J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (100-117)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

A Robust Depth Control Approach for ROVs Based on System Identification

Alireza Houshmand Sarvestani *[1], **Amirhossein Najari**[2], **Mohammad Said Seif**[3]

[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/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۱۱۷-۱۰۰)

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 کارشناسی‌ارشد 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

اطلاعات مقاله

تاریخچه 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

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 ۴درجه آزادی، شناسایی دینامیک سیستم و کنترل مقاوم برای کنترل عمق یک ربات زیرسطحی ROV ارائه شده است. ابتدا با تحریک مدل شبیه‌سازی‌شده 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 کنترل‌کننده 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 فراجهش 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.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

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 پایدار 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[2] 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[3] است. ازسوی‌دیگر، اغتشاشات محیطی مانند جریان‌های دریایی و نویز حسگرها، کارایی کنترل‌کننده‌های کلاسیک نظیر PID[4] 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[5] 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. ازسوی‌دیگر، 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 یاو[6] با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداخته‌اند؛ به‌طوری‌که در صورت عدم دسترسی به شرایط آزمون واقعی، داده‌های حاصل از مانور زیگزاگ 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. حسنوند و همکاران (۲۰۲۴) با ساخت یک مدل فیزیکی از گلایدر 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 حسنوند 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

[1] Remotely Operated Vehicles
[2] DP-Dynamic Positioning
[3] CFD-Computational Fluid Dynamics
[4] PID-Proportional–Integral–Derivative
[5] Open-frame
[6] Yaw Rate

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

چالش مهم محسوب می‌شود. در میان روش‌های کنترل مقاوم، کنترل H_∞ به دلیل امکان محدودسازی اثر اغتشاشات و خطاهای مدل بر خروجی سیستم، گزینه‌ای مناسب برای سامانه‌های زیرآبی محسوب می‌شود. کنترل عمق H_∞ را برای ROV بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که این روش می‌تواند در شرایط وجود عدم قطعیت و محدودیت‌های ارتباطی، عملکرد ردیابی و پایداری سیستم را حفظ کند [۹-۱۱]. در مقابل، استراتژی‌های کنترل پیشرفته و مقاوم نظیر مد لغزشی[1] ، کنترل پیش‌بین مدل[2] و سایر روش‌های مشابه، باهدف تضمین پایداری و عملکرد مطلوب در حضور عدم قطعیت‌ها توسعه‌یافته‌اند [۱۲].

اسوندبی (۲۰۰۷) نشان داد که کنترل مقاوم می‌تولند خطاهای ناشی از تخمین ناقص پارامترها و نیروهای کابل را جبران کند [۱۳]. در پژوهش‌های اخیر، مقابله با اغتشاشات ناشناخته و عدم قطعیت‌های مدل از طریق ترکیب کنترل‌کننده مقاوم با مشاهده‌گرهای اغتشاش یا کنترل پیش‌بین نیز بررسی شده است [۱۴]. چنین رویکردهایی با تخمین اثر جریان‌های دریایی و دینامیک‌های مدل‌نشده، امکان بهبود عملکرد کنترل موقعیت و مسیر ROV را فراهم می‌کنند [۱۵]. پیچیدگی محاسباتی و وابستگی این روش‌ها به مدل دقیق، استفاده عملی از آن‌ها را با محدودیت‌هایی همراه می‌سازد. بااین‌حال، بسیاری از این روش‌ها صرفاً در محیط شبیه‌سازی و بدون درنظرگرفتن نویزهای واقعی حسگرها ارزیابی‌شده‌اند.

در یک پژوهش، با استفاده از یک آزمون اصلاح‌شده، رفتار عمودی و حرکات رول و پیچ ROV شناسایی شده و بر پایه مدل‌های به‌دست‌آمده، کنترل‌کننده‌های PID طراحی و آزمایش شده‌اند [۱۶]. تفاوت پژوهش حاضر در تمرکز اختصاصی بر کنترل عمق و استفاده از کنترل مقاوم H_∞ برای کاهش اثر عدم قطعیت‌ها در شبیه‌سازی حلقه بسته است.

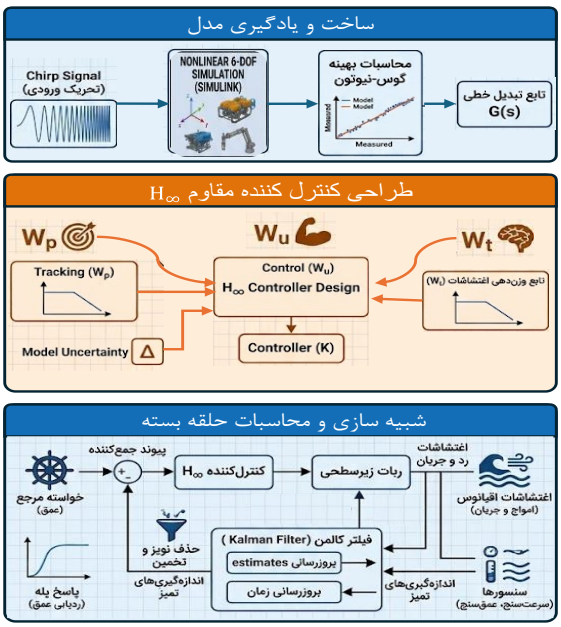
مرور ادبیات نشان می‌دهد که اکثر مطالعات یا بر مدل‌سازی دقیق فیزیکی با هزینه‌های محاسباتی بالا تمرکز دارند و یا از روش‌های کنترلی پیچیده بر روی مدل‌های ساده‌سازی شده استفاده می‌کنند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های شناسایی سیستم به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای استخراج مدل‌های ریاضی از داده‌های تجربی مطرح‌شده‌اند، اما تلفیق این مدل‌های استخراج‌شده با استراتژی‌های کنترل مقاوم برای تضمین پایداری در حضور عدم قطعیت‌ها، کمتر به‌صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اغلب مطالعات پیشین یا صرفاً بر جنبه‌های تئوری کنترل متمرکز بوده‌اند و یا از مدل‌های شبیه‌سازی ایدئال بدون درنظرگرفتن نویز واقعی حسگرها استفاده کرده‌اند.

این پژوهش باهدف پر کردن این شکاف، یک چارچوب جامع برای شناسایی سیستم، تخمین حالت و کنترل مقاوم عمق یک ربات زیرسطحی قابل‌مشاهده در شکل (۱) و در کلاس مشاهده‌گر (ربات کاوش) ارائه می‌دهد. در این راستا، ابتدا به‌جای تکیه بر مدل‌های پیچیده فیزیکی، یک مدل تابع تبدیل[3] خطی با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی سیستم و داده‌های ورودی - خروجی استخراج می‌شود. سپس، بر مبنای این مدل و با لحاظ‌کردن عدم قطعیت‌های ساختاری و نویز اندازه‌گیری، یک کنترل‌کننده مقاوم H_∞ طراحی می‌گردد. نوآوری این تحقیق در پیاده‌سازی زنجیره‌ای فرآیند شناسایی، کنترل و اعتبارسنجی آن در محیط شبیه‌سازی با لحاظ‌کردن رفتار غیرخطی و اغتشاشات محیطی است تا الگویی کارآمد و کم‌هزینه برای توسعه سامانه‌های کنترل عمق ارائه گردد.



