



A Robust Depth Control Approach for ROVs Based on System Identification

Alireza Houshmand Sarvestani^{*1} , Amirhossein Najari² , Mohammad Said Seif³

¹ M.sc student in ship architecture, Sharif University of technology, Tehran, Iran; Alireaz.houshmand@mech.sharif.edu

² Ph.D. candidate in Marine Engineering at Sharif University of Technology; amir.najari78@sharif.edu

³ Professor at the Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 Jun 2026

Last modification: 1 Oct 2026

Accepted: 4 Oct

Available online:

Article type:

Research paper

Keywords:

Remotely Operated Vehicle(ROV)

Robust H_∞ Control

System Identification

ABSTRACT

Precise control of underwater robots remains a major challenge due to nonlinear dynamics, modeling uncertainties, and environmental disturbances. This paper presents an integrated approach to ROV depth control that combines four-degree-of-freedom dynamic simulation, system dynamics identification, and robust control. First, the simulated model was excited using a frequency-sweep signal to identify a linear transfer function for vertical velocity. The resulting model achieved a fitting accuracy of 97.19% and a prediction accuracy above 86% on the evaluation data. Based on this model, an H_∞ robust controller was designed using a mixed-sensitivity framework, achieving a phase margin of 72° and a gain margin of 45 dB. Performance evaluation shows that the proposed closed-loop control system tracks a 0.6 m depth step command with a settling time of 5 s, zero overshoot, and zero steady-state error. Moreover, under severe vertical ocean-current disturbances with a force magnitude of 1 N, the maximum position error remained below 9 mm.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2026 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

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir



یک رویکرد کنترل مقاوم عمق برای ROV ها مبتنی بر شناسایی سیستم

علیرضا هوشمند سروستانی^{۱*}، امیرحسین نجاری^۲، محمد سعید سیف^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته معماری کشتی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، Alireaz.houshmand@mech.sharif.edu

^۲ دانشجوی دکتری رشته مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، amir.najari78@sharif.edu

^۳ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

چکیده

کنترل دقیق ربات‌های زیرسطحی به دلیل دینامیک غیرخطی، عدم قطعیت‌های مدل‌سازی و اغتشاشات محیطی یک چالش اساسی است. در این مقاله، یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر شبیه‌سازی دینامیکی در ۴ درجه آزادی، شناسایی دینامیک سیستم و کنترل مقاوم برای کنترل عمق یک ربات زیرسطحی ROV ارائه شده است. ابتدا با تحریک مدل شبیه‌سازی شده توسط سیگنال جاروی فرکانسی، تابع تبدیل خطی سرعت عمودی بادقت برازش ۹۷/۱۹ درصد و توانایی پیش‌بینی داده‌های ارزیابی بادقت بالای ۸۶ درصد استخراج گردید. سپس، بر پایه این مدل، یک کنترل کننده مقاوم H_{∞} در چارچوب حساسیت ترکیبی طراحی شد که به حاشیه فاز پایدار ۷۲ درجه و حاشیه بهره ۴۵ دسی‌بل دست‌یافت. نتایج ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که سامانه کنترل حلقه - بسته پیشنهادی قادر است فرمان پله عمق ۰/۶ متری را در زمان نشست ۵ ثانیه، با فراجهدش صفر درصد و خطای حالت ماندگار صفر ردیابی کند. همچنین در حضور اغتشاشات جریان‌های عمودی اقیانوسی شدید با نیروی ۱ نیوتن، بیشینه خطای موقعیت کمتر از ۹ میلی‌متر حفظ شد.

اطلاعات مقاله

نارینچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۷/۱۲

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۷/۱۲

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

ربات زیرسطحی ROV

کنترل مقاوم H_{∞}

شناسایی سیستم

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱- مقدمه

ربات‌های زیرسطحی کنترل از راه دور ($ROVs^1$) ابزارهایی حیاتی در صنایع فراساحلی، اکتشافات و بازرسی زیرساخت‌های دریایی محسوب می‌شوند. باوجود گسترش کاربرد این وسایل، کنترل دقیق و پلیدار آن‌ها با چالش‌هایی همراه است. مطالعات مروری نشان می‌دهند که عمده این چالش‌ها به‌صورت هم‌زمان به اثرات غیرخطی دینامیک، عدم قطعیت پارامترهای هیدرودینامیکی و اغتشاشات محیطی مربوط می‌شوند [۱].

چالش اصلی در طراحی سامانه‌های کنترلی و تثبیت موقعیت پویا^۲ برای این ربات‌ها، دستیابی به یک مدل دینامیکی دقیق است [۲]. رویکردهای تحلیلی سنتی که بر پایه قوانین فیزیک و ضرایب هیدرودینامیکی (نظیر جرم افزوده و میرایی) استوارند، اغلب با عدم قطعیت‌های پارامتریک مواجه هستند. تعیین دقیق این ضرایب نیازمند آزمون‌های پرهزینه در حوضچه کشش یا شبیه‌سازی‌های زمان‌بر دینامیک سیالات محاسباتی^۳ است. ازسوی دیگر، اغتشاشات محیطی مانند جریان‌های دریایی و نویز حسگرها، کارایی کنترل‌کننده‌های کلاسیک نظیر PID^۴ را که بر مبنای مدل‌های خطی ساده‌شده طراحی می‌شوند، به‌شدت کاهش می‌دهند.

توسعه سامانه‌های کنترلی کارآمد برای ربات‌های زیرسطحی ROV، نیازمند درک عمیق از سه حوزه اصلی است: مدل‌سازی دینامیکی، طراحی کنترل‌کننده مقاوم و اعتبارسنجی تجربی. ادبیات موجود نشان می‌دهد که مدل‌سازی تحلیلی بر پایه قوانین فیزیک، رویکرد کلاسیک در این حوزه است [۳]. بااین‌حال، تعیین دقیق پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر جرم افزوده و میرایی غیرخطی در این روش، به دلیل هندسه پیچیده و قاب‌باز بودن^۵ بسیاری از ROV ها، چالش‌برانگیز است [۴].

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های تجربی و داده‌محور به‌عنوان روشی مکمل برای کاهش وابستگی به پارامترهای هیدرودینامیکی موردتوجه قرار گرفته است. این روش‌ها امکان استخراج مدل دینامیکی از داده‌های واقعی یا شبیه‌سازی‌شده را فراهم می‌کنند و می‌توانند مبنای مناسبی برای طراحی کنترل‌کننده باشند. در این رویکرد، سیستم به‌صورت یک جعبه سیاه در نظر گرفته‌شده و مدل ریاضی بر اساس داده‌های ورودی - خروجی استخراج می‌شود. ازسوی دیگر، اعتبار مدل‌های شناسایی‌شده به کیفیت داده‌های ورودی و خروجی و همچنین دامنه تحریک سیستم وابسته است؛ بنابراین، انتخاب سیگنال تحریک مناسب، حذف نویز اندازه‌گیری و استفاده از داده‌های مستقل برای اعتبارسنجی مدل، از عوامل مهم در افزایش قابلیت اعتماد مدل حاصل از شناسایی سیستم محسوب

می‌شوند. این موضوع به‌ویژه در مدل‌سازی حرکت عمودی ROV که برای کنترل عمق اهمیت مستقیم دارد، باید موردتوجه قرار گیرد [۵].

در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان جایگزینی هوشمند و کارآمد برای روش‌های سنتی مطرح شده‌اند تا بدون نیاز به حل معادلات پیچیده هیدرودینامیکی، روابط غیرخطی سیستم را تخمین زنند. در همین راستا، نجاری و همکاران (۲۰۲۵) در یک پژوهش به مدل‌سازی دینامیک میان زاویه سکان و نرخ یاء^۶ با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداخته‌اند؛ به‌طوری‌که در صورت عدم دسترسی به شرایط آزمون واقعی، داده‌های حاصل از مانور زیگزگ در محیط شبیه‌سازی سیمولینک جهت آموزش شبکه به‌کاررفته و سپس توانایی تعمیم‌دهی و دقت مدل با ورودی‌های متفاوتی همچون سیگنال‌های سینوسی و دندان‌اره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است [۶].

اعتبارسنجی تجربی، حلقه مفقوده بسیاری از مطالعات شبیه‌سازی محور محسوب می‌شود. حسونود و همکاران (۲۰۲۴) با ساخت یک مدل فیزیکی از گلايدر زیرسطحی، تأثیر ویژگی‌های هندسی ربات را بر نحوه مانور آن بررسی کردند و یک گردش کار سامان‌مند ارائه نمودند که در آن، شبیه‌سازی‌ها ابتدا در نرم‌افزار متلب انجام شده و سپس در حوضچه کشش اعتبارسنجی انجام شده است [۷]. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های عددی می‌توانند رفتار واقعی ربات را بادقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کنند، هرچند همچنان خطاهایی ناشی از عدم قطعیت‌های محیطی در آن‌ها مشاهده می‌شود. واکر و همکاران (۲۰۲۱) نیز با تمرکز بر نیروهای ناشی از امواج، نشان دادند که مدل‌های نظری خطی می‌توانند بادقت بالایی نیروهای وارده را پیش‌بینی کنند که برای کنترل پیش‌بین در عملیات حفظ موقعیت ضروری است [۸].

در حوزه استراتژی‌های کنترلی، اگرچه کنترل‌کننده‌های PID به دلیل سادگی همچنان در صنعت پرکاربرد هستند، اما شواهد نشان می‌دهد که این روش‌ها در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات شدید به‌ویژه در سامانه‌هایی با دینامیک غیرخطی با افت عملکرد مواجه می‌شوند. در راستای ارتقای عملکرد، پژوهش‌هایی نظیر کار حسونود و همکاران (۲۰۲۴) با طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی نشان داده‌اند که تنظیم خودکار پارامترها می‌تواند پاسخ سیستم را در برابر تغییرات هیدرودینامیکی بهبود دهد و حتی نسبت به PID مصرف انرژی کمتری داشته باشد. همچنین، هرچند ترکیب PID با رویکردهای هوشمند مانند منطق فازی می‌تواند توان مقابله با نویز را افزایش دهد، اما پیچیدگی تنظیم قوانین فازی همچنان یک

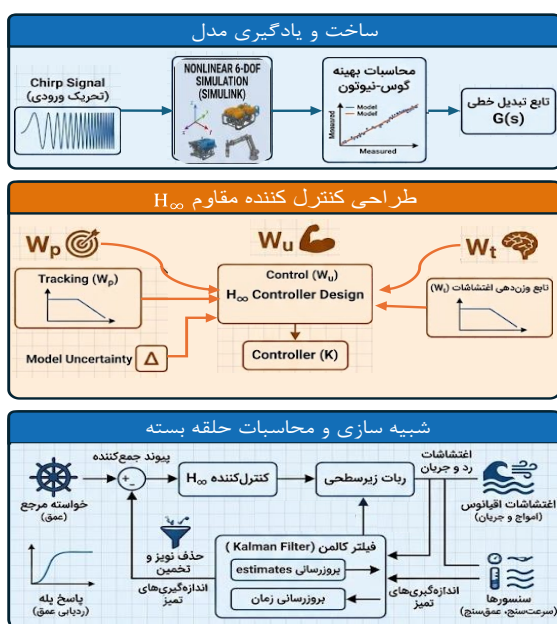
⁴ PID-Proportional-Integral-Derivative⁵ Open-frame⁶ Yaw Rate¹ Remotely Operated Vehicles² DP-Dynamic Positioning³ CFD-Computational Fluid Dynamics

این پژوهش باهدف پر کردن این شکاف، یک چارچوب جامع برای شناسایی سیستم، تخمین حالت و کنترل مقاوم عمق یک ربات زیرسطحی قابل مشاهده در شکل (۱) و در کلاس مشاهده گر (ربات کاوش) ارائه می دهد. در این راستا، ابتدایه جای تکیه بر مدل های پیچیده فیزیکی، یک مدل تابع تبدیل^۲ خطی با استفاده از الگوریتم های شناسایی سیستم و داده های ورودی - خروجی استخراج می شود. سپس، بر مبنای این مدل و با لحاظ کردن عدم قطعیت های ساختاری و نویز اندازه گیری، یک کنترل کننده مقاوم H_{∞} طراحی می گردد. نوآوری این تحقیق در پیاده سازی زنجیره های فرآیند شناسایی، کنترل و اعتبارسنجی آن در محیط شبیه سازی با لحاظ کردن رفتار غیر خطی و اغتشاشات محیطی است تا الگویی کارآمد و کم هزینه برای توسعه سامانه های کنترل عمق ارائه گردد.



