است، سیستم در حالتی قرار می‌گیرد که شناور با فاصله قابل توجهی از نقطه هدف (بیش از ۵ متر) قرار دارد. در این مرحله، هدف اصلی، هدایت سریع شناور به نزدیکی هدف با حداقل مصرف انرژی است. کنترلر PD برای این منظور به گونه‌ای تنظیم شده که تنها بر کنترل سرعت خطی (surge) و جهت‌گیری (yaw) تمرکز کند. در این فاز، اغتشاشات کوچک و نیاز به دقت بالا در موقعیت‌دهی نادیده گرفته می‌شود. این امر به سیستم اجازه می‌دهد تا با پاسخ سریع و کاهش درگیری رانشگرها، به صورت کارآمدی مسیر را دنبال کند.

با ورود شناور به محدوده نزدیک هدف (فاصله کمتر از ۵ متر از نقطه مقصد)، سیستم به صورت خودکار وارد فاز دوم که به Dynamic Positioning مرسوم است، می‌شود. در این مرحله، هدف

[6] Ballasted Condition

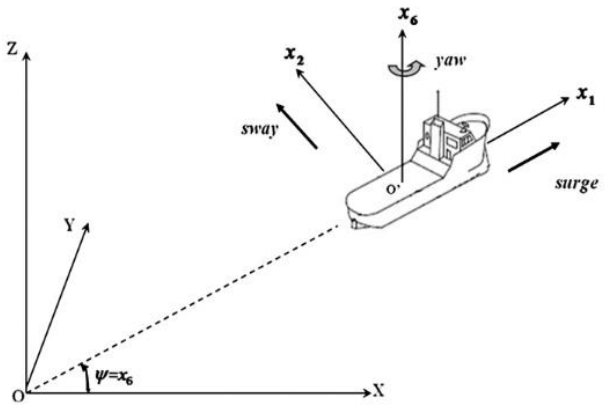
از دنبال کردن مسیر به حفظ موقعیت و جهت‌گیری دقیق تغییر می‌یابد. کنترلر PID، با ضرایب کاملاً متفاوت، برای مقابله با اغتشاشات محیطی نظیر باد و جریان بهینه‌سازی شده است. این کنترلر با حساسیت بالا به تغییرات کوچک در تمام درجات آزادی نیروی رانشگرها را به صورت پیوسته و دقیق تنظیم می‌کند تا شناور را در موقعیت مطلوب ثابت نگه دارد.

این استراتژی دومرحله‌ای مزایای علمی و عملی متعددی دارد. با تفکیک وظایف، امکان بهینه‌سازی مستقل هر کنترلر برای هدف مشخص خود فراهم می‌شود. این امر منجر به افزایش چشمگیر پایایی و عملکرد کلی سیستم می‌گردد. این رویکرد، بهینه‌سازی در مصرف انرژی را نیز در پی دارد؛ چرا که در فاز اولیه از مصرف بی‌مورد انرژی برای تثبیت موقعیت جلوگیری می‌کند و آن را تنها به فاز حیاتی نهایی محدود می‌سازد. در نتیجه، این استراتژی نه تنها کارایی عملیاتی را بهبود می‌بخشد، بلکه به افزایش عمر مفید تجهیزات و کاهش هزینه‌ها نیز کمک می‌کند. این روش یک نمونه موفق از پیاده‌سازی کنترل سلسله‌مراتبی در مهندسی دریا به شمار می‌رود که با ترکیب سادگی PID و هوشمندی یک سیستم مبتنی بر حالت، راهکاری مؤثر برای چالش‌های ناوبری شناورها ارائه می‌دهد.

۳-۱- درجات آزادی شناور

حرکت یک شناور را می‌توان با مجموعه‌ای از جابجایی و دوران های مستقل توصیف کرد که در مجموع به آن درجات آزادی[7] گفته می‌شود. یک جسم صلب در حالت کلی دارای شش درجه آزادی است که شامل سه حرکت انتقالی (حرکت در راستای طولی، عرضی و قائم) و سه حرکت دورانی (چرخش حول محورهای طولی، عرضی و قائم) می‌باشد. با این حال، در سیستم‌های تثبیت موقعیت پویا، تمرکز اصلی بر حفظ موقعیت شناور در صفحه افقی است. حرکات عمودی مانند Roll، Pitch و heave معمولاً دارای دوره تناوب طبیعی کوتاهی بوده و خارج از پهنای باند کنترلی سیستم DP قرار دارند .بنابراین، یک مدل ساده‌شده با سه درجه آزادی که حرکات surge، sway و yaw را پوشش می‌دهد، برای این کاربرد کافی و مناسب است.

برای توصیف این حرکات از دو سیستم مختصات استفاده می‌شود (مطابق شکل ۵)، سیستم مختصات ثابت-زمین[8] (OXYZ) که یک سیستم اینرسی برای تعیین موقعیت و جهت مطلق شناور به کار می‌رود و سیستم مختصات متصل به بدنه[9] ($O\ x_1x_2x_6$) که یک سیستم غیر اینرسی که مبدأ آن در مرکز شناور قرار دارد و برای تحلیل نیروها و سرعت‌های نسبی شناور استفاده می‌شود.



شکل۵- سیستم مختصات[7]

۳-۲- فرضیات مدل‌سازی و سیستم مختصات

برای تدوین معادلات حرکت شناور، چند فرض ساده‌کننده به کار گرفته می‌شود:

۱) کشتی به صورت یک جسم صلب مدل‌سازی می‌شود و تغییر شکل بدنه در محاسبات نادیده گرفته می‌شود.
۲) نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه به شکل یکنواخت و پیوسته اعمال می‌گردند.
۳) مؤلفه سرعت جانبی نسبت به سرعت طولی کوچک است و در تحلیل‌ها به عنوان کم‌اهمیت در نظر گرفته می‌شود.
۴) ارتفاع متاسنتریک (GM) به اندازه کافی بزرگ فرض می‌شود، به گونه‌ای که پایداری جانبی تضمین شده و اثر متقابل حرکت رول بر دینامیک مانورپذیری ناچیز باشد.

۳-۳- معادله دینامیکی کلی شناور

مدل ریاضی که دینامیک فرکانس پایین شناور در صفحه افقی را توصیف می‌کند، با در نظر گرفتن اثرات جرم افزوده، به صورت معادله برداری زیر بیان می‌شود:

$$M\dot{v} + C(v)v + Dv = F_T + F_E \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱)،

$$v = [\dot{x_1}, \dot{x_2}, \dot{x_6}]^T \qquad (۲)$$

بردار سزعت ها در مرکز جرم شناور است.

$$F_E = [F_{1E}, F_{2E}, F_{6E}]^T \qquad (۳)$$

برابر نیروها و گشتاورهای محیطی (باد، جریان و موج)

$$F_T = [F_{1T}, F_{2T}, F_{6T}] \qquad (۴)$$

[7] Degree Of Freedom
[8] Earth-Fixed Frame
[9] Body-Fixed Frame

نیروها و گشتاورهای حاصل از رانشگرها، و M ماتریس جرم و جرم افزوده است که به صورت زیر تعریف شده است،

$$M = \begin{bmatrix} M + M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M + M_{22} & M_{x_G} + M_{26} \\ 0 & M_{x_G} + M_{26} & I_Z + M_{66} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$C(v)$ ماترس کوریولیس و گریز از مرکز است،

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(M_{x_G} + M_{26})\dot{x}_2 + (M_{x_G} + M_{26})\dot{x}_6 \\ 0 & 0 & M_{x_G} + M_{26} \\ 0 & 0 & I_Z + M_{66} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

D ماتریس دمپینگ است که نیروها و گشتاورهای میراکننده هیدرودینامیکی را مدل می‌کند. این نیروها شامل اثرات ویسکوز و میرایی ناشی از تابش موج[10] هستند و همیشه در خلاف جهت حرکت عمل می‌کنند،

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

با حل رابطه (۱) طبق پارامترهای (۲ تا ۶)، شتاب‌ها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\dot{v} = M^{-1}((F_E + F_T) - C(v)v - Dv) \quad (۸)$$

ارتباط بین دستگاه مختصات بدنه و دستگاه زمین‌ثابت توسط ماتریس تبدیل $J(\psi)$ تعریف می‌شود:

$$\dot{\eta} = J(\psi)v \quad (۹)$$

که در آن:

$$J(\psi) = \begin{bmatrix} 0 & -sin\,\psi & cos\,\psi \\ 0 & cos\,\psi & sin\,\psi \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

که در آن $\eta = [X, Y, \psi]^T$ بیانگر موقعیت و زاویه سمت کشتی در دستگاه زمین‌ثابت است. در نهایت، مدل سه درجه آزادی کشتی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{\eta} = f(\eta, \dot{\eta}) + B_T(\eta)F \quad (۱۱)$$

که در آن $f(\eta, \dot{\eta})$ شامل دینامیک غیرخطی ناشی از اینرسی و نیروهای محیطی است و $B(\eta)$ ماتریس تبدیل نیروهای رانشگر به دستگاه مختصات زمین‌ثابت می‌باشد.