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

به‌منظور تبیین یکپارچه مراحل پژوهش، فلوچارت الگوریتم حل و فرآیند زنجیره‌ای شناسایی، طراحی کنترل‌کننده و اعتبارسنجی حلقه - بسته در شکل (۲) ارائه شده است که نقشه راه روش‌شناسی مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه راه روش‌شناسی الگوریتم حل مسئله

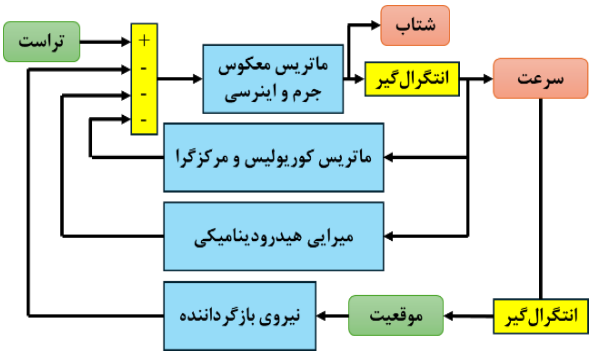
[1] SMC-Sliding Mode Control
[2] MPC-Model Predictive Control
[3] TF-Transfer Function

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

۲- مدل‌سازی دینامیکی

توسعه یک راهبُرد کنترلی دقیق نیازمند استخراج مدل ریاضی معتبر از رفتار ربات در محیط سیال است. در این پژوهش، مدل‌سازی بر اساس چارچوب استاندارد ۶ درجه آزادی[1] انجام‌شده که شامل دو بخش سینماتیک (هندسه حرکت) و دینامیک (نیروهای وارده) است که در بخش Simulink نرم‌افزار MATLAB همانند شکل (۳) پیاده‌سازی شده است [۳]. در این شکل به‌خوبی ورودی‌های مدل دینامیکی (تراست و موقعیت) به‌صورت سبزرنگ و خروجی‌های مدل (شتاب و سرعت) به رنگ قرمز نمایش داده شد؛ همچنین برای سادگی فرمول‌ها و روابط ریاضی حاکم در بلوک آبی‌رنگ نمایش داده شد.

محاسبات ورودی تراست به‌وسیله ضرب ولتاژ در ماتریس تخصیص تراست انجام و به‌عنوان ورودی به مدل وارد شد. پس از محاسبات، مدل شتاب را محاسبه کرده که پس از دو بار انتگرال‌گیری سرعت و موقعیت را به‌صورت خروجی می‌دهد؛ در همین حین داده‌های موقعیت در یک حلقه بازخورد به‌صورت ورودی برای انجام محاسبات و به بلوک نیروی بازگرداننده وارد می‌شود.



شکل ۳- نمودار بلوکی مدل ROV غیرخطی

۲-۱- سینماتیک ربات زیرسطحی

پایه مدل‌سازی ریاضی هر ربات دریایی، معادلات حرکت جسم صلب در فضای سه‌بعدی است [۳]. بر اساس چارچوب‌های استاندارد، حرکت ربات زیرسطحی با ۶ درجه آزادی توصیف می‌شود که مطابق جدول (۱) شامل سه حرکت انتقالی (سرج[2] و سوی[3] و هیو[4]) و سه حرکت دورانی (رول[5] و پیچ[6] و یاو[7]) است [۱۷].

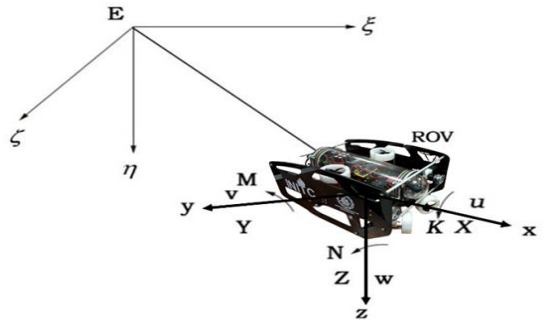
جدول ۱ - علایم استاندارد ربات زیرسطحی [۱۷]

نام حرکت	ممان‌ها و نیروها	سرعت‌های خطی و دورانی	موقعیت و زوایای اویلری
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 می‌شود:

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

۲. دستگاه متصل به بدنه: برای بیان سرعت‌های خطی و زاویه‌ای و نیروهای وارده(ν).



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

رابطه کلی سینماتیکی به‌صورت برداری زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{p}^n \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^b \\ \omega^b \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

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

[1] DOF-Degrees of Freedom
[2] Surge
[3] Sway
[4] Heave
[5] Rol
[6] Pitch
[7] Yaw

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

۲–۱–۱– ماتریس تبدیل سرعت خطی(J_1)

این ماتریس پل ارتباطی میان سرعت‌های اندازه‌گیری‌شده 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 درواقع همان ماتریس دوران[1] است که از طریق زوایای اویلر (ϕ, θ, ψ) به دست می‌آید. معادلات آن به‌صورت زیر است [۳]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\Theta) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (۲)$$

که ساختار ماتریس $\mathbf{J}_1$ به شرح زیر است [۲]:

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

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (۳)$$

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 اویلر $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ را برقرار می‌کند [۳]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\Theta) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (۴)$$

ساختار ماتریس J_2 به‌صورت زیر است [۳]:

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (۵)$$

۲–۲– دینامیک ربات زیرسطحی

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

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (۶)$$

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

۲–۲–۱– ماتریس جرم و اینرسی(M)

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

$$M = M_{RB} + M_A \quad (۷)$$

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) :

هنگامی‌که جسم در سیال شتاب می‌گیرد، باید مقداری از سیال اطراف خود را نیز جابه‌جا کند. این پدیده به‌صورت 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 موردمطالعه (کاوش) که دارای تقارن محوری و سرعت عملیاتی پایین است، از عناصر غیرقطری (کوپلینگ) صرف‌نظر شده و ماتریس M_A به‌صورت قطری تقریب زده می‌شود.

۲–۲–۲– ماتریس کوریولیس و مرکزگرا($C(\nu)$)

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:

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) \quad (۸)$$

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 سوی القا کند. این اثرات در سرعت‌های بالا و مانورهای سریع اهمیت ویژه‌ای می‌یابند.

[1] Rotation Matrix

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

۲-۲-۳- ماتریس میرایی هیدرودینامیکی($\mathbf{D}(\nu)$)

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

$$\mathrm{D}(\nu) = \mathrm{D}_L + \mathrm{D}_{nl}(\nu) \quad (۹)$$

۱. **میرایی خطی ($\mathbf{D}_L$):** ناشی از اصطکاک پوسته و جریان لایه‌مرزی آرام است که در سرعت‌های بسیار پایین غالب است.

۲. **میرایی غیرخطی درجه دوم ($\mathbf{D}_{nl}$):** ناشی از پدیده جدایش جریان[1] و تشکیل گردابه[2] است. این نیرو متناسب با مربع سرعت ($\nu \mid \nu$) عمل می‌کند و به‌صورت $X_{u|u|} \mid u \mid u$ در معادلات ظاهر می‌شود. برای ربات‌های قاب‌باز[3] مانند ربات این پژوهش، ترم‌های غیرخطی غالب هستند.