شکل ۱- ربات زیرسطحی کنترل از راه دور - دانشگاه صنعتی شریف

به منظور تبیین یکپارچه مراحل پژوهش، فلوچارت الگوریتم حل و فرآیند زنجیره های شناسایی، طراحی کنترل کننده و اعتبارسنجی حلقه - بسته در شکل (۲) ارائه شده است که نقشه راه روش شناسی مقاله را نشان می دهد.



شکل ۲- نقشه راه روش شناسی الگوریتم حل مسئله

چالش مهم محسوب می شود. در میان روش های کنترل مقاوم، کنترل H_{∞} به دلیل امکان محدودسازی اثر اغتشاشات و خطاهای مدل بر خروجی سیستم، گزینه ای مناسب برای سامانه های زیرآبی محسوب می شود. کنترل عمق H_{∞} را برای ROV بررسی کرده اند و نشان داده اند که این روش می تواند در شرایط وجود عدم قطعیت و محدودیت های ارتباطی، عملکرد ردیابی و پایداری سیستم را حفظ کند [۹-۱۱]. در مقابل، استراتژی های کنترل پیشرفته و مقاوم نظیر مد لغزشی^۱، کنترل پیش بین مدل^۲ و سایر روش های مشابه، باهدف تضمین پایداری و عملکرد مطلوب در حضور عدم قطعیت ها توسعه یافته اند [۱۲].

اسوندبی (۲۰۰۷) نشان داد که کنترل مقاوم می تواند خطاهای ناشی از تخمین ناقص پارامترها و نیروهای کابل را جبران کند [۱۳]. در پژوهش های اخیر، مقابله با اغتشاشات ناشناخته و عدم قطعیت های مدل از طریق ترکیب کنترل کننده مقاوم با مشاهده گرهای اغتشاش یا کنترل پیش بین نیز بررسی شده است [۱۴]. چنین رویکردهایی با تخمین اثر جریان های دریایی و دینامیک های مدل نشده، امکان بهبود عملکرد کنترل موقعیت و مسیر ROV را فراهم می کنند [۱۵]. پیچیدگی محاسباتی و وابستگی این روش ها به مدل دقیق، استفاده عملی از آن ها را با محدودیت هایی همراه می سازد. با این حال، بسیاری از این روش ها صرفاً در محیط شبیه سازی و بدون در نظر گرفتن نویزهای واقعی حسگرها ارزیابی شده اند.

در یک پژوهش، با استفاده از یک آزمون اصلاح شده، رفتار عمودی و حرکات رول و پیچ ROV شناسایی شده و بر پایه مدل های به دست آمده، کنترل کننده های PID طراحی و آزمایش شده اند [۱۶]. تفاوت پژوهش حاضر در تمرکز اختصاصی بر کنترل عمق و استفاده از کنترل مقاوم H_{∞} برای کاهش اثر عدم قطعیت ها در شبیه سازی حلقه بسته است.

مرور ادبیات نشان می دهد که اکثر مطالعات یا بر مدل سازی دقیق فیزیکی با هزینه های محاسباتی بالا تمرکز دارند و یا از روش های کنترلی پیچیده بر روی مدل های ساده سازی شده استفاده می کنند. بررسی ادبیات موضوع نشان می دهد که اگرچه روش های شناسایی سیستم به عنوان جایگزینی کارآمد برای استخراج مدل های ریاضی از داده های تجربی مطرح شده اند، اما تلفیق این مدل های استخراج شده با استراتژی های کنترل مقاوم برای تضمین پایداری در حضور عدم قطعیت ها، کمتر به صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اغلب مطالعات پیشین یا صرفاً بر جنبه های تئوری کنترل متمرکز بوده اند و یا از مدل های شبیه سازی ایدئال بدون در نظر گرفتن نویز واقعی حسگرها استفاده کرده اند.

³ TF-Transfer Function

¹ SMC-Sliding Mode Control

² MPC-Model Predictive Control

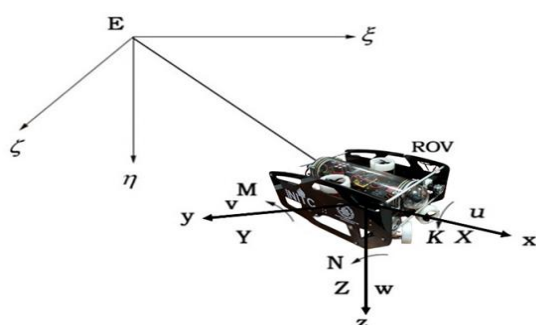
جدول ۱ - علائم استاندارد ربات زیرسطحی [۱۷]

نام حرکت	ممان ها و نیروها	سرعت های خطی و دورانی	موقعیت و زوایای اولیه
سرج	X	u	x
سوی	Y	v	y
هیو	Z	w	z
رول	K	p	ϕ
پیچ	M	q	θ
یاو	N	r	ψ

برای توصیف این حرکات، از دو دستگاه مختصات مرجع همانند شکل (۴) استفاده می شود:

۱. دستگاه ثابت زمین: برای بیان موقعیت و جهت گیری جهانی (η).

۲. دستگاه متصل به بدنه: برای بیان سرعت های خطی و زاویه ای و نیروهای وارده (v).



شکل ۴ - سیستم مختصات بررسی دینامیک یک ربات دریایی (دستگاه بدنه و دستگاه زمین)

رابطه کلی سینماتیکی به صورت برداری زیر تعریف می شود [۳]:

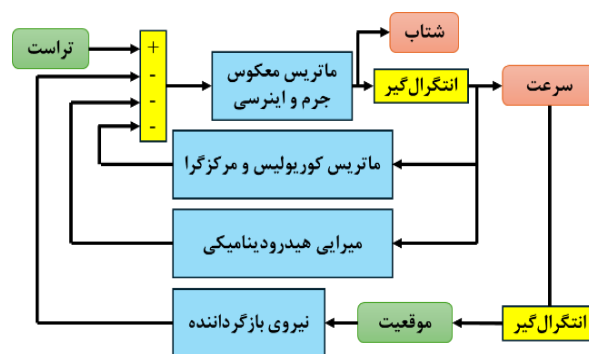
$$\dot{\eta} = J(\eta)v \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{p}^n \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^b \\ \omega^b \end{bmatrix} \quad (1)$$

در اینجا، $J(\eta)$ ماتریس ژاکوبین تبدیل است که شامل دو زیرماتریس اصلی برای تبدیل سرعت های خطی و دورانی هست.

۲- مدل سازی دینامیکی

توسعه یک راهبرد کنترلی دقیق نیازمند استخراج مدل ریاضی معتبر از رفتار ربات در محیط سیال است. در این پژوهش، مدل سازی بر اساس چارچوب استاندارد ۶ درجه آزادی^۱ انجام شده که شامل دو بخش سینماتیک (هندسه حرکت) و دینامیک (نیروهای وارده) است که در بخش Simulink نرم افزار MATLAB همانند شکل (۳) پیاده سازی شده است [۳]. در این شکل به خوبی ورودی های مدل دینامیکی (تراست و موقعیت) به صورت سبز رنگ و خروجی های مدل (شتاب و سرعت) به رنگ قرمز نمایش داده شد؛ همچنین برای سادگی فرمول ها و روابط ریاضی حاکم در بلوک آبی رنگ نمایش داده شد.

محاسبات ورودی تراست به وسیله ضرب ولتاژ در ماتریس تخصیص تراست انجام و به عنوان ورودی به مدل وارد شد. پس از محاسبات، مدل شتاب را محاسبه کرده که پس از دو بار انتگرال گیری سرعت و موقعیت را به صورت خروجی می دهد؛ در همین حین داده های موقعیت در یک حلقه بازخورد به صورت ورودی برای انجام محاسبات و به بلوک نیروی بازگرداننده وارد می شود.



شکل ۳ - نمودار بلوکی مدل ROV غیرخطی

۲-۱- سینماتیک ربات زیرسطحی

پایه مدل سازی ریاضی هر ربات دریایی، معادلات حرکت جسم صلب در فضای سه بعدی است [۳]. بر اساس چارچوب های استاندارد، حرکت ربات زیرسطحی با ۶ درجه آزادی توصیف می شود که مطابق جدول (۱) شامل سه حرکت انتقالی (سرج^۲ و سوی^۳ و هیو^۴) و سه حرکت دورانی (رول^۵ و پیچ^۶ و یاو^۷) است [۱۷].

^۵ Rol
^۶ Pitch
^۷ Yaw

^۱ DOF-Degrees of Freedom
^۲ Surge
^۳ Sway
^۴ Heave

۱-۱-۲- ماتریس تبدیل سرعت خطی (J_1)

در ادامه، هر یک از ماتریس‌ها و ترم‌های این معادله تشریح می‌شوند:

۱-۲-۲- ماتریس جرم و اینرسی (M)

این ماتریس بیانگر مقاومت جسم در برابر شتاب‌گیری است و از جمع دو بخش تشکیل شده است:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (7)$$

۱. ماتریس جرم جسم صلب (M_{RB})

شامل جرم فیزیکی ربات (m) و ممان‌های اینرسی (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) است.

۲. ماتریس جرم افزوده (M_A):

هنگامی که جسم در سیال شتاب می‌گیرد، باید مقداری از سیال اطراف خود را نیز جابه‌جا کند. این پدیده به صورت یک جرم مجازی به سیستم اضافه می‌شود [۳].

- عناصر قطری ماتریس M_A (مانند $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$) نشان‌دهنده جرم افزوده در راستای محورهای اصلی هستند.
- برای ربات مورد مطالعه (کاوش) که دارای تقارن محوری و سرعت عملیاتی پایین است، از عناصر غیرقطری (کوپلینگ) صرف‌نظر شده و ماتریس M_A به صورت قطری تقریب زده می‌شود.