۳-۴- مدل سازی نیرو های محیطی

یکی از اصلی‌ترین عوامل محیطی که بر پایداری شناور تأثیر می‌گذارد، باد و جریان است. نیروی باد بر روی بدنه باعث ایجاد مؤلفه‌های نیرو در راستای طولی و عرضی و همچنین گشتاور حول محور قائم می‌شود. این نیروها معمولاً با استفاده از روابط آیرودینامیکی زیر مدل‌سازی می‌شوند:

$$F_{1w} = \frac{1}{2}\rho_a\, C_{Xw}(\beta_w)\, A_F\, V^2 \quad (۱۲)$$

$$F_{2w} = \frac{1}{2}\rho_a\, C_{Yw}(\beta_w)\, A_L\, V^2 \quad (۱۳)$$

$$N_{6w} = \frac{1}{2}\rho_a\, C_{Nw}(\beta_w)\, A_L\, L\, V^2 \quad (۱۴)$$

که در رابطه (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)،

F_{1_w} و F_{2_w} به‌ترتیب مولفه‌های نیروی باد در راستای طولی و جانبی هستند.

N_{6w} گشتاور ناشی از باد در حول محور Yaw است.

ρ_w چگالی هوا،

V سرعت باد،

β_w زاویه برخورد باد نسبت به محور طولی شناور،

A_F سطح مقطع پیشانی شناور،

A_L سطح مقطع جانبی شناور،

L طول کشتی،

و C_{XW}, C_{YW}, C_{NW} ضرایب آیرودینامیکی هستند که وابسته به زاویه باد می‌باشند. برای محاسبه نیروی جریان آب، مشابه روابط ۱۴-۱۲ محاسبه ی نیروی باد از روابط فشار وارد بر جسم در سیال استفاده شده است. به این ترتیب، تأثیر باد و جریان بر شناور از طریق نیروهای خطی در دو راستا و یک گشتاور دورانی در نظر گرفته می‌شود و سپس در معادلات حرکت کل سیستم (معادلات حاکم) وارد می‌گردد.

۳-۵- مدلسازی رانشگر ها

در سیستم‌های تثبیت موقعیت پویا، بخش مدل‌سازی رانشگرها پل ارتباطی بین خروجی کنترلر (نیروها و گشتاورهای مطلوب برای کنترل حرکت شناور) و ورودی‌های فیزیکی سیستم (مانند سرعت چرخش پروانه‌ها) است. یک مدل دقیق از رانشگر برای شبیه‌سازی دقیق و طراحی مؤثر کنترلر ضروری است. این مدل‌ها به طور کلی شامل دو جزء اصلی مدل غیرخطی پروانه و ماتریس توزیع رانشگر می‌باشد.

نیروی رانش تولید شده توسط یک پروانه به سرعت چرخش پروانه و سرعت جریان آب ورودی بستگی دارد. در مدل‌های ساده، این نیرو به صورت تابعی از مربع سرعت چرخش مدل می‌شود:

$$T = K_T\, \rho D^4\, \omega|\omega| \quad (۱۵)$$

که در آن:

[10] wave radiation damping

T نیروی تولیدی تراستر ها،

K_T ضریب تراست پروانه،

ρ چگالی سیال،

D قطر پروانه،

ω سرعت زاویه ای پروانه (رادیان بر ثانیه).

این مدل برای سادگی فرض می‌کند که سرعت جریان ورودی به پروانه ناچیز است. در مدل‌های پیشرفته‌تر، برای در نظر گرفتن اثرات جریان ورودی (که ناشی از حرکت خود شناور یا جریان‌های محیطی است)، رابطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \rho\, n^2\, D^4\, K_T\, J \qquad (۱۶)$$

که در آن :

n سرعت چرخش پروانه بر حسب دور بر ثانیه،

J ضریب پیشروی که نسبت سرعت ورودی به سرعت پروانه است:

$$J = \frac{V_a}{n\, D} \qquad (۱۷)$$

که در آن V_a سرعت ورودی شناور است.

با استفاده از این روابط، می‌توان نیروی رانش مورد نیاز را به سرعت چرخش پروانه تبدیل کرد و محدودیت‌های فیزیکی (مانند حداکثر سرعت چرخش و حداکثر نیروی رانش) را به طور دقیق در نظر گرفت. در مدل شبیه سازی شده محدودیت نیروهای تولیدی توسط پروانه اصلی و تراستر های عرضی اعمال شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است:

جدول ۲ – محدودیت های رانشگر های مدل [7]

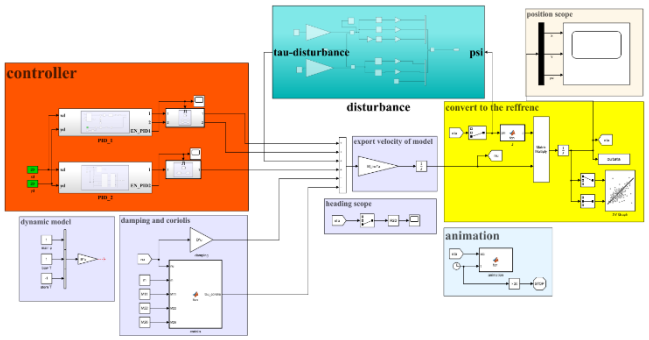
رانشگر / محدودیت	بیشترین نیروی تولیدی (N)	کمترین نیروی تولیدی (N)
پروانه اصلی	+۵/۴	-۴/۹
رانشگر سینه	+۰/۳	-۰/۵
رانشگر پاشنه	+۰/۳	-۰/۵

این محدودیت ها با استناد از مدل واقعی تراستر های مورد استفاده در پژوهش تانوری و همکاران[3] در نظر گرفته شده است و به واقعیت شبیه سازی کمک می‌کند. بخش کنترلر، شامل دو کنترلر (PD و PID) است. این بخش مسئولیت کنترل موقعیت و جهت شناور را بر عهده دارد. کنترلر با دریافت سیگنال‌های خطا (تفاوت بین موقعیت مطلوب و موقعیت فعلی)، فرمان‌های کنترلی مناسب را برای محرک‌های شناور تولید می‌کنند. کنترلر اول در فواصل بیشتر از ۵ برابر طول شناور با استفاده از یک سیستم کنترلی ساده تر و با دقت کمتر به مسیریابی و اعمال نیرو های متناظر می‌پردازد. کنترلر دوم نیز در نزدیکی نقطه هدف فعال شده و دقت سیستم را در مسیر و جهت یابی افزایش میدهد و در نهایت با هزینه و انرژی کمتر شناور در موقعیت هدف قرار می‌گیرد.

۱– شبیه سازی نرم افزاری

مدل شبیه‌سازی شده در سیمولینک متلب، مطابق شکل ۶، از سه بخش اصلی تشکیل شده است که شامل مدل دینامیکی، کنترل‌کننده و نیروهای محیطی است. سیستم کنترل دو مرحله ای وظیفه کنترل موقعیت و سمت شناور را عهده دار است (بلوک نارنجی رنگ). بخش نیروهای محیطی، اثرات محیطی مانند امواج، باد و جریان‌های دریایی را بر شناور شبیه‌سازی می‌کند. این نیروهای خارجی می‌توانند باعث انحراف شناور از مسیر مطلوب شوند. مدل‌سازی دقیق این اثرات برای طراحی کنترلر ضروری است تا سیستم بتواند در شرایط واقعی دریایی به خوبی عمل کند.