۲-۲-۴- بردار نیروهای هیدرواستاتیک($\mathbf{g}(\eta)$)

این بردار شامل نیروهای وزن ($W = mg$) و شناوری ($B = \rho g V$) است. گشتاورهای بازگرداننده[4] 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 می‌شوند.

بردار $\mathbf{g}(\eta)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۳, ۱۲]:

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

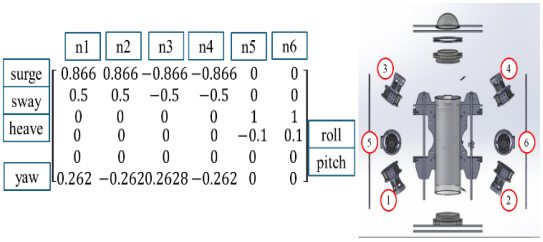
برای ربات موردنظر، مرکز ثقل پایین‌تر از مرکز شناوری طراحی‌شده تا پایداری استاتیکی در راستای رول و پیچ به‌صورت غیرفعال[5] تأمین شود.

۲-۲-۵- نیرو و گشتاور پیشرانه‌ها(τ)

نیروی محرکه ربات توسط N عدد پیشرانه[6] تأمین می‌شود. نگاشت نیروی تولیدی هر موتور (f_i) به نیروها و گشتاورهای بدنه (τ) توسط ماتریس آرایش پیشرانه‌ها[7] انجام می‌شود [۱۸]:

$$\tau = \mathrm{Tf} \quad (۱۱)$$

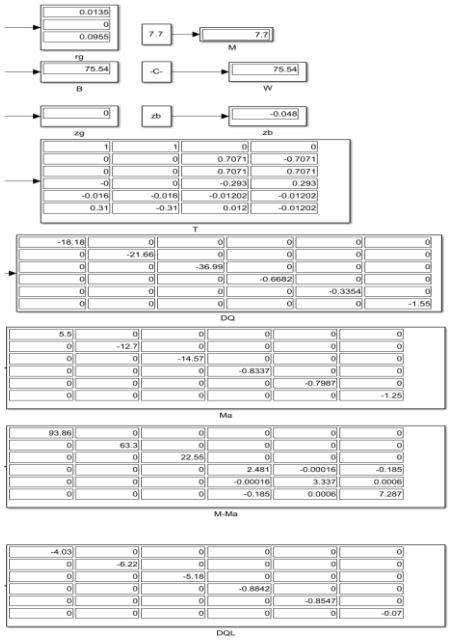
که در آن $\mathrm{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$ بردار نیروی تراست موتورهاست. همان‌طور که در شکل (۵) قابل‌مشاهده است ماتریس T بر اساس موقعیت هندسی و زاویه نصب هر پیشرانه نسبت به مرکز ثقل ربات استخراج می‌شود [۱۸]. همچنین رابطه بین ولتاژ ورودی به موتور (u) و نیروی تولیدی (f) معمولاً غیرخطی است، اما در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



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

۲-۲-۶- شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ حلقه - باز

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

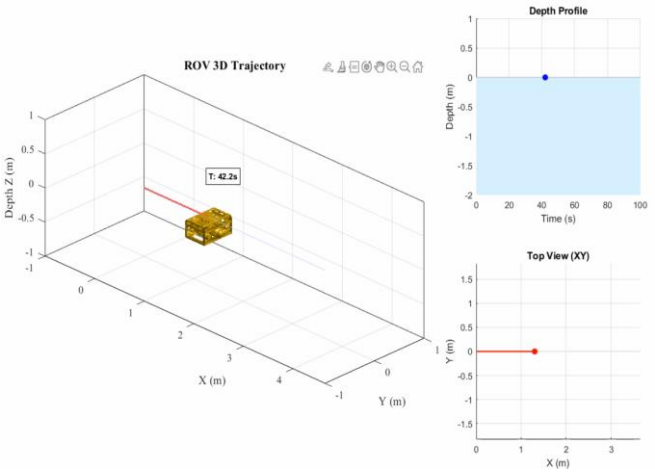


شکل ۶- ضرایب هیدرودینامیکی ربات کاوش [۱۸]

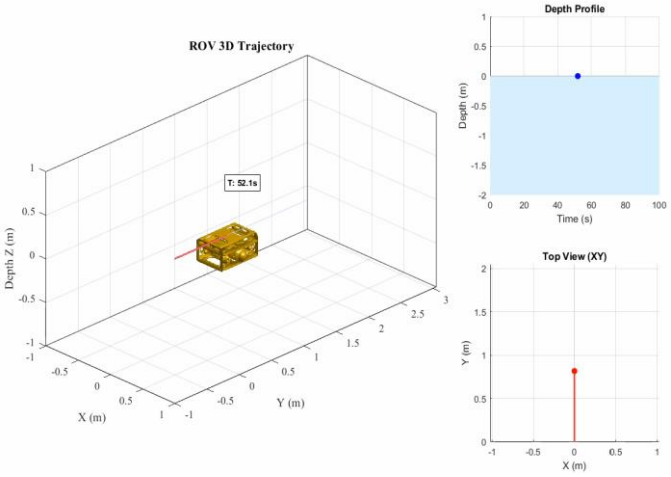
[1] Flow Separation
[2] Vortex Shedding
[3] Open-frame
[4] Restoring Moments
[5] Passive
[6] Thruster
[7] Thruster Configuration Matrix - T

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

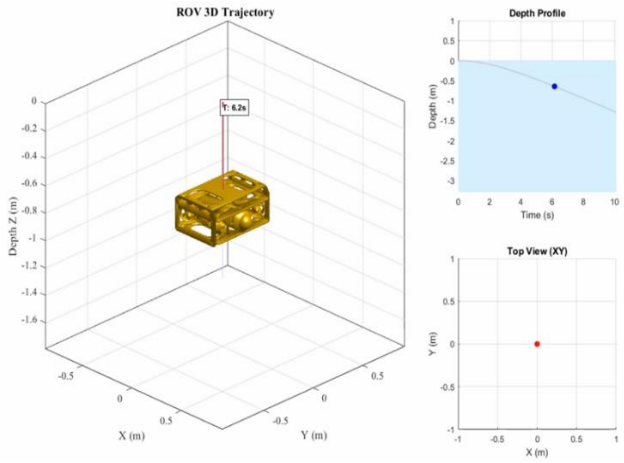
بدین منظور، سیگنال‌های تراست خالص برای تحریک جداگانه درجات آزادی (سرج، سوی، هیو و یاو) اعمال گردید [۱۹].
پس از شبیه‌سازی، خروجی‌ها به‌صورت نمودار سرعت - زمان و مکان - زمان همانند شکل (۱۱) به دست آمد. برای درک و مشاهده بهتر رفتار شبیه‌سازی ربات کاوش در نرم‌افزار MATLAB کدی جهت تولید انیمیشن نوشته شد که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