۲-۲-۲- ماتریس کوریولیس و مرکزگرا ($C(v)$)

این ماتریس نیروهای مجازی ناشی از دوران دستگاه مختصات بدنه نسبت به دستگاه مرجع اینرسی را مدل می‌کند. این ترم نیز شامل دو بخش است:

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (8)$$

بخش جسم صلب (C_{RB}): ناشی از دوران جرم فیزیکی ربات.

- **بخش جرم افزوده (C_A):** ناشی از دوران جرم سیال همراه ربات.

وجود این ماتریس باعث می‌شود که حرکت در یک درجه آزادی مثلاً چرخش یاو، نیروهایی را در سایر درجات آزادی مثلاً سویی القا کند. این اثرات در سرعت‌های بالا و مانورهای سریع اهمیت ویژه‌ای می‌یابند.

این ماتریس پل ارتباطی میان سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای ربات در دستگاه بدنه (u, v, w) و نرخ تغییرات موقعیت در دستگاه جهانی ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$) است. ماتریس J_1 در واقع همان ماتریس دوران^۱ است که از طریق زوایای اوایلر (ϕ, θ, ψ) به دست می‌آید. معادلات آن به صورت زیر است [۳]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\Theta) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

که ساختار ماتریس J_1 به شرح زیر است [۲]:

$$c = \cos, s = \sin, t = \tan$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

این تبدیل برای کاربردهای ناوبری (تخمین موقعیت با انتگرال‌گیری از سرعت‌ها) و کنترل مسیر (تبدیل خطای موقعیت جهانی به دستورات بدنه) ضروری است.

۲-۱-۲- ماتریس تبدیل سرعت دورانی (J_2)

این ماتریس ارتباط هندسی میان سرعت‌های زاویه‌ای بدنه (p, q, r) که توسط واحدهای اندازه‌گیری اینرسی اندازه‌گیری می‌شوند و نرخ تغییرات زوایای اوایلر ($\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$) را برقرار می‌کند [۳]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\Theta) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4)$$

ساختار ماتریس J_2 به صورت زیر است [۳]:

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

۲-۲- دینامیک ربات زیرسطحی

تحلیل دینامیکی ربات در یک دستگاه مختصات متصل به بدنه، نیازمند اعمال قوانین نیوتن - اوایلر با در نظر گرفتن اثرات متقابل جسم و سیال است. معادله کلی حرکت برای یک جسم صلب غوطه‌ور در سیال به صورت برداری زیر بیان می‌شود [۳]:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (6)$$

¹ Rotation Matrix

۳-۲-۲- ماتریس میرایی هیدرودینامیکی ($D(v)$)

نیروهای میرایی ناشی از لزجت سیال و اصطکاک، نقش اصلی را در اتلاف انرژی و تعیین سرعت نهایی ربات ایفا می کنند [۳]. مدل میرایی شامل دو مؤلفه است:

$$D(v) = D_L + D_{nl}(v) \quad (۹)$$

۱. **میرایی خطی:** (D_L) ناشی از اصطکاک پوسته و جریان لایه مرزی آرام است که در سرعت های بسیار پایین غالب است.

۲. **میرایی غیرخطی درجه دوم:** (D_{nl}) ناشی از پدیده

جدایش جریان^۱ و تشکیل گردابه^۲ است. این نیرو متناسب

با مربع سرعت ($|v|$) عمل می کند و به صورت $X_{u|u|}$

$|u|$ در معادلات ظاهر می شود. برای ربات های قاب باز

^۳مانند ربات این پژوهش، ترم های غیرخطی غالب هستند.

۳-۲-۲- بردار نیروهای هیدرواستاتیک ($g(\eta)$)

این بردار شامل نیروهای وزن ($W = mg$) و شناوری ($B = \rho g V$) است. گشتاورهای بازگرداننده^۴ که برای پایداری ذاتی ربات مانند بازگشت به حالت تعادل در رول و پیچ ضروری هستند، از فاصله عمودی بین مرکز ثقل (CG) و مرکز شناوری (CB) ناشی می شوند.

بردار $g(\eta)$ به صورت زیر تعریف می شود [۳، ۱۲]:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ \dots \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

برای ربات مورد نظر، مرکز ثقل پایین تر از مرکز شناوری طراحی شده تا پایداری استاتیکی در راستای رول و پیچ به صورت غیرفعال^۵ تأمین شود.

۳-۲-۲- نیرو و گشتاور پیشرانها (τ)

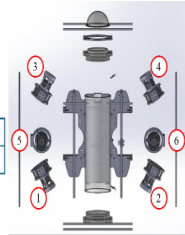
نیروی محرکه ربات توسط N عدد پیشرانه^۶ تأمین می شود. نگاشت نیروی تولیدی هر موتور (f_i) به نیروها و گشتاورهای بدنه (τ) توسط ماتریس آرایش پیشرانها^۷ انجام می شود [۱۸]:

(۱۱)

$$\tau = T f$$

که در آن $f = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$ بردار نیروی تراست موتورهاست. همان طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است ماتریس T بر اساس موقعیت هندسی و زاویه نصب هر پیشرانه نسبت به مرکز ثقل ربات استخراج می شود [۱۸]. همچنین رابطه بین ولتاژ ورودی به موتور (u) و نیروی تولیدی (f) معمولاً غیرخطی است، اما در حوالی نقطه کار می توان آن را با ضرایب ثابت K_T تخمین زد.

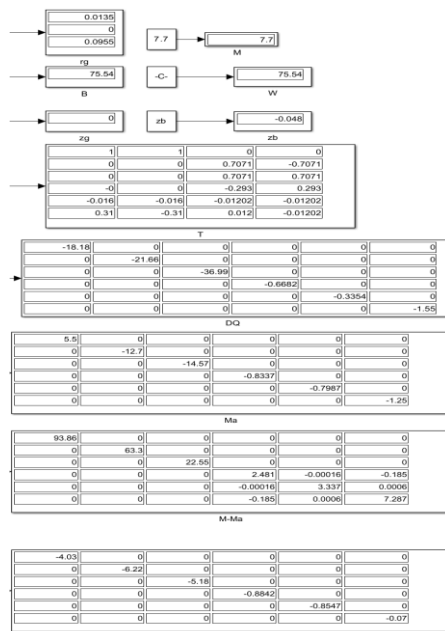
	n1	n2	n3	n4	n5	n6
surge	0.866	0.866	-0.866	-0.866	0	0
sway	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0	0
heave	0	0	0	0	1	1
	0	0	0	0	-0.1	0.1
roll	0	0	0	0	0	0
pitch	0	0	0	0	0	0
yaw	0.262	-0.262	0.262	-0.262	0	0



شکل ۵- ماتریس انتقال تراست ربات کاوش (از دستگاه بدنه به دستگاه زمین)

۳-۲-۲- شبیه سازی و تحلیل پاسخ حلقه - باز

پیش از اعمال کنترلر، رفتار دینامیکی مدل غیرخطی ۴-درجه آزادی که با ضرایب هیدرودینامیکی درون شکل (۶) تولید شده در برابر ورودی های پله بررسی شد تا از صحت پیاده سازی فیزیکی اطمینان حاصل شود [۵، ۸].



شکل ۶- ضرایب هیدرودینامیکی ربات کاوش [۱۸]

⁵ Passive

⁶ Thruster

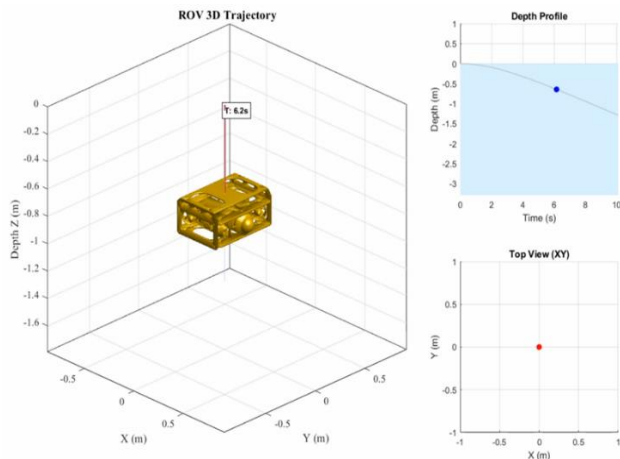
⁷ Thruster Configuration Matrix - T

¹ Flow Separation

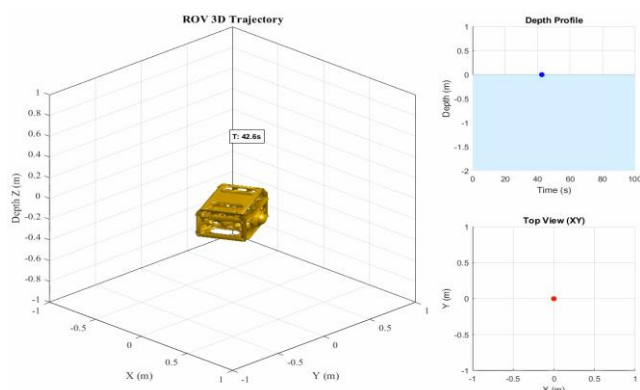
² Vortex Shedding

³ Open-frame

⁴ Restoring Moments

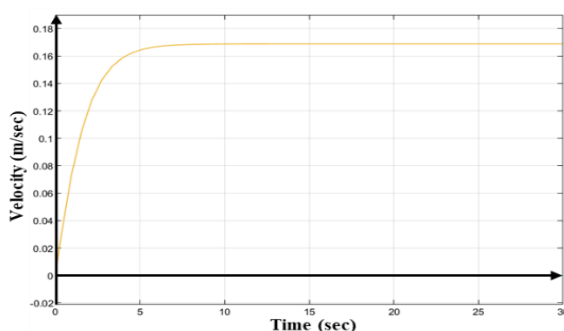


شکل ۹- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی در حرکت هیو



شکل ۱۰- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی در حرکت یو

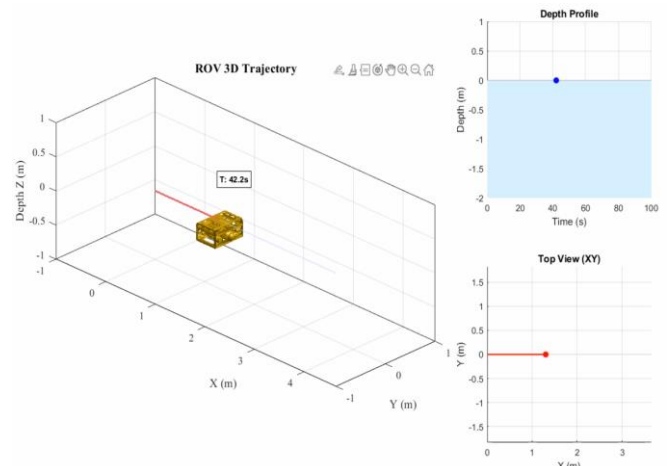
- تحلیل سرعت پایانی: نتایج نشان داد که با اعمال نیروی پیشران ثابت، ربات ابتدا شتاب گرفته و سپس به یک سرعت ثابت می‌رسد. این رفتار تأیید می‌کند که ترم‌های میرایی غیرخطی (درگ) به‌درستی عمل کرده و نیروی پیشران را در حالت ماندگار خنثی می‌کنند.