بخش مدل دینامیکی، معادلات دینامیکی حرکت شناور را شبیه‌سازی می‌کند. بخش اثرات میرایی و نیروهای کوریولیس را که در حرکت شناور در آب مهم هستند نیز، در این بخش مدل‌سازی شده است.



شکل۶- روش شبیه سازی در نرم افزار متلب

۴-۱- بررسی صحت عملکرد مدل‌دینامیکی

جهت صحت سنجی مدل دینامیکی ایجاد شده سناریو های مانور طبق جدول ۳ طراحی شده است:

جدول ۳ – سناریو های مانور مدل دینامیکی

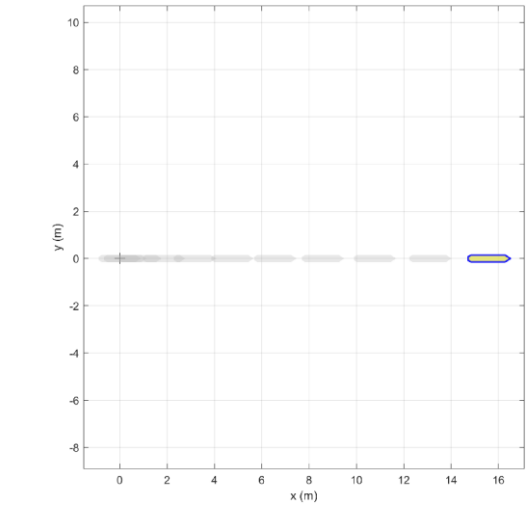
نیروی وارده (N)	سناریو			
	۱	۲	۳	۴
پروانه اصلی	+۱	۰	۰	۰
رانشگر سینه	۰	+۰/۳	+۰/۳	+۰/۳
رانشگر پاشنه	۰	۰	+۰/۳	-۰/۳

تمامی شبیه سازی ها در بازه ۴۰ ثانیه ای انجام شد تا شناور به حالت سرعت حداکثری و پایدار خود در هر سناریو برسد و از فاز شتاب گیری خارج شود، همچنین در تمامی سناریو ها شناور ابتدا در نقطه (۰و۰) و با هدینگ صفر نسبت به جهت مثبت محور X قرار گرفته است.

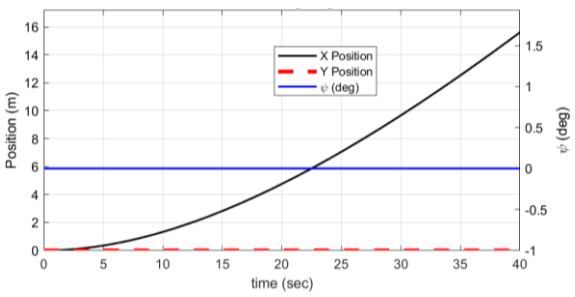
نتایج حاصل از سناریوی ۱، که به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی پایه مدل در حرکت مستقیم طراحی شده و در آن تنها نیروی رانش طولی به میزان ۱ نیوتن اعمال می‌شود، در شکل ۸ نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، شناور یک مسیر کاملاً مستقیم را در راستای محور X طی می‌کند و هیچ‌گونه انحراف جانبی قابل ملاحظه‌ای در آن دیده نمی‌شود. این رفتار نشان‌دهنده شبیه‌سازی صحیح دینامیک غیرکوپل بین حرکات طولی و جانبی برای این حالت متقارن است که با ساختار ماتریس‌های جرم و میرایی در مدل ریاضی مطابقت دارد.

نمودار ۷-ب دینامیک شتاب‌گیری شناور را به تصویر می‌کشد. ماهیت غیرخطی این نمودار، تأثیر نیروهای مقاوم هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد. در ابتدای حرکت، شتاب شناور بیشینه است، اما با افزایش سرعت، نیروهای مقاوم افزایش یافته و با نیروی ثابت رانش مقابله می‌کند. این امر موجب کاهش تدریجی شتاب می‌شود تا زمانی که شناور به سرعت نهایی خود نزدیک شود. ثابت ماندن زاویه Yaw در مقدار صفر در تمام طول شبیه‌سازی، صحت محاسبات مربوط به گشتاورهای دورانی را تأیید می‌کند.



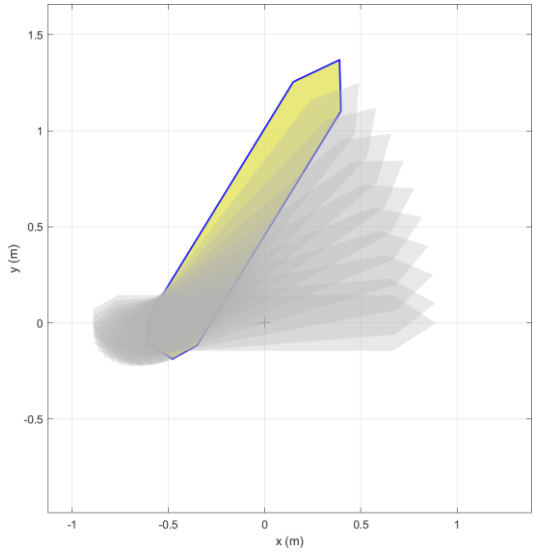
(الف)



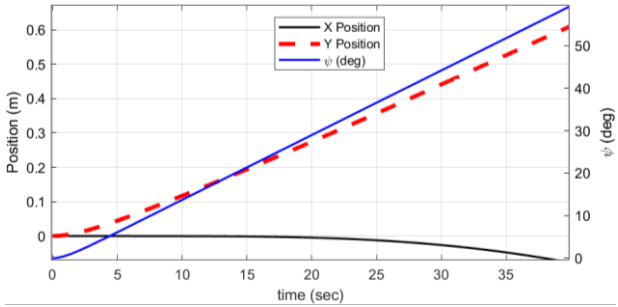
(ب)

شکل۷- نتایج شبیه سازی سناریو۱ صحت عملکرد مدل دینامیکی. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Y و ψ.

در سناریوی۲، به منظور ارزیابی کوپلینگ دینامیکی بین حرکات جانبی و دورانی، تنها رانشگر سینه با نیروی ۰/۳+ نیوتن اعمال شده است. نتایج این شبیه‌سازی، که در شکل ۸ نشان داده شده است، به خوبی توانایی مدل در بازتولید مانورهای پیچیده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸-الف نمایش داده شده است، مسیر منحنی حرکت شناور، نشان دهنده ی تولید همزمان حرکت جانبی و دوران است. از آنجا که نیروی رانشگر سینه با فاصله از مرکز جرم شناور اعمال می‌شود، علاوه بر نیروی عرضی، یک گشتاور زاویه ای نیز تولید می‌کند که منجر به چرخش شناور حول محور قائم خود می‌شود. در شکل ۸-ب نمودار زاویه ψ پس از یک فاز گذرا در ۳ ثانیه اول شبیه سازی، یک شیب خطی و ثابت به خود می‌گیرد. این رفتار خطی به معنای دستیابی شناور به یک نرخ چرخش زاویه‌ای پایدار است. این حالت زمانی رخ می‌دهد که گشتاور تولیدی توسط رانشگر با گشتاور مقاوم میرایی هیدرودینامیکی به تعادل می‌رسد.