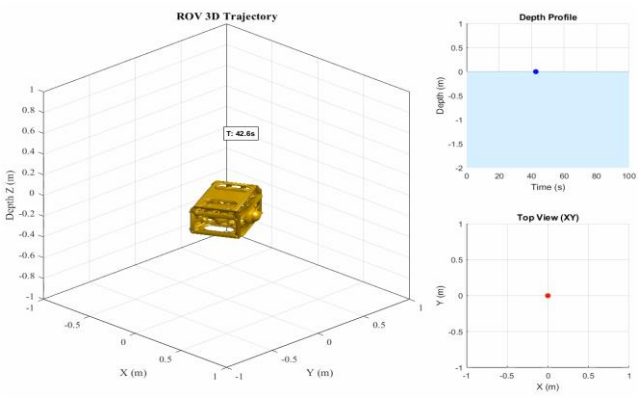
شکل ۷-شبیه‌سازی و صحت سنجی در حرکت سرج



شکل ۸-شبیه‌سازی و صحت سنجی در حرکت سوی

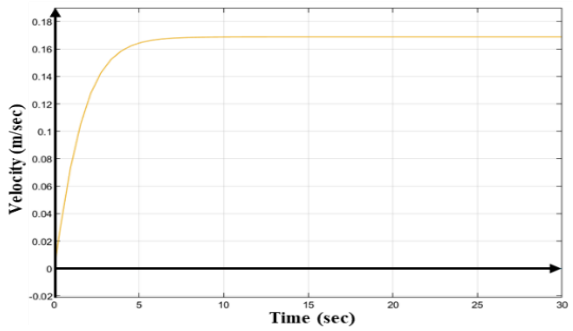


شکل ۹-شبیه‌سازی و صحت سنجی در حرکت هیو



شکل ۱۰-شبیه‌سازی و صحت سنجی در حرکت یاو

- **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[1]، استفاده از روش فعال‌سازی متضاد جفت‌های

[1] Sway

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

پیشرانه موفق شد گشتاورهای ناخواسته مانند یاو[1] را خنثی کند که نشان‌دهنده دقت ماتریس تخصیص نیرو (**T**) است [۵, ۸].

۲-۳- 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 محدودبودن زاویه‌های رول $(\phi \approx 0)$ و پیچ $(\theta \approx 0)$ در مانور عمودی، مؤلفه حرکت در راستای محور Z (حرکت هیو با متغیر سرعتw) از معادله کلی (۶) به‌صورت رابطه (۱۲) تفکیک می‌شود [۳]:

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + (D_w + D_{w|w|} \mid w \mid)w + (W - B) = \tau_z \qquad (۱۲)$$

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

$$G_w(s) = \frac{W(s)}{\tau_z(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \qquad (۱۳)$$

که در آن ثابت زمانی برابر $\tau = \frac{m - Z_{\dot{w}}}{d_{eq}}$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- مدل شناسایی سیستم

طراحی کنترل‌کننده‌های پیشرفته نظیر H_∞ نیازمند دردست‌داشتن مدل ریاضی خطی و دقیقی از سیستم است. برای مدل‌های آزمایشگاهی باتوجه‌به دشواری‌های تعیین دقیق ضرایب هیدرودینامیکی در مدل تحلیلی و ماهیت غیرخطی معادلات حرکت، در این پژوهش از رویکرد شناسایی سیستم مبتنی بر داده[2] برای استخراج تابع تبدیل حاکم بر دینامیک حرکت عمودی[3] استفاده شد [۵].

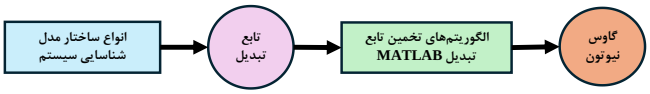
۱-۳- طراحی آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها

برای تحریک کامل مدهای دینامیکی سیستم، انتخاب سیگنال ورودی مناسب حیاتی است. بدین منظور، از سیگنال جاروی فرکانسی[4] 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 پیشرانه‌های 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.

۲-۳- 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

باتوجه‌به سعی و خطاهای متعدد در فرآیند تخمین تابع تبدیل و آزمون درجات مختلف صورت و مخرج و با درنظرگرفتن 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 درنتیجه مدل نهایی به‌صورت زیر تعیین شد:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \qquad (۱۴)$$

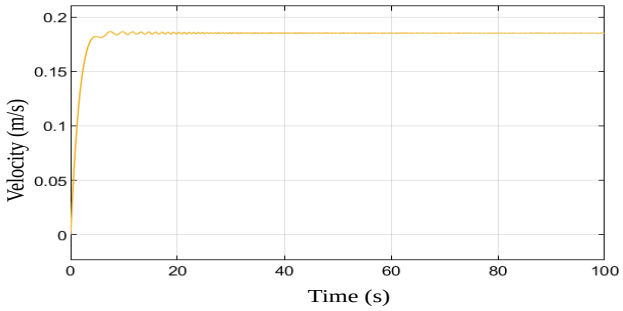
برای تخمین پارامترهای K (بهره استاتیکی) و τ (ثابت زمانی)، از الگوریتم بهینه‌سازی کمترین مربعات خطا[5] بر پایه روش تکرارپذیر گاوس - نیوتن استفاده شد [۲۰]. هدف این الگوریتم،

[1] Yaw
[2] Data-driven
[3] Heave
[4] Chirp Signal
[5] Least Squares

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

کمینه‌سازی تابع هزینه خطای میانگین مربعات[1] 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 به‌صورت 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 استخراج‌شده برای سرعت عمودی به‌صورت زیر به دست آمد:

$$G_{vel}(s) = \frac{0/01137}{s + 0/7062} \qquad (۱۵)$$

۳-۳- اعتبارسنجی مدل

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

۳-۳-۱- تطابق با داده‌های آموزش

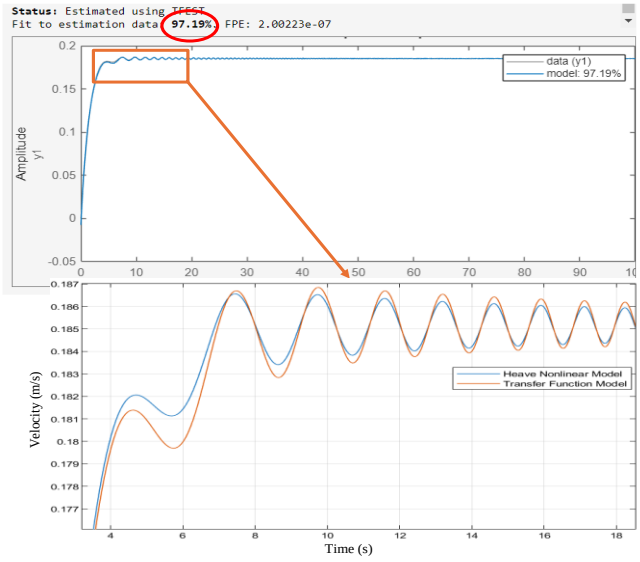
مدل خطی تخمین زده‌شده باید بتواند بادقت مناسبی رفتار پاسخ به ورودی مرجع جاروی فرکانسی را تقلید کند. مرحله حیاتی بعدی، اعتبارسنجی این مدل ساده برای درک محدودیت‌های آن است.