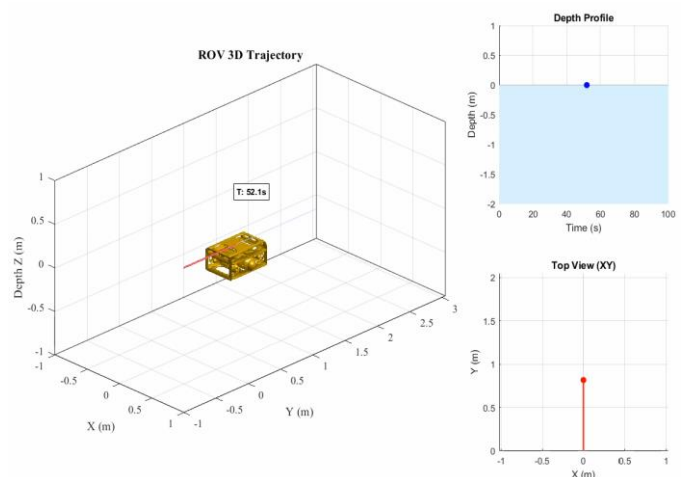
شکل ۱۱- نمودار سرعت - زمان در تحریک پیشران‌های عمودی برای حرکت عمق‌روی (هیو)

- حرکات کوپل شده: در تحریک‌های خالص مانند حرکت جانبی^۱، استفاده از روش فعال‌سازی متضاد جفت‌های

بدین منظور، سیگنال‌های تراست خالص برای تحریک جداگانه درجات آزادی (سرج، سوی، هیو و یو) اعمال گردید [۱۹]. پس از شبیه‌سازی، خروجی‌ها به‌صورت نمودار سرعت - زمان و مکان - زمان همانند شکل (۱۱) به دست آمد. برای درک و مشاهده بهتر رفتار شبیه‌سازی ربات کاوش در نرم‌افزار MATLAB کدی جهت تولید انیمیشن نوشته شد که خروجی آن را می‌توان در شکل (۷-۱۰) مشاهده کرد.



شکل ۷- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی در حرکت سرج



شکل ۸- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی در حرکت سوی

فرکانسی^۴ استفاده شد. این سیگنال که دارای دامنه ثابت و فرکانس متغیر بازمان است، قادر است سیستم را در طیف وسیعی از فرکانس‌های عملیاتی تحریک کند.

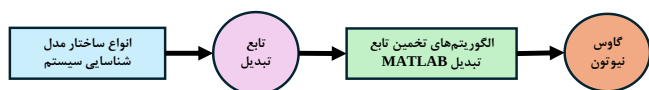
• **ورودی:** ولتاژ اعمالی به پیشران‌های عمودی در مدل دینامیکی (در بازه ۱۱ تا ۱۲ ولت).

• **خروجی:** سرعت عمودی ربات.

• **نرخ نمونه‌برداری:** داده‌ها با فرکانس ۱۰۰ هرتز ($dt = 0/01s$) از مدل شبیه‌سازی غیرخطی (توسعه‌یافته در بخش قبل) استخراج شدند تا اثرات نویز و دینامیک‌های گذرا به‌دقت ثبت شوند.

۳-۲- ساختار مدل و الگوریتم تخمین

پس از پیش‌پردازش داده‌ها، ساختارهای مختلف مدل‌سازی در جعبه‌ابزار شناسایی سیستم متلب ارزیابی شدند.



شکل ۱۲- نمودار بلوکی فرآیند شناسایی سیستم و الگوریتم‌های تخمین تابع تبدیل

باتوجه به سعی و خطاهای متعدد در فرآیند تخمین تابع تبدیل و آزمون درجات مختلف صورت و مخرج و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به عدم افزایش بیش از حد درجات صورت و مخرج، با طی مسیر مطابق شکل (۶) نتایج نشان داد که یک تابع تبدیل مرتبه اول برای توصیف رفتار غالب سرعت عمودی ربات کفایت می‌کند در نتیجه مدل نهایی به‌صورت زیر تعیین شد:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (14)$$

برای تخمین پارامترهای K (بهره استاتیکی) و τ (ثابت زمانی)، از الگوریتم بهینه‌سازی کمترین مربعات خطا^۵ بر پایه روش تکرارپذیر گاوس - نیوتن استفاده شد [۲۰]. هدف این الگوریتم،

پیشران موفق شد گشتاورهای ناخواسته مانند یاء^۱ را خنثی کند که نشان‌دهنده دقت ماتریس تخصیص نیرو (T) است [۵، ۸].

۳-۲- فرمول‌بندی ریاضی حاکم بر دینامیک عمودی

به‌منظور شفاف‌سازی مبانی استخراج تابع تبدیل از مدل ۶ درجه آزادی غیرخطی، با فرض تقارن هندسی ربات در صفحه عمودی و محدود بودن زاویه‌های رول ($\phi \approx 0$) و پیچ ($\theta \approx 0$) در مانور عمودی، مؤلفه حرکت در راستای محور Z (حرکت هیو با متغیر سرعت w) از معادله کلی (۶) به‌صورت رابطه (۱۲) تفکیک می‌شود [۳]:

$$(m - Z_w)\dot{w} + (D_w + D_{w|w}|w|)w + (W - B) = \tau_z \quad (12)$$

که در آن m جرم ربات، Z_w ضریب جرم افزوده در راستای محور عمودی، D_w میرایی خطی و $D_{w|w}|w|$ ضریب مقاومت غیرخطی درجه دوم است. از آنجاکه در شرایط عملکردی در حوالی نقطه کار نامی (w_0) ترم‌های غیرخطی میرایی را می‌توان به‌صورت خطی معادل $d_{eq} = D_w + 2D_{w|w}|w_0|$ تقریب زد، رفتار سرعت عمودی در فضای فرکانسی لاپلاس حول نقطه کار، از ساختار کلی زیر پیروی می‌کند:

$$G_w(s) = \frac{W(s)}{\tau_z(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (13)$$

که در آن ثابت زمانی برابر $\tau = \frac{m - Z_w}{d_{eq}}$ و بهره استاتیکی برابر $K = \frac{1}{d_{eq}}$ است. این فرمول‌بندی زیربنای نظری ساختار مدل استخراجی مرتبه اول در بخش ۳ را توجیه می‌نماید.

۳-۳- مدل شناسایی سیستم

طراحی کنترل‌کننده‌های پیشرفته نظیر H_∞ نیازمند در دست داشتن مدل ریاضی خطی و دقیقی از سیستم است. برای مدل‌های آزمایشگاهی باتوجه به دشواری‌های تعیین دقیق ضرایب هیدرودینامیکی در مدل تحلیلی و ماهیت غیرخطی معادلات حرکت، در این پژوهش از رویکرد شناسایی سیستم مبتنی بر داده^۲ برای استخراج تابع تبدیل حاکم بر دینامیک حرکت عمودی^۳ استفاده شد [۵].

۳-۱- طراحی آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها

برای تحریک کامل مدهای دینامیکی سیستم، انتخاب سیگنال ورودی مناسب حیاتی است. بدین منظور، از سیگنال جاروی

^۴ Chirp Signal

^۵ Least Squares

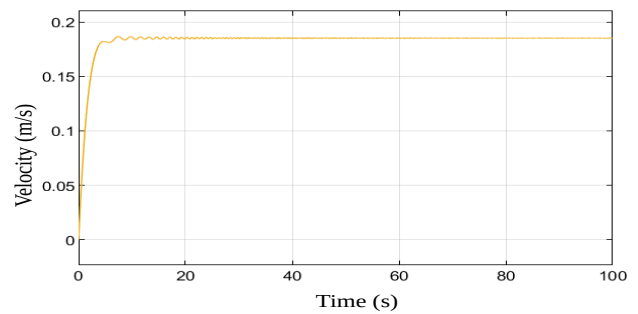
^۱ Yaw

^۲ Data-driven

^۳ Heave

کمینه‌سازی تابع هزینه خطای میانگین مربعات^۱ بین خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده است.

یک سیگنال جاروی فرکانسی بین ۱۱ تا ۱۲ ولت (بازه ورودی عملکردی ربات) تولید و به ورودی مدل دینامیکی اعمال شد. پاسخ مدل دینامیکی به صورت نمودار سرعت - زمان در شکل (۷) آورده شده.



شکل ۱۳- پاسخ سرعت مدل دینامیکی غیرخطی با ورودی جاروی فرکانسی در درجه آزادی هیو

مدل نهایی استخراج شده برای سرعت عمودی به صورت زیر به دست آمد:

$$G_{vel}(s) = \frac{0/01137}{s + 0/7062} \quad (15)$$

۳-۳-۳- اعتبارسنجی مدل

برای اطمینان از تعمیم‌پذیری مدل خطی استخراج شده، فرآیند اعتبارسنجی در سه مرحله انجام شده است.

۳-۳-۳-۱- تطابق با داده‌های آموزش

مدل خطی تخمین زده شده باید بتواند بادقت مناسبی رفتار پاسخ به ورودی مرجع جاروی فرکانسی را تقلید کند. مرحله حیاتی بعدی، اعتبارسنجی این مدل ساده برای درک محدودیت‌های آن است.

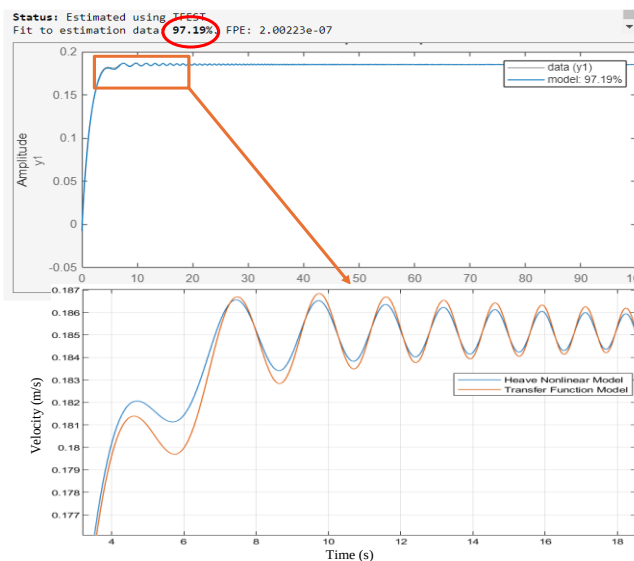
۳-۳-۳-۲- تست با ورودی‌های ناشناخته

مدلی که برای یک مجموعه داده به خوبی کار می‌کند، ممکن است برای مجموعه داده دیگری کار نکند و اصطلاحاً دچار بیش برآزش

شود. از این رو مدل تابع تبدیل تولید شده باید با یک ورودی ناشناخته دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد تا محدودیت آن مشخص شود.

۳-۳-۳- بررسی با ورودی و خروجی نویزی

داده‌های مربوط به ورودی و خروجی شناسایی سیستم در تست عمق‌روی تجربی معمولاً از طریق منبع تغذیه تولید و از طریق حسگرهای واحد اندازه‌گیری^۲ IMU یا فشارسنج ثبت می‌شوند. قابل‌پیش‌بینی است که این داده‌ها هم در بخش تولید و هم در بخش ثبت خروجی دارای نویز اندازه‌گیری باشند؛ از این رو مدل باید در این شرایط نیز اعتبارسنجی شود.