(الف)

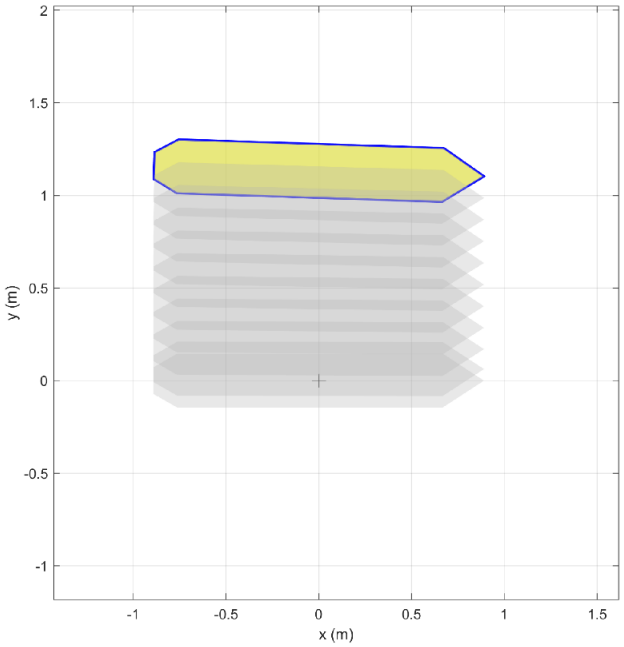


(ب)

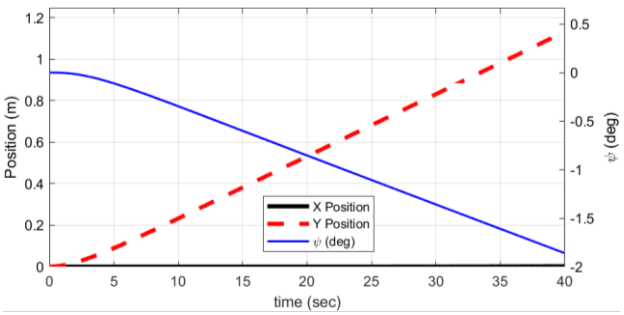
شکل۸- نتایج شبیه سازی سناریو۲ صحت عملکرد مدل دینامیکی. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Y و ψ.

در سناریوی ۳، عملکرد مدل در شبیه‌سازی حرکت جانبی خالص مورد ارزیابی قرار گرفت. در این حالت، نیروی رانشگرهای سینه و پاشنه هر دو به میزان ۰/۳+ نیوتن و در جهت اعمال نیرو در راستای منفی محور y تنظیم شدند تا شناور در جهت مثبت این محور حرکت کند، در حالی که پروانه اصلی غیرفعال است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۹ نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۹-الف نشان داده شده است، مسیر حرکت شناور یک خط مستقیم و کاملاً منطبق بر محور y است. این موضوع نشان می‌دهد که اعمال نیروهای عرضی، منجر به یک حرکت انتقالی جانبی خالص شده و هیچ‌گونه حرکت طولی ناخواسته‌ای در مدل ایجاد نشده است، انحراف زاویه ای اندکی که در شکل ۹- ب مشاهده میشود به علت صلبیت بالای پاشنه نسبت به سینه شناور بوده و در واقع به دقت مدلسازی فیزیک مسئله اشاره دارد.



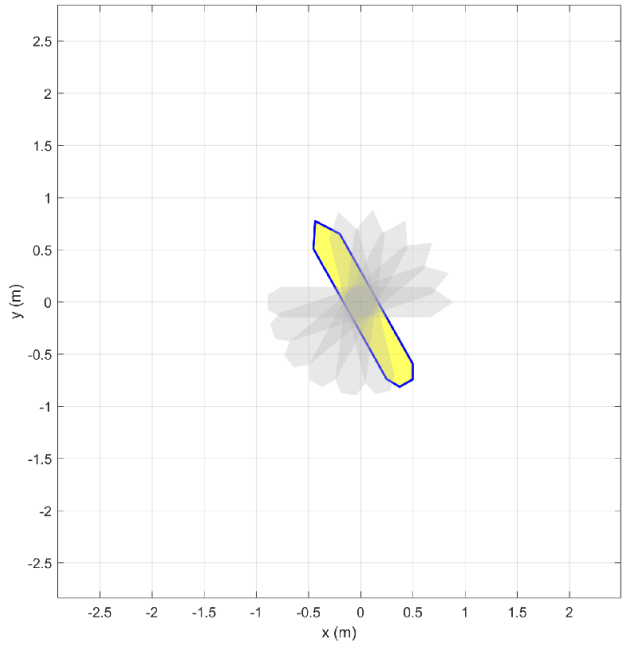
(الف)



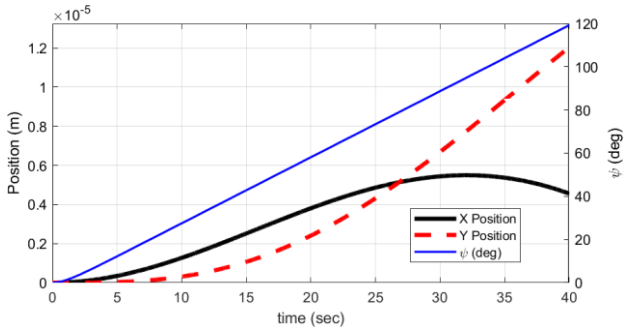
(ب)

شکل۹- نتایج شبیه سازی سناریو۳ صحت عملکرد مدل دینامیکی. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Y وψ.

سناریوی چهارم به منظور ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی مانور چرخش خالص درجا طراحی شده است. در این حالت، رانشگرهای سینه و پاشنه با اعمال نیروهای مساوی و در خلاف جهت (به ترتیب ۰/۳+ و ۰/۳- نیوتن) یک زوج نیروی کوپل ایجاد می‌کنند. نتایج این شبیه‌سازی که در شکل ۱۰ ارائه شده، صحت مدل‌سازی گشتاورهای دورانی را تأیید می‌کند. شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد که مرکز شناور تقریباً در مبدأ مختصات ثابت باقی مانده و تنها دوران حول محور قائم خود را تجربه می‌کند. این رفتار به درستی نشان می‌دهد که جمع برداری نیروهای جانبی اعمال‌شده صفر بوده و در نتیجه، هیچ‌گونه حرکت انتقالی جانبی قابل توجهی ایجاد نشده است. شکل ۱۰-ب نشان می‌دهد که جابجایی‌های X و Y در طول شبیه‌سازی ناچیز بوده‌اند. این پدیده اثبات می‌کند که گشتاور خالص، بدون نیروی جانبی ناخواسته، منجر به دوران شده است. افزایش خطی زاویه هدینگ، بیانگر نرخ چرخش زاویه‌ای پایدار و ثابت است که با تعادل نیروها در شرایط واقعی مطابقت دارد.



(الف)



(ب)

شکل۱۰- نتایج شبیه سازی سناریو۴ صحت عملکرد مدل دینامیکی. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Y وψ.

۴-۲- بررسی عملکرد سیستم

دراین پژوهش همانطور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، چهار سناریوی متفاوت برای سنجش عملکرد سیستم رانش تحت شرایط محیطی دریا (باد و جریان آب) تعریف شده است. این سناریوها علاوه بر تعیین محدوده عملیاتی سیستم در برابر این عوامل، توانایی سیستم در حفظ جهت‌گیری هنگام توقف را نیز بررسی می‌کنند.