۳-۳-۲- تست با ورودی‌های ناشناخته

مدلی که برای یک مجموعه‌داده به‌خوبی کار می‌کند، ممکن است برای مجموعه‌داده دیگری کار نکند و اصطلاحاً دچار بیش برازش شود. ازاین‌رو مدل تابع تبدیل تولیدشده 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[2] IMU یا فشارسنج ثبت می‌شوند. قابل‌پیش‌بینی است که این داده‌ها هم در بخش تولید و هم در بخش ثبت خروجی دارای نویز اندازه‌گیری باشند؛ ازاین‌رو مدل باید در این شرایط نیز اعتبارسنجی شود.



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

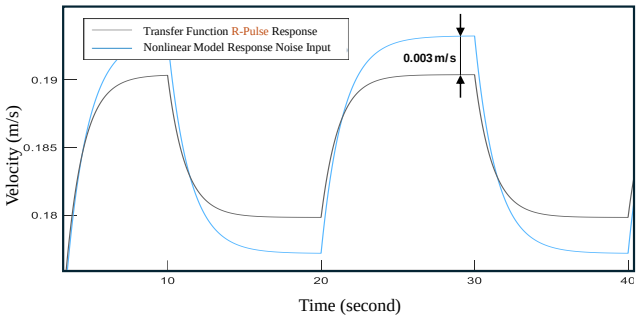
باتوجه‌به توضیحات بالا مرحله اول اعتبارسنجی مدل به‌خوبی انجام شد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده مطابق شکل (۱۴) مدل خطی توانست بادقت برازش بالای ۹۷درصد داده‌های ورودی جاروی فرکانسی را بازتولید کند.

در گام دوم، مطابق شکل (۱۵) فرآیند صحت سنجی مدل شناسایی‌شده 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 استفاده‌نشده بود، محک زده شد. نتایج نشان داد که مدل خطی توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم بادقت بالای ۸۶ درصد را دارد.

[1] MSE-Mean Squared Error

[2] IMU-Inertial Measurement Unit

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]



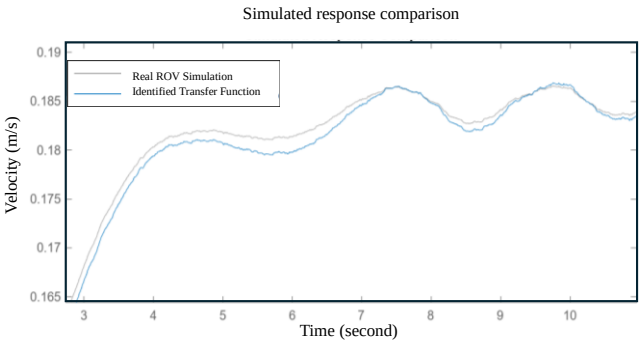
شکل ۱۵- میزان تطابق میان تابع تبدیل و مدل غیرخطی با ورودی پالس مستطیلی (بدون نویز)

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 نمایش‌داده‌شده است.

در گام سوم باید نشان داد که این تابع تبدیل توانایی آن را دارد که حتی در حضور نویز سفید گوسی 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 اندازه‌گیری‌شده مقایسه شود.

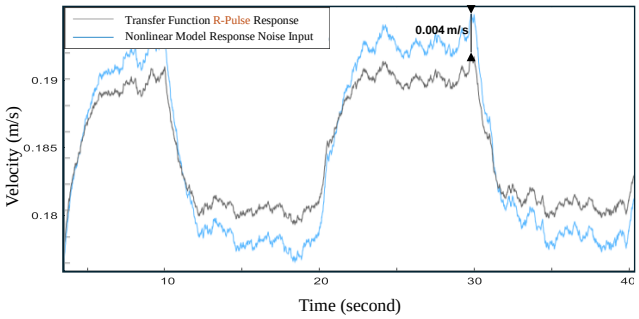
همان‌طور که در شکل (۱۶) آورده شده اثرات نویز ورودی بر داده‌ها را می‌توان مشاهده کرد همان‌طور که انتظار می‌رفت درصد تطابق مدل دینامیکی و مدل تابع تبدیل، مقدار ۰/۱۸درصد کاهش داشت. در این نمودار، خط مشکی نماینده مدل دینامیکی غیرخطی و خط آبی‌رنگ نمایانگر تابع تبدیل است که درصد تطابق آن مقدار خیلی کمی تغییر داشته است و تابع تبدیل همچنان بادقت بسیار مناسب۹۷درصد توانایی تخمین دینامیک غیرخطی عمق‌روی را دارد.



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

همان‌طور که در شکل (۱۷) نشان‌داده‌شده است در این مرحله دوباره تابع تبدیل با مرجع پالس مستطیلی صحت سنجی شد.

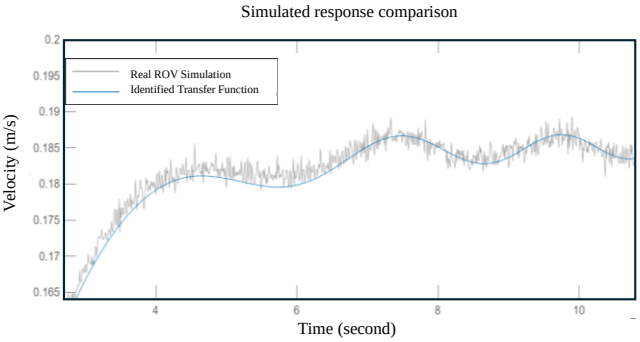
در این نمودار خط آبی نماینده مدل دینامیکی غیرخطی و خط مشکی رنگ خروجی سرعت تابع تبدیل در تحریک پالس مستطیلی را نشان می‌دهد بیشینه تفاوت در این دو پاسخ $0/001\ m/s$ نسبت به مرحله بدون نویز افزایش یافت و با کاهش ۰/۰۲درصد درصد تطابق تقریباً بدون تغییر باقی ماند.



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 یاIMU) تکرار شد؛ به‌گونه‌ای که اغتشاش نویز مستقیماً بر سیگنال سرعت اندازه‌گیری‌شده اعمال گردید.

همان‌طور که در شکل (۱۸) آورده شده این بار نویز سفید گوسی باقدرت و زمان نمونه‌برداری ۰.۰۱را 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 ۹۳درصد رسید؛ اما همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود تابع تبدیل به‌درستی روند را تشخیص داده است و برای تخمین دینامیک عمق‌روی مناسب است. در این شکل خط آبی نماینده مدل دینامیکی تخمین زده‌شده توسط تابع تبدیل و خط مشکی رنگ نشان‌دهنده پاسخ مدل دینامیکی غیرخطی است.