شکل ۱۴- رابط جعبه‌ابزار شناسایی سیستم متلب - نمایش داده‌ها و درصد برازش مدل

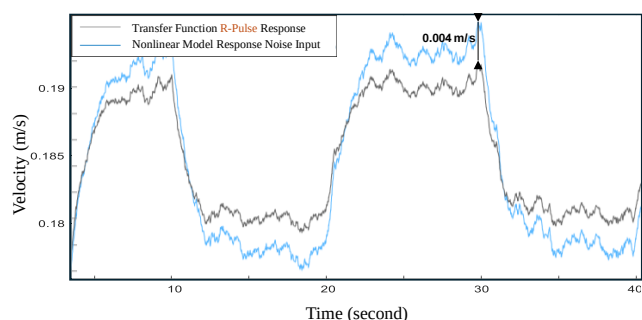
باتوجه به توضیحات بالا مرحله اول اعتبارسنجی مدل به خوبی انجام شد. باتوجه به نتایج به دست آمده مطابق شکل (۱۴) مدل خطی توانست بادقت برآزش بالای ۹۷ درصد داده‌های ورودی جاروی فرکانسی را بازتولید کند.

در گام دوم، مطابق شکل (۱۵) فرآیند صحت سنجی مدل شناسایی شده ما در برابر سیستم واقعی با استفاده از یک سیگنال ورودی متفاوت که مدل هرگز قبلاً ندیده است انجام شد. مدل در برابر یک ورودی کاملاً متفاوت (پالس مستطیلی در بازه عملکردی ۱۱ تا ۱۲ ولت) که در فرآیند آموزش استفاده نشده بود، محک زده شد. نتایج نشان داد که مدل خطی توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم بادقت بالای ۸۶ درصد را دارد.

² IMU-Inertial Measurement Unit

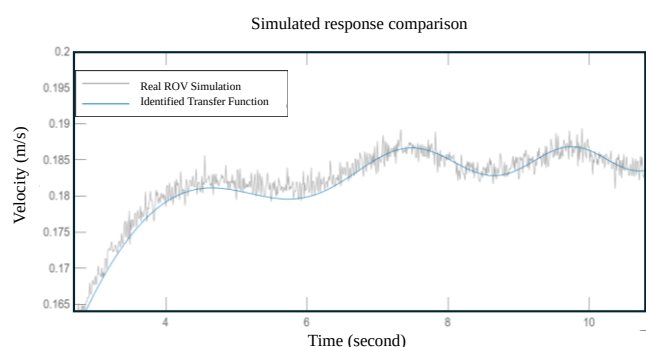
¹ MSE-Mean Squared Error

همان‌طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است در این مرحله دوباره تابع تبدیل با مرجع پالس مستطیلی صحت سنجی شد. در این نمودار خط آبی نماینده مدل دینامیکی غیرخطی و خط مشکی رنگ خروجی سرعت تابع تبدیل در تحریک پالس مستطیلی را نشان می‌دهد. بیشینه تفاوت در این دو پاسخ $0/001 \text{ m/s}$ نسبت به مرحله بدون نویز افزایش یافت و با کاهش $۰/۰۲$ درصد تطابق تقریباً بدون تغییر باقی ماند.

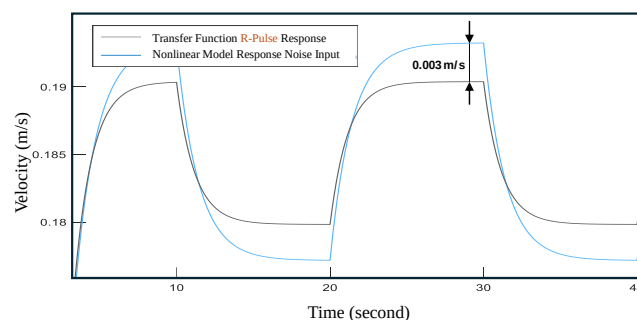


شکل ۱۷- میزان تطابق میان تابع تبدیل و مدل غیرخطی با ورودی پالس مستطیلی (با نویز ورودی)

فرآیند فوق جهت ارزیابی تأثیر نویز در حسگرهای خروجی (نظیر حسگر فشارسنج یا IMU) تکرار شد؛ به گونه‌ای که اغتشاش نویز مستقیماً بر سیگنال سرعت اندازه‌گیری شده اعمال گردید. همان‌طور که در شکل (۱۸) آورده شده این بار نویز سفید گاوسی با قدرت و زمان نمونه‌برداری $۰/۰۱$ را در انتهای شبیه‌سازی، جایی که خروجی سرعت را به ما تحویل می‌دهد اعمال می‌کنیم. این بار درصد تطابق مدل غیرخطی با مدل غیرخطی با کاهش ۵ درصدی به ۹۳ درصد رسید؛ اما همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود تابع تبدیل به درستی روند را تشخیص داده است و برای تخمین دینامیک عمق‌روی مناسب است. در این شکل خط آبی نماینده مدل دینامیکی تخمین زده شده توسط تابع تبدیل و خط مشکی رنگ نشان‌دهنده پاسخ مدل دینامیکی غیرخطی است.



شکل ۱۸- برازش تابع تبدیل بر مدل با نویز خروجی

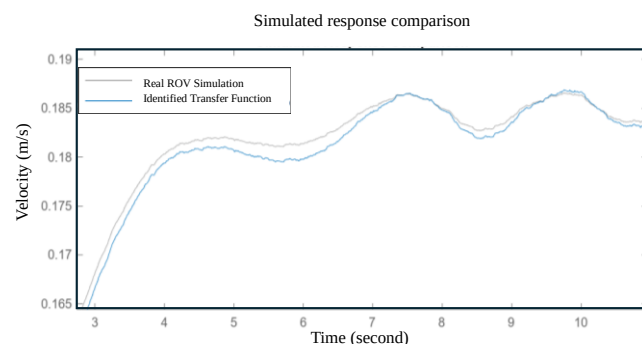


شکل ۱۵- میزان تطابق میان تابع تبدیل و مدل غیرخطی با ورودی پالس مستطیلی (بدون نویز)

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود بیشینه تفاوت در این دو پاسخ $۰/۰۰۳$ متر بر ثانیه است که میزان خطای بسیار کم و دقت بسیار خوب تابع تبدیل در مواجهه با ورودی ناشناخته را نشان می‌دهد. پاسخ تابع تبدیل به ورودی پالس مستطیلی با رنگ آبی و پاسخ مدل غیرخطی به رنگ مشکی نمایش داده شده است. در گام سوم باید نشان داد که این تابع تبدیل توانایی آن را دارد که حتی در حضور نویز سفید گاوسی در ورودی و خروجی، عملکرد مطلوبی در ردیابی پاسخ داشته باشد.

در گام نخست، نویز سفید گاوسی با توان مشخص و دوره نمونه‌برداری $۰/۰۱$ ثانیه به ولتاژ ورودی اعمال گردید تا حساسیت مدل نسبت به داده‌های نویزی بررسی شده و پاسخ فرکانسی مدل با خروجی اندازه‌گیری شده مقایسه شود.

همان‌طور که در شکل (۱۶) آورده شده اثرات نویز ورودی بر داده‌ها را می‌توان مشاهده کرد همان‌طور که انتظار می‌رفت درصد تطابق مدل دینامیکی و مدل تابع تبدیل، مقدار $۰/۱۸$ درصد کاهش داشت. در این نمودار، خط مشکی نماینده مدل دینامیکی غیرخطی و خط آبی رنگ نمایانگر تابع تبدیل است که درصد تطابق آن مقدار خیلی کمی تغییر داشته است و تابع تبدیل همچنان با دقت بسیار مناسب ۹۷ درصد توانایی تخمین دینامیک غیرخطی عمق‌روی را دارد.



شکل ۱۶- نمایش داده‌ها و درصد برازش مدل (با نویز ورودی)

۴-۱-۱- وزن عملکرد (W_p)

یک فیلتر پایین گذر برای تضمین خطای حالت ماندگار صفر و رد اغتشاشات فرکانس پایین (مانند امواج). وزن عملکرد معمولاً به صورت زیر ارائه می شود [۲۱]:

$$W_p(s) = \frac{\frac{s}{m} + \omega_p}{s + (M_p \times \omega_p)} \quad (۱۷)$$

S: متغیر لاپلاس

m: حداکثر جهش (مقادیر پیشنهادی ۱/۵ تا ۲)

ω_p : این پارامتر محدوده فرکانسی را که عملکرد در آنجا بهینه باشد، تعیین می کند.

M_p : این پارامتر حداکثر میزان حذف خطای ماندگار را تعیین می کند. باتوجه به تعریف و نقش ضرایب بالا، با جای گذاری مقادیر مناسب از طریق بهینه سازی مقادیر فوق به فرمول زیر می رسد:

$$W_p(s) = \frac{0.5s + 500}{s + 0.0001} \quad (۱۸)$$

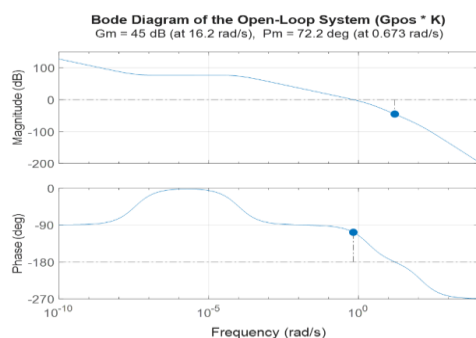
۴-۱-۲- وزن تلاش کنترلی (W_u)

مقدار ثابت 0/1 برای محدود کردن دامنه سیگنال ورودی به پیشرانها و جلوگیری از اشباع عملگرها و عدم آسیب به پیشرانها.

۴-۱-۳- وزن عدم قطعیت (W_t)

مقدار ثابت ۰/۰۵ که به حفظ پایداری مقاوم کمک می کند و مانع تقویت نویز، تشدید و ناپایداری در فرکانس های بالا می شود. وزن عدم قطعیت سیستم را در برابر خطاهای مدل و تغییرات محیطی محافظت کرده و در کاربردهایی مانند کنترل عمق ROV، باعث می شود کنترل گر حتی تحت جریان های متغیر و اغتشاشات سریع نیز پایدار و ایمن عمل کند.

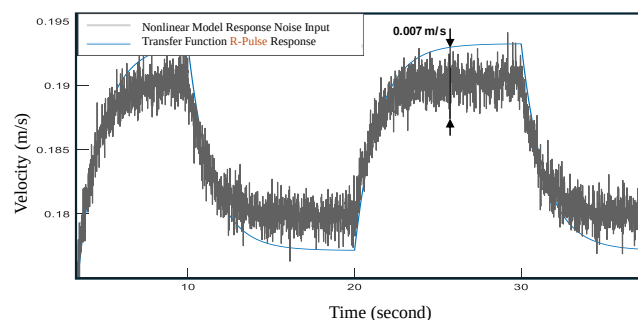
کنترل کننده اولیه با حل معادلات ریکاتی جبری مربوطه سنتز شد و نتایج تحلیل پایداری (نمودار بود) نشان دهنده حاشیه فاز 72° و حاشیه بهره $45dB$ است که تضمین کننده پایداری مقاوم سیستم هست.