جدول ۴ – سناریو های شبیه سازی سیستم موقعیت یابی پویا

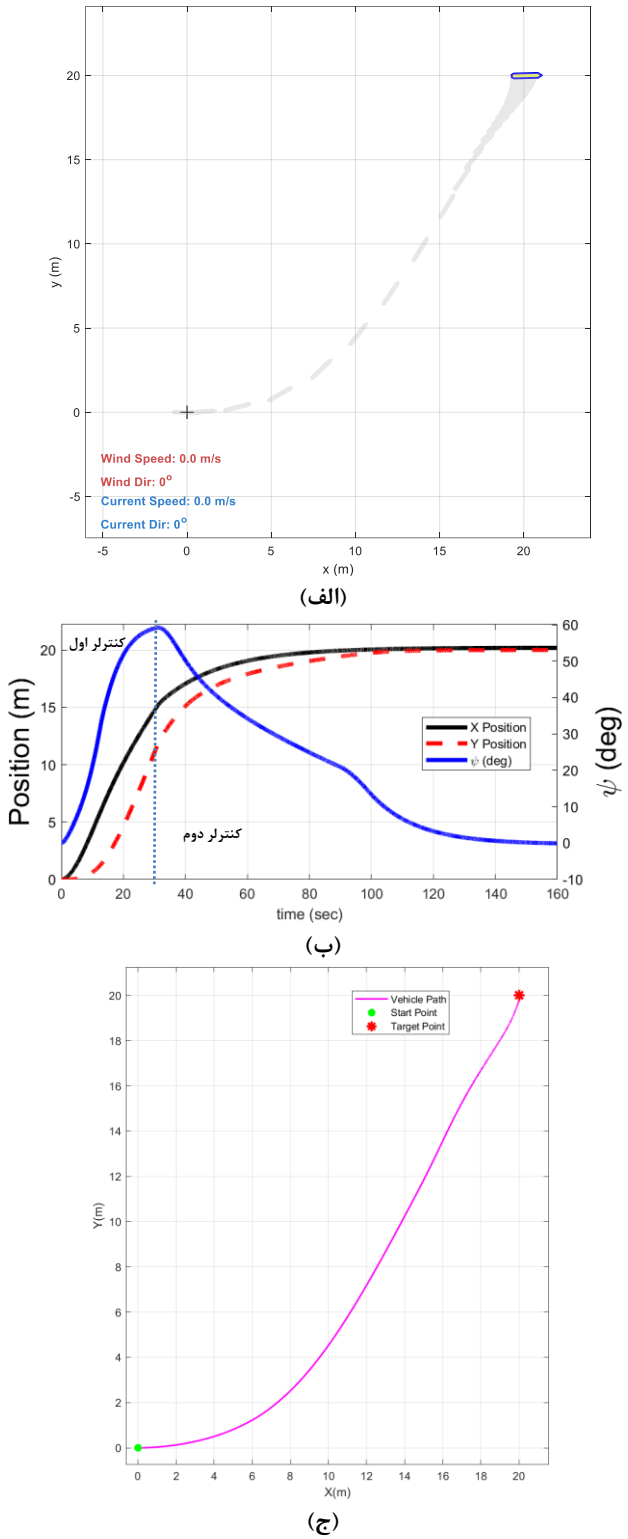
موقعیت هدف، اثرات محیطی	سناریو ۱	۲	۳	۴
[m] $X_{Desired}$	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
[m] $Y_{Desired}$	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
[deg] $\psi_{Desired}$	۰	۹۰	۰	۴۵
سرعت باد [m/s]	۰	۰	۱/۸۰	۱/۰
سرعت جریان [m/s]	۰	۰	۰	۰/۱۰

جهت باد در سناریو ۳و ۴، ۹۰ درجه و جهت جریان آب در سناریوی ۴، ۴۵ درجه نسبت به محور X هاست. شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی سناریوی اول را نمایش می‌دهد که عملکرد موفقیت‌آمیز سیستم کنترل دو مرحله‌ای موقعیت‌یابی پویا را در شرایط بدون اغتشاش ارزیابی می‌کند. هدف در این سناریو، رساندن شناور به موقعیت نهایی (۲۰،۲۰) متر با هدینگ صفر درجه بوده است.

همانطور که در نمودارهای مسیر حرکت شناور (شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ج) مشهود است، فرآیند ناوبری به دو فاز مجزا تقسیم می‌شود، فاز اولیه موسوم به مسیر یابی (Path Following) که کنترلر اول وظیفه ی هدایت سیستم را به عهده دارد و به دنبال آن، فاز دوم که بخش تثبیت موقعیت (Dynamic Positioning) شناور را با دقت بالا به سمت هدف هدایت میکند.

در فاز اول در ابتدای حرکت که شناور در فاصله دوری از هدف قرار دارد، کنترلر PD فعال است. این کنترلر با انجام یک چرخش موقت تا حداکثر ۵۸ درجه، مسیر شناور را بهینه‌سازی می‌کند تا با سرعت و کارایی بیشتری به محدوده هدف نزدیک شود. هدف اصلی در این فاز، رسیدن سریع به نزدیکی نقطه پایانی با حداقل مصرف انرژی است. در فاز دوم پس از ورود شناور به محدوده نزدیک هدف (فاصله کمتر از ۵ متر با نقطه هدف)، سیستم کنترل به صورت خودکار به فاز دوم وارد شده و کنترلر PID فعال می‌گردد. در این مرحله، شناور با دقت بالا به سمت موقعیت نهایی (۲۰،۲۰) متر و هدینگ نهایی (صفر درجه) نسبت به جهت مثبت محور X هدایت می‌شود.

تحلیل نمودار موقعیت در حالت پایا نشان می‌دهد که هیچ‌گونه فراجهش[11] یا نوسانی در مسیر وجود ندارد. این امر، پایداری بالای سیستم و تنظیمات دقیق ضرایب کنترلر PID را برای دستیابی به دقت مورد نیاز در عملیات موقعیت‌یابی پویا تأیید می‌کند. Settling Time مؤثر سیستم حدود ۱۰۰ ثانیه است که نشان‌دهنده انتقال نرم و عملکرد یکپارچه بین دو فاز کنترلی می‌باشد.



شکل۱۱- نتایج شبیه سازی سناریو ۱ سیستم موقعیت یابی پویا. الف) نمایش انیمیشن موقعیت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Yوψ. ج) مسیر حرکت شناور در محور x-y در طول شبیه سازی.

[11] Overshoot

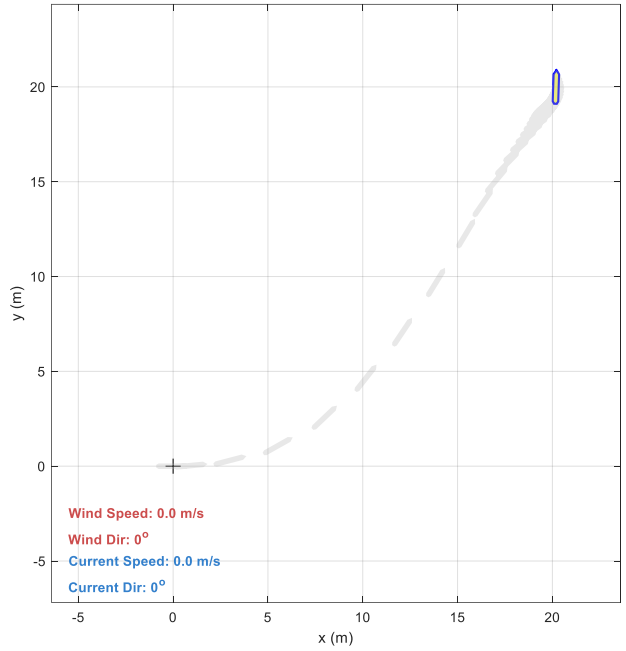
سناریوی دوم، قابلیت سیستم را در دستیابی همزمان به یک موقعیت هدف (۲۰,۲۰) متر و یک هدینگ نهایی مشخص (۹۰ درجه)، در غیاب اغتشاشات محیطی، ارزیابی می‌کند.

نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۱۲ ارائه شده است. نمودار مسیر شناور (شکل ۱۲-ب) یک مسیر منحنی و بهینه را نشان می‌دهد. برخلاف حرکت در یک خط مستقیم، سیستم کنترل به طور هوشمندانه حرکت انتقالی (رسیدن به نقطه ۲۰,۲۰) و حرکت دورانی (تغییر هدینگ از ۰ به ۹۰ درجه) را با یکدیگر ترکیب می‌کند .این رفتار نشان‌دهنده توانایی کنترلر در مدیریت دینامیک کوپل‌شده شناور است؛ جایی که نیروی اعمال‌شده برای چرخش، بر موقعیت خطی نیز تأثیر می‌گذارد و بالعکس.

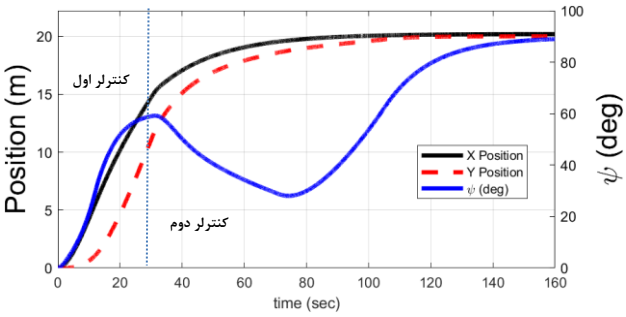
نمودار موقعیت در راستای محورهای X و Y (شکل ۱۲-ج) نشان می‌دهند که شناور با پایداری بالا و بدون فراجهش قابل توجه به موقعیت نهایی خود می‌رسد. همگرایی نرم و سریع به مقادیر نهایی ۲۰ متر در هر دو محور، بیانگر تنظیم دقیق پارامترهای کنترلر برای فاز تثبیت موقعیت است. عدم وجود نوسان در حالت پایا، دقت بالای سیستم در حفظ موقعیت را تأیید می‌کند.