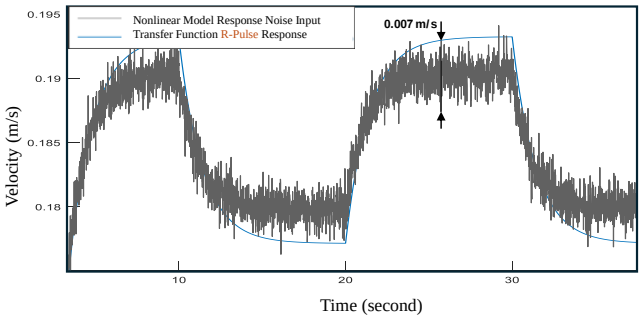


شکل ۱۸- برازش تابع تبدیل بر مدل با نویز خروجی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

مشابه با مراحل پیشین، اعتبارسنجی نهایی مدل شناسایی‌شده 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 پیش‌بینی رفتار سیستم بادقت بالای ۸۵درصد را دارد.

در این نمودار خط آبی‌رنگ نشان‌دهنده 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 می‌کند که مدل تابع تبدیل استخراج‌شده، دینامیک‌های اصلی عمق‌روی ربات را به‌درستی دنبال کرده و برای طراحی کنترل‌کننده 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 قطعیت‌های مدل تضمین کند.

۴-۱- طراحی کنترل‌کننده مقاوم H_∞

هدف کنترلی، ردیابی دقیق مرجع عمق باوجود اغتشاشات محیطی و تغییرات پارامتریک است. برای این منظور، از روش شکل‌دهی تابع حساسیت ترکیبی[1] استفاده شد [۲۱]. در این روش، مسئله کنترل به یک مسئله بهینه‌سازی نرم بی‌نهایت تبدیل می‌شود که هدف آن یافتن کنترل‌کننده $K(s)$ است به‌طوری‌که:

$$\min_{K} \| \mathbf{T}_{zw} \|_\infty = \min_{K} \left\| \begin{matrix} W_p S \\ W_u K S \\ W_t T \end{matrix} \right\|_\infty < \gamma \qquad (۱۶)$$

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

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 به‌صورت زیر ارائه می‌شود [۲۱]:

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

S: متغیر لاپلاس

m: حداکثر جهش (مقادیر پیشنهادی ۱/۵تا۲)

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

M_p: این پارامتر حداکثر میزان حذف خطای ماندگار را تعیین می‌کند.

باتوجه‌به تعریف و نقش ضرایب بالا، با جای‌گذاری مقادیر مناسب از طریق بهینه‌سازی مقادیر فوق به فرمول زیر می‌رسد:

$$W_p(s) = \frac{0/5s + 500}{s + 0/0001} \qquad (۱۸)$$

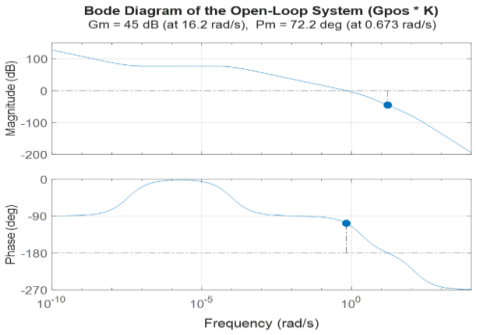
۴-۱-۲- وزن تلاش کنترلی(W_u)

مقدار ثابت 0/1 برای محدودکردن دامنه سیگنال ورودی به پیشرانه‌ها و جلوگیری از اشباع عملگرها و عدم آسیب به پیشرانه‌ها.

۴-۱-۳- وزن عدم قطعیت(W_t)

مقدار ثابت۰/۰۵ که به حفظ پایداری مقاوم کمک می‌کند و مانع تقویت نویز، تشدید و ناپایداری در فرکانس‌های بالا می‌شود. وزن عدم قطعیت سیستم را در برابر خطاهای مدل و تغییرات محیطی محافظت کرده و در کاربردهایی مانند کنترل عمق ROV، باعث می‌شود کنترل‌گر حتی تحت جریان‌های متغیر و اغتشاشات سریع نیز پایدار و ایمن عمل کند.

کنترل‌کننده اولیه با حل معادلات ریکاتی جبری مربوطه سنتز شد و نتایج تحلیل پایداری (نمودار بود) نشان‌دهنده حاشیه فاز $72°$ و حاشیه بهره $45dB$ است که تضمین‌کننده پایداری مقاوم سیستم هست.



شکل ۲۰- نمودار بود کنترلر مقاوم H_∞

[1] Mixed-Sensitivity

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

معادله کنترلر طراحی‌شده به شرح زیر است:

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

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

۴-۲- بررسی کنترل‌کننده عمق اولیه در حضور عدم قطعیت جریان عمودی و بویانسی

در تحلیل حرکت عمودی ربات زیردریایی، نقش نیروهای هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک و اثر جریان‌های عمودی اهمیت ویژه‌ای دارد. باتوجه‌به هندسه بدنه و مساحت تصویر شده در نمای بالا $A_p = 403/25\ cm^2$، 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.

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

بر اساس داده‌های آماری، سرعت جریان‌های عمودی به‌طورکلی کمتر از جریان‌های افقی هستند و در سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که جزئیات آن را می‌توان در جدول۲ 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	۰/۰۱ -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) قابل‌مشاهده 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 ۰/۲متر بر ثانیه. همرفت زمانی رخ می‌دهد که آب سطحی به دلیل سردی و چگالی بالا به‌سرعت 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 $v_z = 0/2\ m/s$ 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)	$(403/25\ cm^2)$
سرعت جریان عمودی(v_z)	$[0 - 0/2]\ m/s$
ضریب پسا (C_d)	۱/۲

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

در شبیه‌سازی، برای سرعت‌های ۰ تا۲/۰ 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.

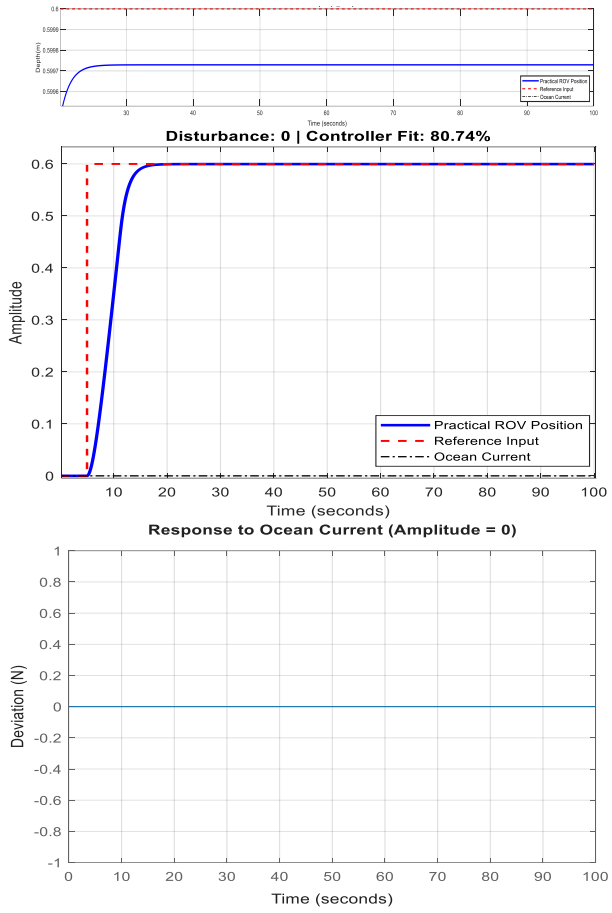
در مرحله‌ی پیشین، هنگام تخمین تابع تبدیل مشاهده شد که اگرچه مدل خطی شده رفتار سیستم را بادقت قابل‌قبولی دنبال می‌کرد، اما همچنان خطایی در حدود ۱۵ درصد در مدل ارائه‌شده وجود داشت. بر همین اساس، سناریوی اول (طراحی کنترلر در غیاب اغتشاش) با دو هدف اصلی، توانایی ردیابی مرجع و بهبود خطای تابع تبدیل تدوین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