شکل ۲۰- نمودار بود کنترلر مقاوم H_∞

مشابه با مراحل پیشین، اعتبارسنجی نهایی مدل شناسایی شده تحت ورودی ناشناخته (سیگنال پالس مستطیلی) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل خطی حتی در حضور نویز سفید گوسی در ورودی و خروجی توانایی پیش بینی رفتار سیستم با دقت بالای ۸۵ درصد را دارد.

در این نمودار خط آبی رنگ نشان دهنده پاسخ مدل غیرخطی و خط مشکی رنگ نماینده پاسخ تابع تبدیل به ورودی پالس مستطیلی.



شکل ۱۹- میزان تطابق میان تابع تبدیل و مدل غیرخطی با ورودی پالس مستطیلی (با نویز خروجی)

این سطح از تطابق تأیید می کند که مدل تابع تبدیل استخراج شده، دینامیک های اصلی عمق روی ربات را به درستی دنبال کرده و برای طراحی کنترل کننده مقاوم مناسب است.

۴- طراحی سیستم کنترل

پس از استخراج مدل خطی معتبر، گام بعدی طراحی یک معماری کنترلی است که بتواند پایداری و عملکرد ربات را در حضور نویز حسگرها و عدم قطعیت های مدل تضمین کند.

۴-۱- طراحی کنترل کننده مقاوم H_∞

هدف کنترلی، ردیابی دقیق مرجع عمق با وجود اغتشاشات محیطی و تغییرات پارامتریک است. برای این منظور، از روش شکل دهی تابع حساسیت ترکیبی^۱ استفاده شد [۲۱]. در این روش، مسئله کنترل به یک مسئله بهینه سازی نرم بی نهایت تبدیل می شود که هدف آن یافتن کنترل کننده $K(s)$ است به طوری که:

$$\min_K \|T_{zw}\|_\infty = \min_K \left\| \frac{W_p S}{W_t T} \right\|_\infty < \gamma \quad (۱۶)$$

که در آن S تابع حساسیت، T تابع مکمل حساسیت و $K S$ تلاش کنترلی است [۲۱، ۱۳]. توابع وزنی (W_p, W_u, W_t) بر اساس الزامات عملکردی زیر تنظیم شدند:

¹ Mixed-Sensitivity

معادله کنترلر طراحی شده به شرح زیر است:

$$K_{tf} = \frac{(1/634 \times 10^4)s^2 + 1/154 \times 10^4 s + 0/0003995}{s^3 + 125/3s^2 + 263/3s + 0/02633} \quad (۱۹)$$

معادله فوق برای بررسی در حضور اغتشاش‌های وارد شده جریان وارد مرحله بعدی شد که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

۲-۴- بررسی کنترل کننده عمق اولیه در حضور عدم

قطعیت جریان عمودی و بویانسی

در تحلیل حرکت عمودی ربات زیر دریایی، نقش نیروهای هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک و اثر جریان‌های عمودی اهمیت ویژه‌ای دارد. باتوجه به هندسه بدنه و مساحت تصویر شده در نمای بالا $A_p = 403/25 \text{ cm}^2$ ، مقاومت ناشی از جریان عمودی در طراحی کنترلر لحاظ شده است. هدف اصلی، ارزیابی عملکرد سیستم پیشران‌ش در برابر بویانسی و جریان‌های عمودی و تدوین کنترلر مقاوم متناسب با شرایط اقیانوسی است.

۲-۴-۱- ویژگی جریان‌های عمودی در محیط اقیانوسی

بر اساس داده‌های آماری، سرعت جریان‌های عمودی به‌طور کلی کمتر از جریان‌های افقی هستند و در سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که جزئیات آن را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد:

جدول ۲ - خلاصه مقایسه‌ای سرعت انواع جریانات در اقیانوس

شماره	نوع حرکت	سرعت (m/s)
۱	فرا جهندگی عمومی	۱۰-۴-۱۰-۵
۲	فرورفت آب‌های عمیق	۰/۱ - ۰/۱
۳	همرفت شدید	۰/۲

این جدول به مقایسه سرعت انواع مختلف جریان‌ها و حرکت‌های آب در اقیانوس می‌پردازد. در ادامه هر ردیف توضیح داده می‌شود:

- فراجهندگی عمومی (شماره ۱): این حرکت صعودی آب‌های عمیق به سطح، بسیار آرام است و معمولاً در اثر باد یا واگرایی جریان‌های سطحی ایجاد می‌شود. به دلیل سرعت ناچیز، تأثیر آن در مقیاس‌های زمانی بلندمدت (ماه‌ها و سال‌ها) قابل مشاهده است.
- فرورفت آب‌های عمیق (شماره ۲): این پدیده، شامل فرورفتن آب‌های سطحی به اعماق است (مثلاً در نواحی قطبی که آب سرد و شور فرومی‌رود). سرعت آن از فراجهندگی بیشتر ولی همچنان بسیار اندک است.

- همرفت شدید (شماره ۳): سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه. همرفت زمانی رخ می‌دهد که آب سطحی به دلیل سردی و چگالی بالا به سرعت به عمق فرورود. این فرایند در مقیاس محلی می‌تواند نسبتاً تند باشد و نقش مهمی در گردش دماشوری دارد.

جدول نشان می‌دهد که سرعت حرکت‌های عمودی آب در اقیانوس (فراجهندگی، فرورفت، همرفت) معمولاً چندمرتبه از جریان‌های افقی کندتر است. امواج درونی می‌توانند سرعتی نزدیک به همرفت شدید یا بیشتر داشته باشند

طبق محاسبات بر اساس فرمول محاسبه درگ و فرضیات زیر، در یک جریان عمودی قوی با سرعت $v_z = 0/2 \text{ m/s}$ نیروی مقاومتی معادل $F_d \approx 1N$ به بدنه وارد می‌شود.

جدول ۳- پارامترهای اعمال اغتشاش محیطی

چگالی آب دریا ρ	(1025 kg/m^3)
مساحت تصویر شده در صفحه افقی (A_p)	$(403/25 \text{ cm}^2)$
سرعت جریان عمودی (v_z)	$[0 - 0/2] \text{ m/s}$
ضریب پسا (C_d)	$۱/۲$

۲-۴-۲- آزمون عملکرد کنترلر در حضور اغتشاش جریان

در شبیه‌سازی، برای سرعت‌های ۰ تا ۲/۰ متر بر ثانیه نیرویی بین ۰ تا ۱ نیوتن به ربات اعمال شد.

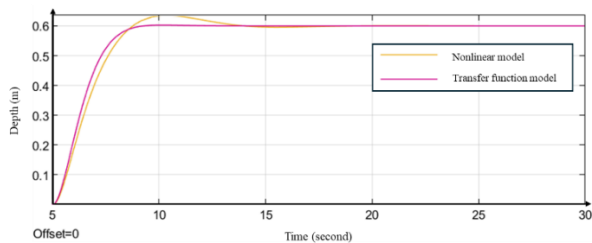
جدول ۴- بررسی صحت عملکردی کنترلر در حضور عدم قطعیت جریان

شماره	سرعت جریان (m/s)	نیروی اعمالی متناظر به ربات (N)
۱	۰	۰
۲	۰/۰۹	۰/۲
۳	۰/۱۵۵	۰/۶
۴	۰/۲۰۰	۱/۰

همان‌طور که در جدول (۴) سناریوهای تست آورده شده است برای تعمیم‌پذیری نتایج به حالت نمونه‌برداری یا مقابله با بویانسی در عملیات دریایی سرعت‌ها به نیرو تبدیل شد.

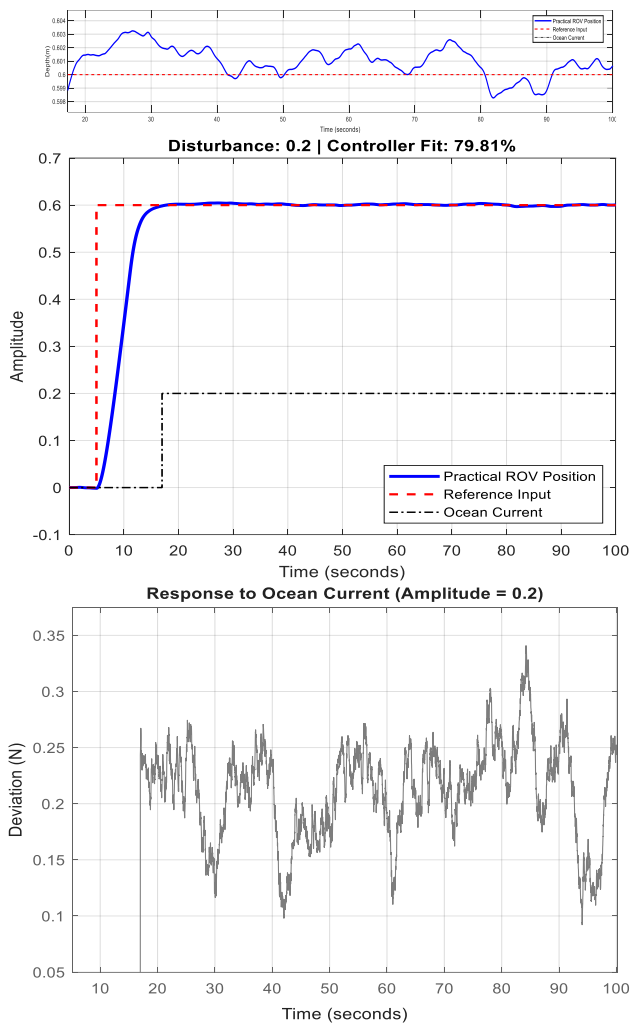
در مرحله پیشین، هنگام تخمین تابع تبدیل مشاهده شد که اگرچه مدل خطی شده رفتار سیستم را با دقت قابل قبولی دنبال می‌کرد، اما همچنان خطایی در حدود ۱۵ درصد در مدل ارائه شده وجود داشت. بر همین اساس، سناریوی اول (طراحی کنترلر در غیاب اغتشاش) با دو هدف اصلی، توانایی ردیابی مرجع و بهبود خطای تابع تبدیل تدوین و اجرا شد:

در این حالت ابتدا کنترلر طراحی شده بدون حضور عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفت. توانایی ردیابی مرجع اولین هدفی است که



شکل ۲۲- مقایسه رفتار کنترلر مدل تابع تبدیل با مدل غیرخطی

در سناریو شماره دوم تست، سعی بر این شد که توانایی کنترلر در حضور عدم قطعیت فراجهندگی عمومی مورد بررسی قرار گیرد.