مهم‌ترین جنبه این سناریو، ارزیابی عملکرد سیستم در تغییر جهت شناور است. نمودار زاویه هدینگ (شکل ۱۲-ب) نشان می‌دهد که شناور به صورت روان، زاویه خود را از صفر درجه اولیه به ۹۰ درجه نهایی افزایش می‌دهد. وجود یک فراجهش جزئی و کاملاً میرا شده در ابتدای رسیدن به هدینگ هدف، نشان‌دهنده پاسخ سریع و در عین حال پایدار سیستم کنترل است. این رفتار مطلوب تضمین می‌کند که شناور ضمن چرخش سریع، دچار نوسانات ناخواسته و ماندگار نمی‌شود.

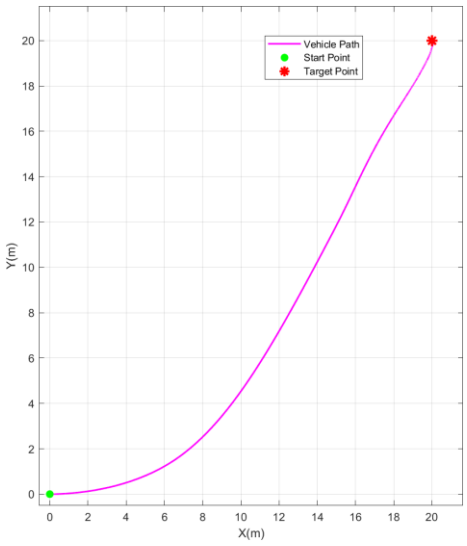
در مجموع، نتایج سناریوی دوم به وضوح نشان می‌دهد که سیستم کنترل طراحی‌شده نه تنها در رسیدن به یک نقطه ثابت، بلکه در دستیابی به یک حالت نهایی کامل (موقعیت و جهت‌گیری) نیز بسیار کارآمد عمل می‌کند. عملکرد موفقیت‌آمیز در این سناریو، قابلیت اطمینان سیستم را برای اجرای مأموریت‌های پیچیده‌تر که نیازمند جهت‌گیری دقیق شناور هستند، اثبات می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۱۲- نتایج شبیه سازی سناریو ۲ سیستم موقعیت یابی پویا. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Yوψ. ج) مسیر حرکت شناور در محور x-y در طول شبیه سازی.

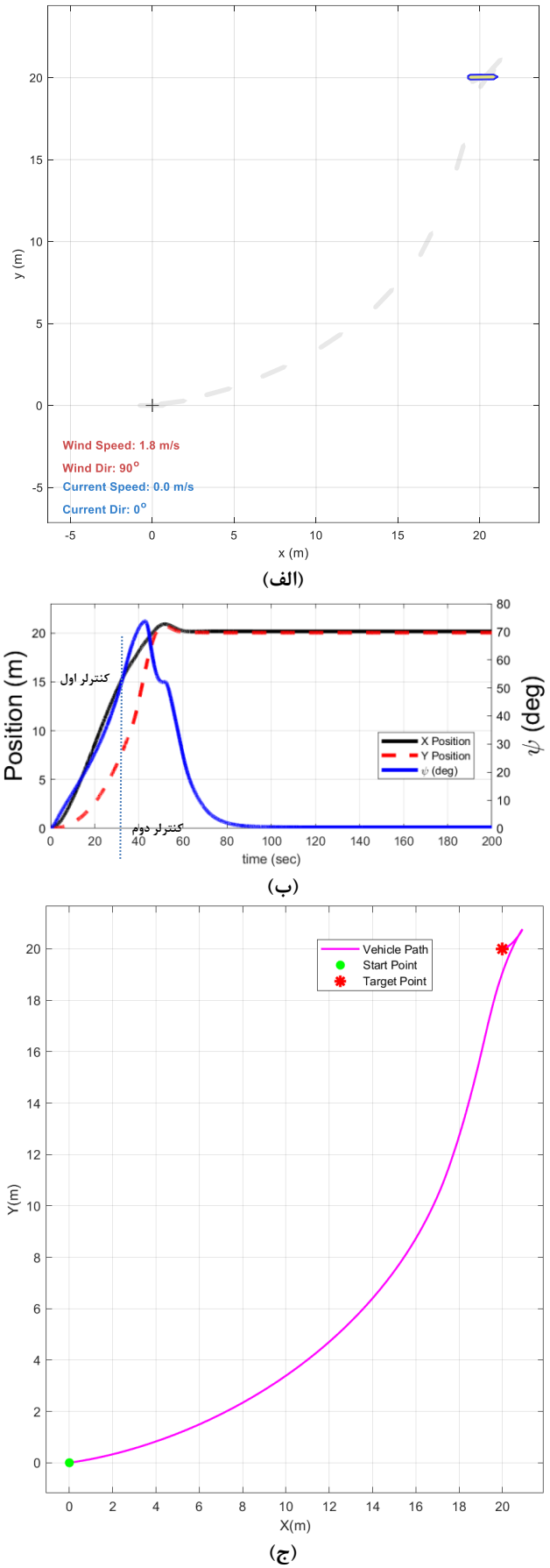
در سناریوی سوم، عملکرد مقاوم سیستم موقعیت‌یابی پویا در حضور یک اغتشاش محیطی ثابت ارزیابی می‌شود. در این شبیه‌سازی، شناور تحت تأثیر بادی با سرعت ۱/۸ متر بر ثانیه قرار دارد که از جهت ۹۰ درجه (عمود بر محور طولی شناور) می‌وزد. هدف، همچنان رسیدن به موقعیت (۲۰,۲۰) با هدینگ صفر درجه است. نتایج این سناریو در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

مسیر حرکت شناور (شکل ۱۳-ب و ۱۳-د) نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود نیروی جانبی مداوم ناشی از باد، سیستم کنترل با موفقیت شناور را به نقطه هدف هدایت می‌کند. مقایسه این مسیر با سناریوی اول (بدون اغتشاش) نشان‌دهنده عملکرد جبرانی کنترلر است. برای مقابله با رانش جانبی ناشی از باد، سیستم رانشگرها به طور پیوسته نیرویی در جهت مخالف تولید می‌کنند تا شناور از مسیر مطلوب منحرف نشود.

نمودارهای موقعیت در راستای X و Y (شکل ۱۳-د) به وضوح نشان می‌دهند که شناور با دقت بالا در موقعیت نهایی (۲۰,۲۰) تثبیت می‌شود. نکته کلیدی در این نمودارها، عدم وجود خطای حالت ماندگار است. این امر نشان‌دهنده عملکرد مؤثر جزء انتگرال‌گیر کنترلر PID است که وظیفه اصلی آن، حذف خطاهای ناشی از اغتشاشات ثابت و پایدار مانند نیروی باد است. بدون این عملکرد، باد باعث انحراف دائمی شناور از موقعیت هدف می‌شد.

از آنجایی که باد با زاویه ۹۰ درجه به بدنه شناور برخورد می‌کند، علاوه بر نیروی جانبی، یک گشتاور دورانی نیز ایجاد می‌کند که تمایل به چرخاندن شناور دارد. نمودار زاویه هدینگ (شکل ۱۳-ج) نشان می‌دهد که سیستم کنترل با موفقیت بر این گشتاور غلبه کرده و هدینگ شناور را پس از فاز مانور اولیه، روی صفر درجه ثابت نگه می‌دارد. این پایداری نشان می‌دهد که کنترلر به طور فعال گشتاور جبرانی لازم را برای حفظ جهت‌گیری صحیح تولید می‌کند.

در مجموع، نتایج سناریوی سوم، مقاومت سیستم کنترل را در برابر اغتشاشات محیطی اثبات می‌کند. سیستم نه تنها به موقعیت و هدینگ هدف دست می‌یابد، بلکه قادر است با تولید نیروها و گشتاورهای جبرانی مداوم، موقعیت خود را با دقت بالا در حضور نیروهای خارجی حفظ کند. این قابلیت برای عملکرد ایمن و مؤثر شناور در شرایط واقعی دریا ضروری است.