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

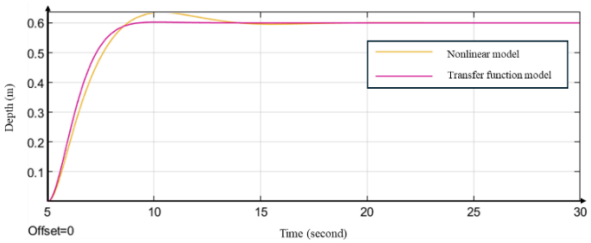
تعیین گردید، بدین منظور ابتدا یک سیگنال عمق‌روی پله ۰/۶متر به‌عنوان ورودی مرجع به حلقه کنترلی اعمال شد.

باتوجه‌به 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 ۰/۶متر 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. شایان‌ذکر است که مشخصات ذکر شده برای توانایی عمق‌روی ربات، مبنای طراحی کنترلر قرار داده شد.



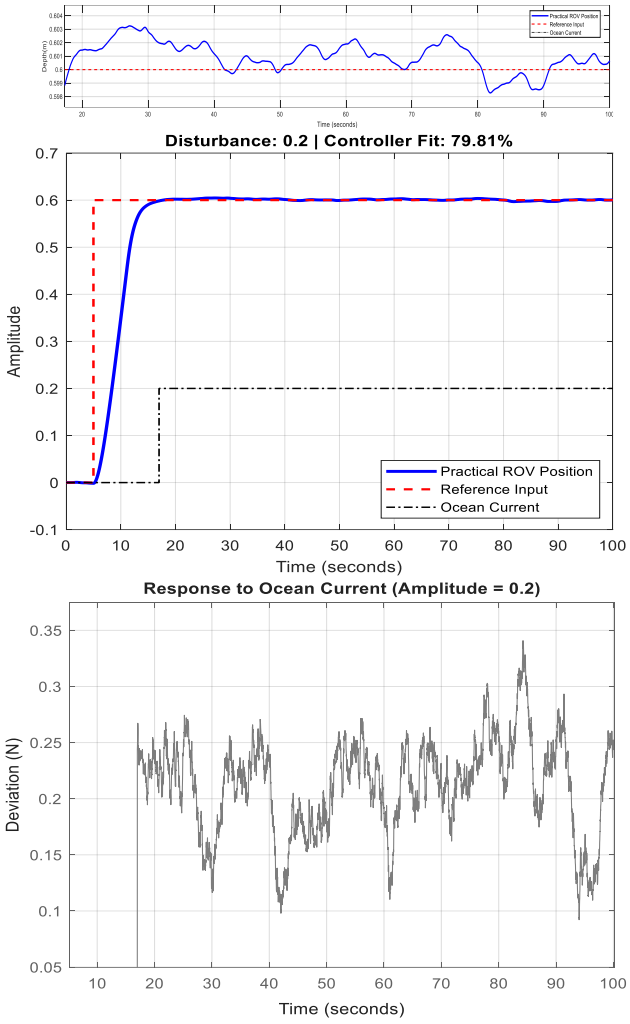
شکل ۲۱-ردیابی مرجع کنترلر بدون حضور اغتشاش جریان

بهبود خطای تابع تبدیل دومین هدفی بود که تعیین گردید همان‌گونه که در شکل (۲۲) نشان‌داده‌شده سیگنال مرجع عمق پله ۰/۶متر 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 طراحی‌شده توانست تا حدی درصد عدم تطابق مدل تابع تبدیل را کاهش دهد (از ۱۵ درصد به ۸ درصد).



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 ۰/۲نیوتن

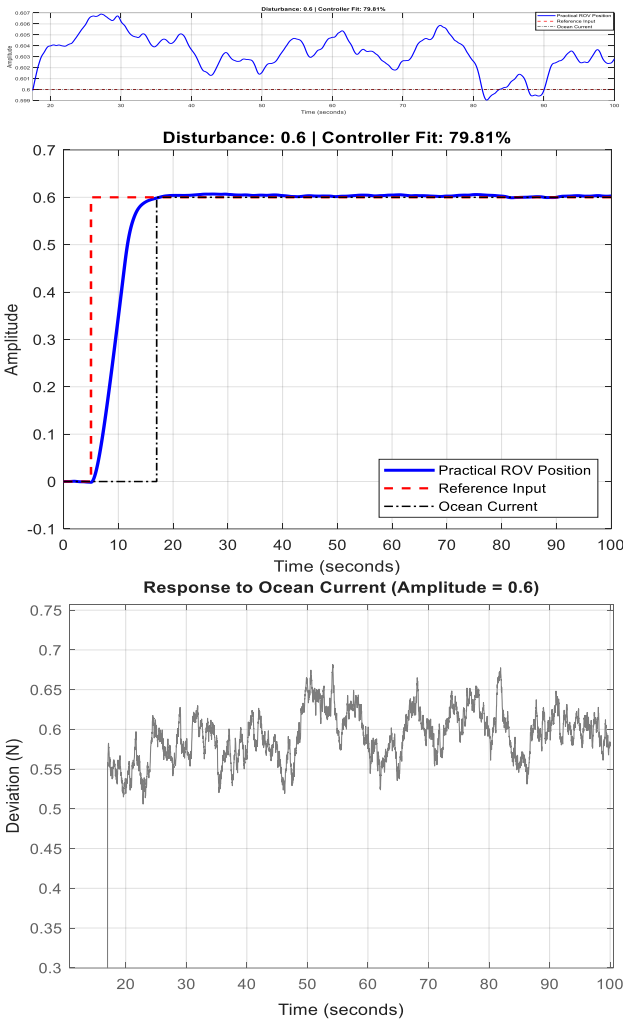
در اغلب نواحی اقیانوسی و دریایی، این پدیده معمولاً با شیبی بسیار آرام رخ می‌دهند. این فرآیندها شامل حرکت آهسته توده‌های آب به سمت بالا یا پایین در ستون آب هستند و نقش مهمی در تهویه آب‌های عمیق، انتقال مواد مغذی و تنظیم چرخه‌های زیست‌محیطی دارند.

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

در ردیابی مرجع عمق ۰/۶متر تولید شد و می‌توان دید که بااین‌حال که درصد تطابق ردیابی مرجع کنترلر ۱ درصد کاهش‌یافته ولی همچنان بادقت بسیار خوبی مرجع را دنبال می‌کند و در عمق ۰/۶ثابت باقی‌مانده. در بالا اما مشاهده می‌شود که نرخ خطا در بیشینه‌کردن حالت ۵ 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 ۰/۶نیوتن

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[1] است.