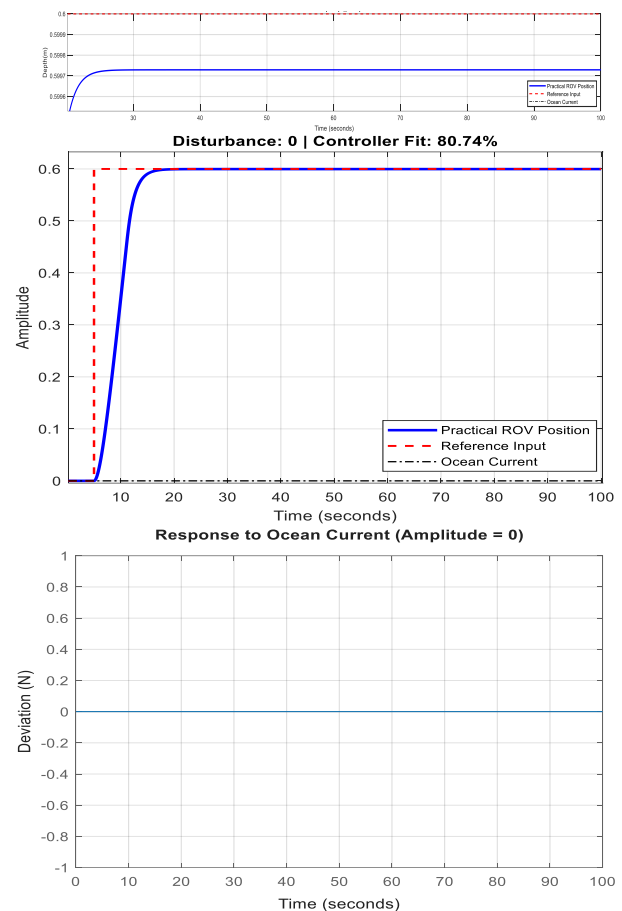


شکل ۲۳- ردیابی مرجع کنترلر در حضور اغتشاش ۰/۲ نیوتن

در اغلب نواحی اقیانوسی و دریایی، این پدیده معمولاً با شیبی بسیار آرام رخ می‌دهند. این فرآیندها شامل حرکت آهسته توده‌های آب به سمت بالا یا پایین در ستون آب هستند و نقش مهمی در تهویه آب‌های عمیق، انتقال مواد مغذی و تنظیم چرخه‌های زیست‌محیطی دارند.

شکل (۲۳) به خوبی نمایانگر جریان تولیدشده با قدرت ۰/۲ نیوتن است. اغتشاش جریان عمودی به کمک اضافه‌شدن یک نویز سفید گوسی به یک سیگنال پله با قدرت ۰/۲ برای بررسی توانمندی کنترلر

تعیین گردید، بدین منظور ابتدا یک سیگنال عمق‌روی پله ۰/۶ متر به عنوان ورودی مرجع به حلقه کنترلی اعمال شد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۱) می‌توان مشاهده کرد که حدود ۸۱ درصد تطابق میان مرجع با پاسخ تابع تبدیل وجود دارد. بر اساس آزمون‌های تجربی، ربات توانست مسافت ۰/۶ متر را در مدت ۱۲ ثانیه طی کند سرعت متوسط عمق‌روی برابر 0.05 m/s ، حداکثر شتاب اولیه 0.12 m/s^2 و زمان نشست (تنظیم) حدود ۱۰ ثانیه است. شایان ذکر است که مشخصات ذکر شده برای توانایی عمق‌روی ربات، مبنای طراحی کنترلر قرار داده شد.



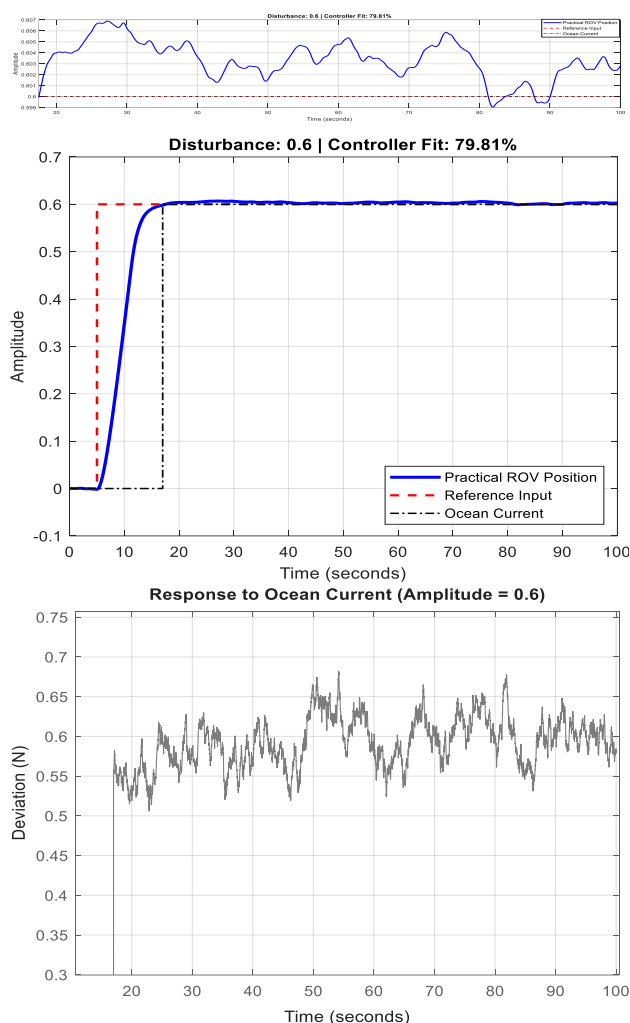
شکل ۲۱- ردیابی مرجع کنترلر بدون حضور اغتشاش جریان

بهبود خطای تابع تبدیل دومین هدفی بود که تعیین گردید همان‌گونه که در شکل (۲۲) نشان داده شده سیگنال مرجع عمق پله ۰/۶ متر به که در مرحله قبل تولیدشده بود به مدل‌های شبیه‌سازی (غیرخطی و تابع تبدیل) داده شد تا رفتار آن‌ها در حضور کنترلر مقاوم مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد که در این حالت کنترلر طراحی شده توانست تا حدی درصد عدم تطابق مدل تابع تبدیل را کاهش دهد (از ۱۵ درصد به ۸ درصد).

نیز لحاظ شده است: مطابق سناریوی شماره ۳، تحریک خارجی معادل 0.6 نیوتن و سرعت جریان عمودی 0.155 متر بر ثانیه اعمال می‌شود. این شرایط نمایانگر زمستان‌های شدید قطبی، یا نزدیکی به ناهم‌واری‌های تند بستر دریا (مانند شیب‌های کوه‌های زیرآبی) است که در آنها همرفت‌های قوی ناشی از سرمایش سطحی یا آشفتگی‌های ناشی از برخورد جریان‌ها با توپوگرافی زیرآبی می‌تواند باعث ایجاد امواج درونی^۲ و جابه‌جایی‌های عمودی پرسرعت شود. نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که کنترلر اولیه باوجود این اغتشاش (فرونشینی سریع قطبی به همراه نیروی 0.6 نیوتنی و جریان 0.155 متر بر ثانیه) همچنان توانسته است مرجع عمق را به‌درستی ردیابی کند. اگرچه درصد تطابق کاهش نیافته است، اما خطای بیشینه به 7 میلی‌متر می‌رسد. با این حال، کنترلر قادر است ربات را در عمق مرجع 0.6 متر حفظ کند که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول آن در برابر شدیدترین شرایط دینامیکی اقیانوس‌های قطبی است.

در سناریوی چهارم، ربات زیرسطحی موظف است عمق مرجع 0.6 متر را در حضور اغتشاشات فزاینده جریان عمودی آب ردیابی کند. برای ارزیابی مرزهای عملکرد کنترلر، شدت اغتشاش به 1 نیوتن افزایش می‌یابد. این سطح معادل همرفت شدید با سرعت جریان عمودی 0.2 متر بر ثانیه است (مانند شرایط زمستان‌های سخت قطبی یا نزدیکی به چشمه‌های آب‌های عمیق). مطابق نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۵)، اگرچه درصد تطابق به 79.81% رسیده است (با کاهش 0.1 درصدی نسبت به حالت قبل)، اما بیشینه خطای ردیابی به 9 میلی‌متر افزایش می‌یابد. این میزان خطا همچنان در محدوده قابل قبول قرار داشته و تأیید می‌کند که کنترلر اولیه حتی در برابر اغتشاش 1 نیوتنی ناشی از همرفت شدید نیز توانسته است موقعیت شناور را با موفقیت در عمق مرجع 0.6 متر حفظ کند.

در ردیابی مرجع عمق 0.6 متر تولید شد و می‌توان دید که با این حال که درصد تطابق ردیابی مرجع کنترلر 1 درصد کاهش یافته ولی همچنان بادقت بسیار خوبی مرجع را دنبال می‌کند و در عمق 0.6 ثابت باقی‌مانده. در بالا اما مشاهده می‌شود که نرخ خطا در بیشینه کردن حالت 5 میلی‌متر است که خطای بسیار کمی است. در سناریو سوم، ربات در نواحی قطبی، به‌ویژه اطراف گرینلند و جنوبگان، به حرکت درمی‌آید.



شکل ۲۴- ردیابی مرجع کنترلر در حضور اغتشاش 0.6 نیوتن

شرایط دمایی و شوری خاص در این نواحی باعث می‌شود آب‌های سطحی بسیار سرد و شور شده و چگالی آنها افزایش یابد. این افزایش چگالی منجر به فرورفتن سریع توده‌های آب به اعماق اقیانوس می‌شود (فرآیند تشکیل آب‌های عمیق) که یکی از موتورهای اصلی گردش عمومی اقیانوسی^۱ است.

سرعت فرونشینی این آب‌ها در قطب‌ها بسیار بیشتر از شرایط استاندارد است و در بازه بین 0.1 تا 0.15 متر بر ثانیه قرار دارد. با این حال، در سناریوی ترکیبی حاضر، پدیده‌های شدیدتر دینامیکی

² Internal waves

¹ Thermohaline circulation

کنترلر H_∞ طراحی شده به دلیل پایداری حلقه بسته، از بروز رفتار واگرا جلوگیری می‌کند و در برابر اغتشاشات محدود، خروجی را در محدوده‌ای مشخص نگه می‌دارد. با این حال، همان‌طور که در نتایج چهار مرحله به‌وضوح مشاهده شد، به دلیل نبود یک انتگرال‌گیر خالص در ساختار کنترلر H_∞ و عدم امکان استفاده از قطب صفر در تابع وزن، سیستم قادر به حذف کامل اغتشاش پله‌ای نیست و پس از اعمال اغتشاش جریان، در یک نقطه تعادل جدید با خطای کوچک متوقف می‌شود. این رفتار مطابق انتظار برای کنترلرهای غیرانتگرالی در مواجهه با اغتشاش ثابت است و بیان می‌کند که در چنین شرایطی دستیابی به حذف کامل خطا نیازمند بازطراحی یا افزودن مؤلفه مناسب برای جبران خطا است.

۴-۲-۳- توان پیشران عمودی

سیستم شامل دو تراستر با توان ۳۶ وات و نیروی پیشران ۱/۲ نیوتن برای هر واحد است و در مجموع ۴/۲ نیوتن نیروی عمودی تولید می‌کند. این مقدار برای غلبه بر جریان‌های عمودی قوی (حدود ۱ نیوتن) کافی بوده و حاشیه اطمینان مناسبی ایجاد می‌کند.

۵- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد

به‌منظور ارزیابی جامع چارچوب پیشنهادی، سناریوهای شبیه‌سازی در سه سطح: صحت‌سنجی فیزیکی مدل (حلقه - باز)، عملکرد کنترلی (حلقه - بسته) و دقت تخمین‌گر اجرا گردید [۲۲].