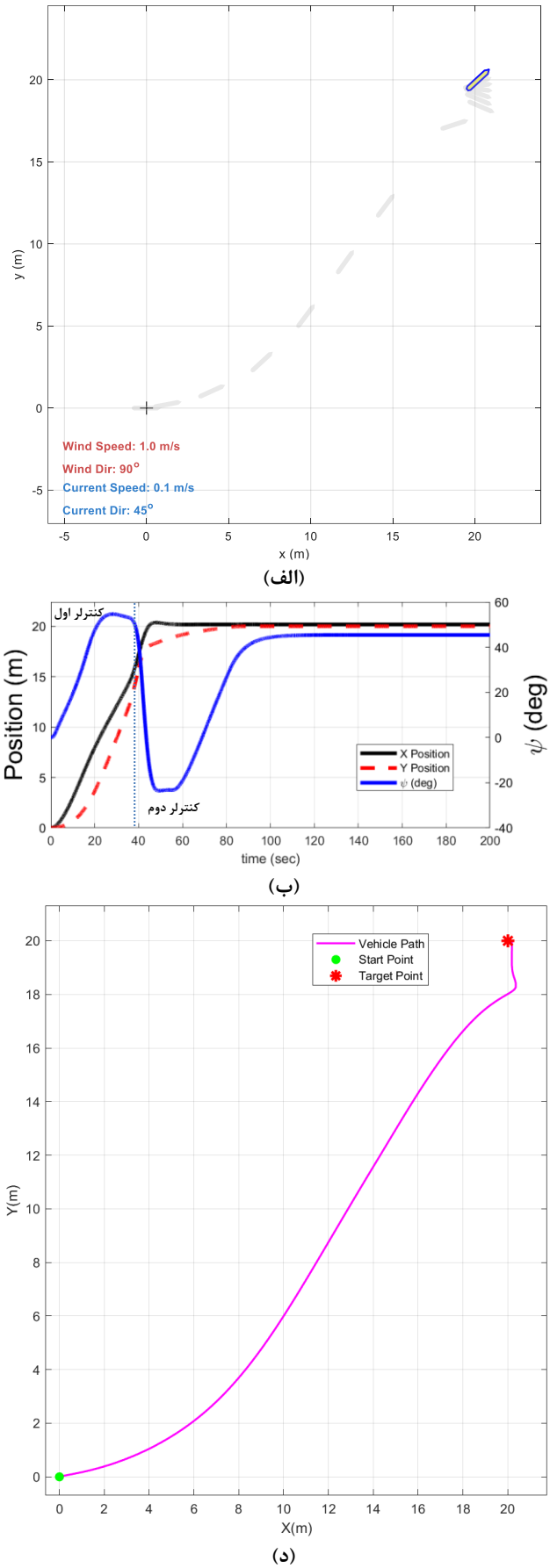


شکل۱۳- نتایج شبیه سازی سناریو ۳ سیستم موقعیت یابی پویا. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Yوψ. ج) مسیر حرکت شناور در محور x-y در طول شبیه سازی.

سناریوی چهارم به عنوان جامع‌ترین و چالش‌برانگیزترین آزمون، عملکرد سیستم DP را در شرایطی نزدیک به واقعیت ارزیابی می‌کند. در این سناریو، شناور باید به موقعیت هدف (۲۰،۲۰) و هدینگ ۴۵ درجه دست یابد، در حالی که به طور همزمان تحت تأثیر دو اغتشاش محیطی غیرهم‌راستا قرار دارد. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۱۴ ارائه شده است.

نکته برجسته و جدید در این سناریو، وجود دو نیروی اغتشاشی با جهات مختلف است. این وضعیت، کنترلر را وادار می‌کند تا به جای مقابله با یک نیروی ساده، برآیند نیروها و گشتاورهای ناشی از باد و جریان را محاسبه کرده و به صورت پیوسته یک پاسخ کنترلی بهینه برای خنثی‌سازی آن‌ها تولید کند. مسیر منحنی و نرمی که در شکل ۱۴-ب مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده توانایی بالای سیستم در مدیریت این بار محیطی پیچیده و هدایت شناور به سمت هدف با یک مانور کارآمد است. یکی از دشوارترین وظایف در این سناریو، تثبیت شناور بر روی هدینگ ۴۵ درجه است. در این حالت، جریان آب تقریباً از روبرو به شناور برخورد می‌کند، در حالی که باد به صورت جانبی به بدنه نیرو وارد می‌کند. نمودار زاویه هدینگ (شکل ۱۴-ب) نشان می‌دهد که کنترلر با موفقیت شناور را به زاویه ۴۵ درجه رسانده و آن را با پایداری کامل در همین جهت نگه می‌دارد. این امر اثبات می‌کند که سیستم رانشگرها به طور مداوم در حال تولید یک گشتاور جبرانی دقیق برای مقابله با گشتاور دورانی ناشی از نیروی باد هستند.

شکل ۱۴-ج همگرایی موفقیت‌آمیز به نقطه هدف (۲۰،۲۰) را نمایش می‌دهد. نکته قابل توجه، وجود فراجهش بسیار جزئی در راستای محور Y است. این فراجهش کوچک، که به سرعت میرا شده و از بین می‌رود، پیامد طبیعی مقابله سیستم با نیروهای پیچیده و متغیر است و نشان می‌دهد که کنترلر ضمن حفظ پایداری، پاسخی سریع ارائه می‌دهد. مهم‌تر از آن، عدم وجود خطای حالت ماندگار در موقعیت نهایی، عملکرد بی‌نقص جزء انتگرال‌گیر کنترلر را حتی در حضور اغتشاشات مرکب تأیید می‌کند. در مجموع، سناریوی چهارم قابلیت اطمینان بالای سیستم کنترل طراحی‌شده را در یک محیط عملیاتی واقع‌گرایانه به اثبات می‌رساند. توانایی سیستم در دستیابی و حفظ یک حالت پایدار مشخص (موقعیت و هدینگ) تحت تأثیر بارهای محیطی چندگانه و غیرهم‌راستا، نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم کنترلی است.



شکل۱۴- نتایج شبیه سازی سناریو ۴ سیستم موقعیت یابی پویا. الف) نمایش انیمیشن حرکت شناور. ب) حرکت شناور در راستای X،Yوψ. د) مسیر حرکت شناور در محور x-y در طول شبیه سازی.

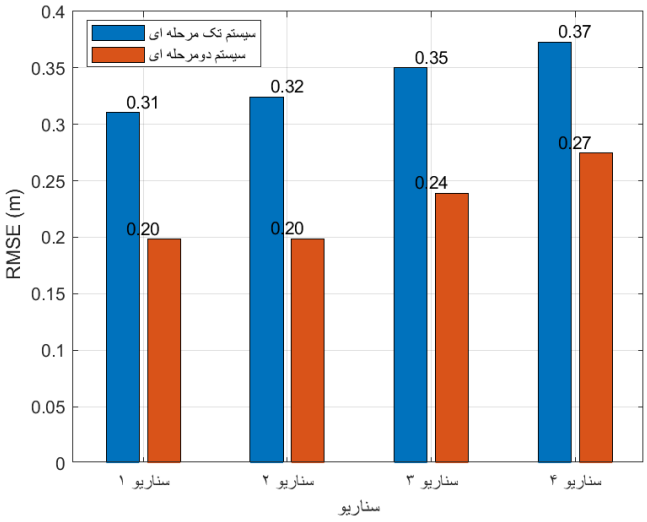
جدول ۵ – خطای سناریوهای شبیه سازی

خطای شبیه سازی در راستای:	سناریو ۱	۲	۳	۴
Error X [m]	۰/۱۰۳	۰/۱۹۲	۰/۱۷۷	۰/۱۸۵
Error Y [m]	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۳۸	-۰/۰۰۷
Error Ψ [deg]	-۰/۰۸	۰/۲۴۰	۰/۲۹۰	-۰/۲۲۳

همانطور که پیشتر در متن و همینطور در جدول۵ اشاره شده است خطای شبیه سازی ها در محدوده سانتی متری بوده و با در نظر گرفتن طول شناور خطاها در محدوده مناسبی نسبت به مقیاس اصلی قرار میگیرند.

۴-۳- مقایسه عملکرد کنترلر دومرحله ای با کنترلر PID

جهت تأیید کارایی و عملکرد، سیستم کنترلی دومرحله‌ای پیشنهادی در چهار سناریوی شبیه‌سازی با یک کنترل‌کننده PID تک‌مرحله‌ای، مقایسه شد. شاخص میانگین مجذور خطا (RMSE[12]) موقعیت به عنوان معیار اصلی ارزیابی انتخاب گردید، زیرا این شاخص معیار دقیقی برای سنجش انحراف متوسط موقعیت در طول کل مسیر است.