سرعت فرونشینی این آب‌ها در قطب‌ها بسیار بیشتر از شرایط استاندارد است و در بازه بین ۰/۰۱تا ۰/۱ متر بر ثانیه قرار دارد. بااین‌حال، در سناریوی ترکیبی حاضر، پدیده‌های شدیدتر دینامیکی نیز لحاظ شده است: مطابق سناریوی شماره ۳، تحریک خارجی معادل ۰/۶نیوتن و سرعت جریان عمودی ۰/۱۵۵ 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[2] و جابه‌جایی‌های عمودی پرسرعت شود.

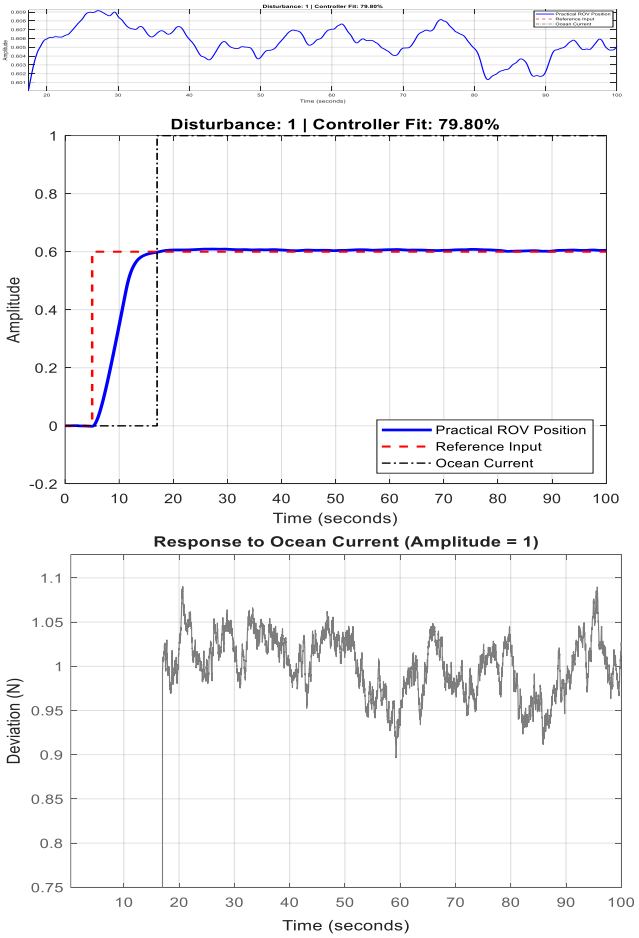
نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که کنترلر اولیه باوجوداین اغتشاش (فرونشینی سریع قطبی به همراه نیروی ۰/۶نیوتنی و جریان۰/۱۵۵ متر بر ثانیه) همچنان توانسته است مرجع عمق را به‌درستی ردیابی کند. اگرچه درصد تطابق کاهش نیافته است، اما خطای بیشینه به ۷ میلی‌متر می‌رسد. بااین‌حال، کنترلر قادر است ربات را در عمق مرجع ۰/۶متر حفظ کند که نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول آن در برابر شدیدترین شرایط دینامیکی اقیانوس‌های قطبی است.

در سناریوی چهارم، ربات زیرسطحی موظف است عمق مرجع ۰/۶ متر را در حضور اغتشاشات فزاینده جریان عمودی آب ردیابی کند. برای ارزیابی مرزهای عملکرد کنترلر، شدت اغتشاش به ۱ نیوتن افزایش می‌یابد. این سطح معادل همرفت شدید با سرعت جریان عمودی ۰/۲ 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 ۷۹/۸رسیده است (با کاهش ۰/۰۱درصدی نسبت به حالت قبل)، اما بیشینه خطای ردیابی به ۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این میزان خطا همچنان در محدوده قابل‌قبول قرار داشته و تأیید می‌کند که کنترلر اولیه حتی در برابر اغتشاش ۱ نیوتنی ناشی از همرفت شدید نیز توانسته است موقعیت شناور را با موفقیت در عمق مرجع ۰/۶ متر حفظ کند.

[1] Thermohaline circulation

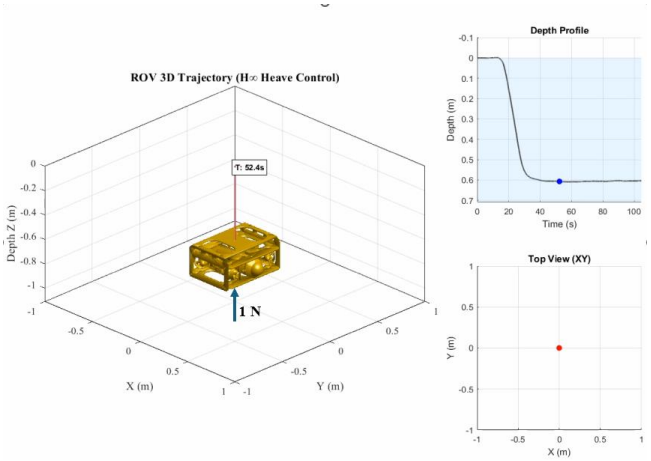
[2] Internal waves

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]



شکل ۲۵- ردیابی مرجع کنترلر در حضور اغتشاش ۱ نیوتن

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



شکل ۲۶- انیمیشن رفتار ربات در حضور اغتشاش ۱ نیوتن

در مراحل فوق، کنترلر ثلبت 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 کنترلر H_∞ طراحی‌شده به دلیل پایداری حلقه بسته، از بروز رفتار واگرا جلوگیری می‌کند و در برابر اغتشاشات محدود، خروجی را در محدوده‌ای مشخص نگه می‌دارد. بااین‌حال، 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 پیشرانش عمودی

سیستم شامل دو تراستر با توان ۳۶ وات و نیروی پیشران ۱/۲نیوتن 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_∞ طراحی‌شده در بخش قبل، در یک سناریوی تغییر عمق پله‌ای (از ۰ به ۰/۶متر) ارزیابی شد.

۵-۱-۱- پاسخ زمانی

سیستم توانست در مدت‌زمان ۵ ثانیه به عمق مطلوب برسد. برخلاف کنترل‌کننده PID سنتی که در مطالعات پیشین دچار فراجهش[1] قابل‌توجه بود، کنترل‌کننده پیشنهادی پاسخی بدون فراجهش 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 طراحی‌شده نیز با دستیابی به حاشیه فاز ۷۲ درجه و حاشیه بهره ۴۵ دسی‌بل، فرمان پله عمق را در مدت ۵

[1] Overshoot

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

ثانیه، بدون فراجهش 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 ملند که نشان‌دهنده مقاومت مناسب سامانه در برابر اغتشاشات محیطی است. باوجوداین، نبودِ عملگر انتگرالی خالص در ساختار استاندارد کنترل‌کننده H_∞ می‌تواند در برابر اغتشاشات ثابت، خطای ماندگار اندکی ایجاد کند. ازاین‌رو، استفاده از ساختارهای ترکیبی PI-H_∞ 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 Jeinsch, 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)

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., Loría, 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-Balanzar, 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*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

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 Univercity 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]