۵-۱- عملکرد سیستم کنترل حلقه - بسته

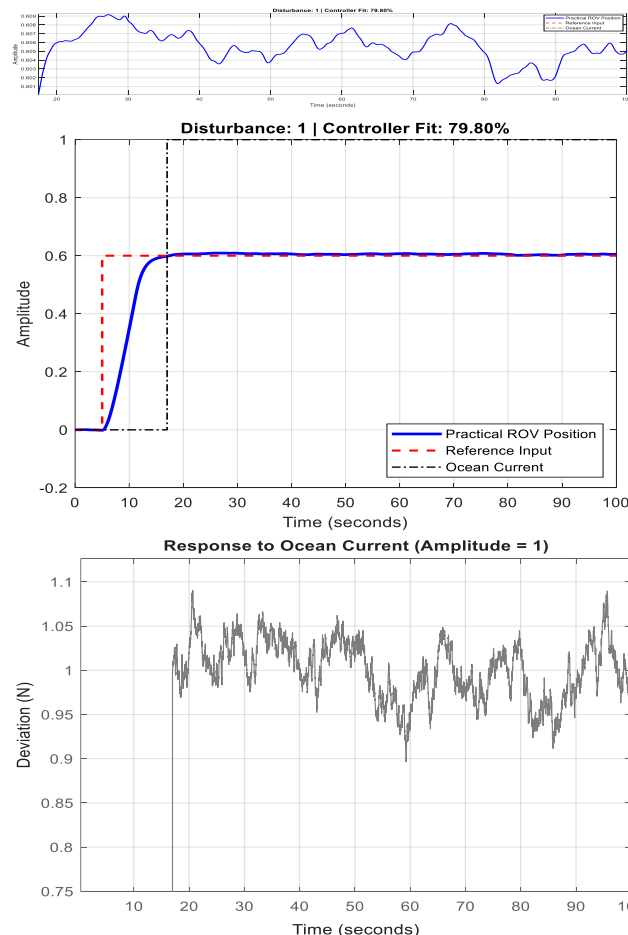
کنترل‌کننده مقاوم H_∞ طراحی شده در بخش قبل، در یک سناریوی تغییر عمق پله‌ای (از ۰ به ۰/۶ متر) ارزیابی شد.

۵-۱-۱- پاسخ زمانی

سیستم توانست در مدت زمان ۵ ثانیه به عمق مطلوب برسد. برخلاف کنترل‌کننده PID سنتی که در مطالعات پیشین دچار فرافروش^۱ قابل توجه بود، کنترل‌کننده پیشنهادی پاسخی بدون فرافروش و با خطای حالت ماندگار صفر ارائه داد [۱۸].

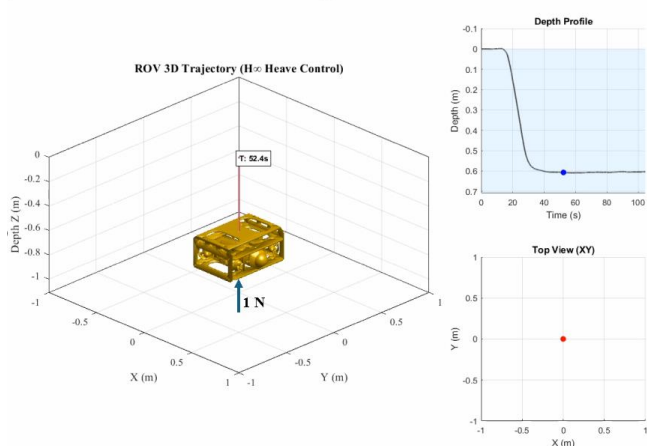
۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک معماری یکپارچه شامل مدل‌سازی دینامیکی، شناسایی داده‌محور سیستم و طراحی کنترل‌کننده مقاوم H_∞ برای کنترل عمق ROV ارائه و اعتبارسنجی شد. الگوریتم گاوس - نیوتن توانست مدل مرتبه اول دینامیک حرکت عمودی را با دقت برازش حدود ۹۷ درصد استخراج کند و هزینه محاسباتی مدل‌سازی را نسبت به رویکردهای تحلیلی شش درجه آزادی کاهش دهد. کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده نیز با دستیابی به حاشیه فاز ۷۲ درجه و حاشیه بهره ۴۵ دسی‌بل، فرمان پله عمق را در مدت ۵



شکل ۲۵- ردیابی مرجع کنترلر در حضور اغتشاش ۱ نیوتن

بر اساس شبیه‌سازی نهایی، این مرحله با اغتشاش جریان با سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه و نیروی اعمالی ۱ نیوتن به‌صورت انیمیشن خروجی گرفته شد که نتایج مربوط به توانایی کنترلر در شکل (۲۶) به‌خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۲۶- انیمیشن رفتار ربات در حضور اغتشاش ۱ نیوتن

در مراحل فوق، کنترلر ثلثت بوده و تولنایی آن در ردیابی مرجع پله در حضور عدم قطعیت‌های جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های چندمرحله‌ای نشان داد که

¹ Overshoot

8- Walker, K. L. et al. (2021). *Experimental Validation of Unsteady Wave Induced Loads on a Stationary Remotely Operated Vehicle*. in 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2242-2248, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562010>.

9- Batmani, Y. and Najafi, S. (2021). *Event-Triggered H_∞ Depth Control of Remotely Operated Underwater Vehicles*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 2, pp. 1224-1232, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TSMC.2019.2896382>.

10- Bellahcene, Z., Laidani, A., Belherazem, A., and Bouhamida, M. (2025). *Robust Adaptive Controller Design Based on Neural Networks for a Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV)*. Automatic Control and Computer Sciences, vol. 59, no. 4, pp. 467-480, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TSMC.2019.289638210.3103/S0146411625700622>.

11- Nguyen, K. H., Caharija, W., Ohrem, S. J., Gravdahl, J. T., Loria, A., and Amundsen, H. B. (2026). *Robust Control of Autonomous Remotely Operated Vehicles at Exposed Aquaculture Sites*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 34, no. 3, pp. 1232-1247, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TSMC.2019.289638210.1109/TCST.2026.3662005>.

12- Dong, J. and Duan, X. (2023). *A Robust Control via a Fuzzy System with PID for the ROV*. Sensors, vol. 23, no. 2, p. 821, doi: <https://dx.doi.org/10.3390/s23020821>.

13- Svendby, E. (2007). *Robust control of ROV/AUVs*. Master's Thesis, Institutt for Teknisk Kybernetikk.

14- García-Valdovinos, L. G., Salgado-Jiménez, T., Bandala-Sánchez, M., Nava-Balazar, L., Hernández-Alvarado, R., and Cruz-Ledesma, J. A. (2014). *Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle*. International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 11, no. 1, p. 1, doi: <https://dx.doi.org/10.5772/56810>.

15- Cao, Y., Li, B., Li, Q., Stokes, A. A., Ingram, D. M., and Kiprakis, A. (2020). *A Nonlinear Model Predictive Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles With Disturbance Rejection*. IEEE Access, vol. 8, pp. 158622-158634, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020530>.

16- Ibrahim, M. Y., Rehan, A., Chehadeh, M., Boiko, I., and Zweiri, Y. (2027). *Identification and control of ROV attitude and heave: A compact approach using Modified Relay Feedback Test*. Mechatronics, vol. 121, p. 103612, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2026.103612>.

17- Society of Naval, T. Marine Engineers, and S. Research Committee (1950). *Hydrodynamics, Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid: Report of the American Towing*

ثانیه، بدون فراجاهش و با خطای ملندگار بسیار ناچیز، دنبال کرد. همچنین، در حضور جریان عمودی اقیانوسی با سرعت ۲ متر بر ثانیه و نیروی اغتشاش ۱ نیوتن، بیشینه انحراف موقعیت ROV کمتر از ۹ میلی‌متر باقی ماند که نشان‌دهنده مقاومت مناسب سامانه در برابر اغتشاشات محیطی است. با وجود این، نبود عملگر انتگرالی خالص در ساختار استاندارد کنترل‌کننده H_∞ می‌تواند در برابر اغتشاشات ثابت، خطای ماندگار اندکی ایجاد کند. از این رو، استفاده از ساختارهای ترکیبی $PI-H_\infty$ و پیاده‌سازی بلادرنگ کنترل‌کننده بر روی سخت‌افزار شناور و در آزمون‌های حوضچه، به‌عنوان مسیرهای پیشنهادی برای ادامه این پژوهش در نظر گرفته می‌شوند.

۷- منابع

1- He, Y., Wang, D. B., and Ali, Z. A. (2020). *A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle*. Measurement and Control, vol. 53, no. 9-10, pp. 1561-1570, doi: <https://doi.org/10.1177/0020294020952483>.

2- Khodabandehloo far, J., Najari, A., soleymani, s., and Seif, M. S. (2025). *Improving Dynamic Positioning (DP) System Performance Using a Two-Stage Control System*. Marine-Engineering, vol. 21, no. 47, p. 108, doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TSMC.2019.289638210.66224/marineeng.21.47.9>. (In Persian)

3- Fossen, T. I. (2021). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley.

4- Lack, S., Rentzow, E., and Jeansch, T. (2019). *Experimental Parameter Identification for an open-frame ROV: Comparison of towing tank tests and open water self-propelled tests*. IFAC-PapersOnLine, vol. 52, no. 21, pp. 271-276, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.319>.

5- Zohedi, F. N., Mohd Aras, M. S., Kasdirin, H. A., Bahar, M. B., and Abdullah, L. (2023). *System identification modelling, controller design and hardware testing for vertical trajectory of underwater remotely operated vehicle (ROV)*. IIUM Engineering Journal, vol. 24, no. 2, pp. 131 - 140, doi: <https://doi.org/10.31436/iiumej.v24i2.2759>.

6- Najari, A. and Seif, M. S. (2025). *Dynamic modeling of surface vessel maneuvering based on deep learning using recurrent neural networks*. Marine-Engineering, vol. 21, no. 46, p. 80, doi: <https://doi.org/10.61882/marineeng.21.46.7>. (In Persian)

7- Hasanvand, A. and Seif, M. s. (2023). *Parametric Study of Sut Glider: Investigating Hydrodynamic Performance and Maneuverability*. Modares Mechanical Engineering, vol. 23, no. 3, pp. 173-182, doi: <https://doi.org/10.52547/mme.23.3.173>. (In Persian)

- Tank Conference (Technical and research bulletin)*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- 18- Rasouli, A. Nasiri, H. (2018). *Design and Manufacture Pipeline monitoring ROV*. Sharif University of Technology. (In Persian)
- 19- Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User (Prentice Hall information and system sciences series)*. Prentice Hall PTR.
- 20- Hartley, H. O. (1961). *The Modified Gauss-Newton Method for the Fitting of Non-Linear Regression Functions by Least Squares*. *Technometrics*, vol. 3, no. 2, pp. 269-280, doi: <https://dx.doi.org/10.2307/1266117>.
- 21- Postlethwaite, I. (1996). *Multivariable feedback control: analysis and design*. John Wiley & Sons, Inc.
- 22- Wang, P., Tian, X., Lu, W., Hu, Z., and Luo, Y. (2019). *Dynamic modeling and simulations of the wave glider*. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 66, pp. 77-96, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.08.027>.