شکل ۱۵- مقایسه RSME سیستم دومرحله ای با یک سیستم PID تک مرحله ای

در شکل ۱۵، نتایج مقایسه‌ی RMSE موقعیت بین دو ساختار کنترلی نشان داده شده است. در تمام سناریوها، سیستم دومرحله‌ای به طور قاطع عملکرد بهتری را نسبت به کنترلر PID تک‌مرحله‌ای نشان می‌دهد. میزان RMSE سیستم دو مرحله ای به طور متوسط در حدود ۳۰٪ کمتر ازسیستم PID است. بیشترین میزان بهبود (تا ۳۷/۵٪) در سناریوهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. این نکته نشان می‌دهد که در شرایط عملیاتی استاندارد، جداسازی وظایف هدایت و کنترل، به دقت بالا تر منجر می‌شود.

بالا بودن مقدار RMSE در کنترلر PID تک‌مرحله‌ای (بین ۰/۳۱ تا ۰/۳۷ متر) حاکی از آن است که این کنترلر در ردیابی حالت‌های مطلوب و جبران اغتشاشات در طول حرکت، با چالش مواجه است. ساختار PID تک‌مرحله‌ای به دلیل تلاش برای برآوردن همزمان نیازهای هدایت و کنترل، حساسیت بالایی به کوپلینگ‌های دینامیکی شناور از خود نشان می‌دهد، که منجر به نوسانات بیشتر و در نتیجه RMSE بالاتر می‌شود.

ساختار دومرحله‌ای پیشنهادی، با واگذاری وظیفه تعیین هدینگ و سرعت مطلوب به الگوریتم دومرحله ای، وظیفه PID را صرفاً به اجرای دقیق فرامین موقعیت یابی محدود می‌کند. این جداسازی منطقی، مانع از تداخل وظایف شده و به کنترل‌کننده اجازه می‌دهد تا ورودی‌های کنترلی را با دقت بیشتری تولید کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه کنترل دومرحله‌ای با هدف ارتقاء همزمان دقت موقعیت‌یابی و کارایی عملیاتی سیستم تثبیت موقعیت پویا برای شناور مدل نفتکش KVLCC2 در سه درجه آزادی طراحی و شبیه‌سازی شد. این ساختار پیشنهادی، فاز هدایت مسیر (Path Following) را در فواصل بیش از ۵ متر از هدف با کنترلر PD، و فاز تثبیت موقعیت دقیق (Dynamic Positioning) را در محدوده کمتر از ۵ متر با کنترلر PID مدیریت می‌کند. مدل دینامیکی شناور در چهار سناریوی عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی، عملکرد پایدار، مقاوم و دقیق سیستم پیشنهادی را با معیارهای کمی زیر تأیید می‌کند:

- دقت نهایی تثبیت موقعیت: سامانه پیشنهادی در فاز DP و با شرایط نزدیک به حد بالای محدوده عملیاتی (باد ۱/۸ متر بر ثانیه و جریان ۰/۱ متر بر ثانیه)، موقعیت شناور را با حداکثر خطای ۱۹ سانتی متر در حالت ماندگار حفظ کرده است. این مقدار، که معادل ۱۰٪ طول شناور است، دقت تثبیت موقعیت در محیط‌های متلاطم را به‌صورت کمی نشان می‌دهد و گواهی بر عملکرد مطلوب سیستم در برابر اغتشاشات محیطی است.
- بهبود عملکرد: در سناریوهای با اغتشاشات محیطی، سیستم تثبیت موقعیت پیشنهادی با RMSE ۰/۲۷ متر، در مقایسه با یک کنترلر PID تک‌مرحله‌ای، به‌طور میانگین ۳۰٪ بهبود عملکرد در معیار RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) را بدست آورده است. این بهبود کمی، برتری ساختار دومرحله ای را در کاهش خطای ردیابی و افزایش پایداری دینامیکی اثبات می‌کند.

[12] Root Mean Square Error

- بهره‌وری انرژی و سرعت همگرایی: با استفاده از مکانیزم انتقال نرم بین فازها و محدودسازی فعال‌سازی سیستم DP دقیق به محدوده نهایی (شعاع ۵ متر)، مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی به‌طور مؤثری می‌یابد. علاوه بر این، در سناریوهای بدون اغتشاش، گذار نرم و همگرایی سریع از نقطه اولیه (۰،۰) به موقعیت هدف (۲۰،۲۰) متر مشاهده شد که نشان‌دهنده پاسخ دینامیکی سریع سیستم است.

در مجموع، این چارچوب کنترلی نوین با بهبود کمی ۳۰٪ در معیار عملکرد و تضمین حداکثر خطای تثبیت موقعیت ۱۹ سانتی متر، یک روش پایدار و مؤثر را برای افزایش دقت و کاهش هزینه‌های عملیاتی در سامانه‌های DP پیشرفته دریایی ارائه می‌دهد.

۶- مراجع

1- Lau, Y.Y., Chen, Q., Poo, M.C.P., Ng, A.K. and Ying,C.C., (2024). *Maritime transport resilience: A systematic literature review on the current state of the art, research agenda and future research directions*. Ocean & Coastal Management, 251, p.107086. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107086.

2- Huang, H.M., (2004). *Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework volume I: Terminology version 2.0.* https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1011-I-2.0

3- Sørensen, A.J., Sagatun, S.I. and Fossen, T.I., (1996). *Design of a dynamic positioning system using model-based control*. *Control Engineering Practice*, *4*(3), pp.359-368. https://doi.org/10.1016/09670661(96)00013-5

4- Peng, Z., Wang, D. and Wang, J., (2015). *Cooperative dynamic positioning of multiple marine offshore vessels: A modular design*. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 21(3), pp.1210-1221. https://doi.org/10.1016/09670661(96)00013-5

5- Gao, X. and Li, T., (2024). *Dynamic positioning control for marine crafts: a survey and recent advances*. Journal of Marine Science and Engineering, 12(3), p.362. https://doi.org/10.3390/jmse12030362

6- Li, J., Huang, W., Huang, C. and Zhang, G., (2025). *Enhancing Robust Adaptive Dynamic Positioning of Full-Actuated Surface Vessels: Reinforcement Learning Approach for Unknown Hydrodynamics*. Journal of Marine Science and Engineering, 13(5), p.993. https://doi.org/10.3390/jmse13050993

7- Tannuri, E.A., Agostinho, A.C., Morishita, H.M. and Moratelli Jr, L., (2010). *Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control*. Control engineering practice, 18(10),pp. 1121-1132. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.06.007

8- Fu, M., Ning, J. and Wei, Y., (2011*). Fault-tolerant control of dynamic positioning vessel by means of a virtual thruster*. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (pp. 1706-1710). https://doi.org/10.1109/ICMA.2011.5986367

9- Walmsness, J.E., Helgesen, H.H., Larsen, S., Kufoalor, G.K.M. and Johansen, T.A., (2023). *Automatic dock-to-dock control system for surface vessels using bumpless transfer*. Ocean Engineering, 268,p.113425. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114852

10- Agostinho, A.C., Moratelli Jr, L., Tannuri, E.A. and Morishita, H.M., (2009). *Sliding mode control applied to offshore dynamic positioning systems*. IFAC Proceedings Volumes, 42(18), pp.237-242. https://doi.org/10.3182/200909163BR3001.0009

11- Fu, M., Ning, J. and Wei, Y., (2011), *August. Fault-tolerant control of dynamic positioning vessel by means of a virtual thruster*. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (pp. 1706-1710). https://doi.org/10.1109/ICMA.2011.5986367

12- Seif, M.S., (2023). *Designing the way point tracking intelligent system for displacement vessels with considering nonlinear dynamics*. Journal Of Marine Engineering, 19(38), pp.155-167. (In Persian) http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.19.38.155

13- Najari, A. and Seif, M.S., (2025). *Dynamic modeling of surface vessel maneuvering based on deep learning using recurrent neural networks*. Journal Of Marine Engineering, 21(46), pp.80-88. (In Persian) http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.7