

Estimation of Hydrodynamic Coefficients of the REMUS Underwater Vehicle Using a Robust Extended Kalman Filter Under Various Dynamic Conditions

Sadegh Dastorani* , Reza Hasanzadeh Ghasemi²  and Ali Vahabi³

1. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

3. Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran.

Abstract: Accurate modeling of underwater vehicle dynamics is essential for simulation, stability analysis, and control system design. In this context, hydrodynamic coefficient identification plays a crucial role due to its dependence on vehicle geometry, forward speed, and operating conditions. In this study, a Robust Extended Kalman Filter (REKF) is employed for the online estimation of key hydrodynamic coefficients in the diving dynamics model of the REMUS autonomous underwater vehicle. An augmented state vector formulation is used to simultaneously estimate the dynamic states q , θ , and z , together with the hydrodynamic coefficients M_q , $M_{\dot{q}}$, and M_{δ_s} . To evaluate the influence of operating conditions, three scenarios are considered with forward speeds of 1.5, 1.75, and 2 m/s and rudder angles of 5.5°, 7.5°, and 10°. The Kalman gain K_k is recursively updated at each time step based on the prediction error covariance, measurement matrix, and measurement noise covariance, following the standard REKF formulation. Simulation results indicate that the proposed method achieves stable estimation of hydrodynamic coefficients and effectively reproduces the diving dynamics of the REMUS vehicle across all scenarios. Furthermore, increased forward speed and rudder deflection enhance system excitation, leading to improved estimation accuracy and faster convergence behavior within the considered operating range. Finally, the comparison between the responses obtained using estimated and reference coefficients demonstrates the capability of the proposed framework for accurate system identification and potential support for control design under varying operational conditions.

Keywords: Underwater vehicles, Robust Extended Kalman Filter (REKF), Hydrodynamic coefficients, REMUS, Estimation, Modeling.

* Corresponding Author: sa.dastorani@alumni.um.ac.ir

How to Cite: Dastorani S, Hasanzadeh Ghasemi R, Vahabi A, Estimation of hydrodynamic coefficients of the remus underwater vehicle using a robust extended kalman filter under various dynamic conditions, Journal of Computational Methods in Engineering.



Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



مقاله پژوهشی

تخمین ضرایب هیدرودینامیکی رونده زیرسطحی ریموس با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم در شرایط دینامیکی مختلف

صادق دستورانی^{۱*}، رضا حسن زاده قاسمی^۲ و علی وهابی^۳

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده - مدل‌سازی دقیق دینامیک رونده‌های زیرسطحی از الزامات اصلی شبیه‌سازی، تحلیل پایداری و طراحی سامانه‌های کنترل در وسایل زیرآبی است. در این میان، شناسایی ضرایب هیدرودینامیکی به دلیل وابستگی به هندسه شناور، سرعت پیشروی و شرایط عملیاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF) برای تخمین آنالین ضرایب هیدرودینامیکی کلیدی مدل شیرجه‌ای رونده زیرسطحی ریموس ارائه شده است. در این ساختار، بردار حالت تقویت‌شده شامل متغیرهای دینامیکی z, θ, q و ضرایب هیدرودینامیکی $M_{\dot{\theta}}, M_{\dot{q}}, M_{\dot{\theta}\dot{q}}$ به صورت همزمان و آنالین تخمین زده می‌شوند. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، سه سناریوی عملیاتی شامل سرعت‌های $1/5, 1/75$ و 2 متر بر ثانیه و زوایای سکان $5/5, 7/5$ و 10 درجه در نظر گرفته شده است تا اثر سطح تحریک دینامیکی بر دقت و همگرایی تخمین ارزیابی شود. در ساختار فیلتر، بهره K_k به صورت بازگشتی و مبتنی بر کوواریانس خطای پیش‌بینی، ماتریس اندازه‌گیری و نویز اندازه‌گیری در هر گام زمانی محاسبه می‌شود که موجب بهبود پایداری عددی و عملکرد تخمین در شرایط دارای عدم قطعیت می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به تخمین پایدار ضرایب هیدرودینامیکی و بازتولید رفتار دینامیکی ریموس در مود شیرجه در هر سه سناریوی عملیاتی است. همچنین، افزایش سطح تحریک دینامیکی در بازه بررسی شده منجر به بهبود اطلاعات‌پذیری اندازه‌گیری و کاهش خطای تخمین شده است. در نتیجه، REKF می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای تخمین برخط ضرایب هیدرودینامیکی و پشتیبانی از طراحی کنترل وسایل زیرسطحی در شرایط عملیاتی متغیر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: رونده‌های زیرسطحی؛ فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF)؛ ضرایب هیدرودینامیکی؛ ریموس؛ تخمین؛ مدل‌سازی.

* نویسنده مسئول، رایانامه: sa.dastorani@alumni.um.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۳.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز

است:

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

فهرست علائم

ماتریس کوواریانس نویز اندازه گیری	R	ماتریس حالت/سیستم	A
ماتریس کوواریانس نویز فرآیند	Q	ماتریس ورودی	B
بردار نویز فرآیند	w_k	ماتریس منفی نیمه معین	$A \leq B$
بردار نویز اندازه گیری	v_k	رونده های زیرسطحی	UVs
پارامترهای تنظیم	γ_2, γ_1	رونده های نقلیه کنترل از راه دور	$ROVs$
مقدار بهره فیلتر	k_k	رونده های نقلیه زیر آبی خودکار	$AUVs$
بردار حالت	x	دینامیک سیالات محاسباتی	CFD
بردار حالت تخمین زده شده	$\hat{x}$	فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم	$REKF$
ماتریس اندازه گیری	C	فیلتر کالمن توسعه یافته	EKF
ماتریس کوواریانس خطا	P	مکانیزم حرکت صفحه ای	PMM
ممان اینرسی حول محور x	I_{xx}	فیلتر H بینهایت	H_∞
ممان اینرسی حول محور y	I_{yy}	زاویه پیچ	θ
ممان اینرسی حول محور z	I_{zz}	ضریب ممان هیدرودینامیکی ناشی از زاویه پیچ	M_θ
طول رونده	L	موقعیت عمودی	Z
قطر رونده	D	سرعت زاویه ای پیچ	q
حجم بدنه رونده	V	ضریب ممان هیدرودینامیکی ناشی از سرعت زاویه ای	M_q
جرم کل رونده	m	شتاب زاویه ای	$\dot{q}$
وزن رونده	w	ضریب ممان هیدرودینامیکی ناشی از شتاب زاویه ای	$M_{\dot{q}}$
شناوری کل رونده	B_{null}	زاویه ای صفحه ای دنباله یا زاویه سکان	δ_s
مرکز ثقل طولی	X_{cg}	ضریب ممان هیدرودینامیکی ناشی از زاویه سکان	M_{δ_s}
مرکز ثقل عرضی	Y_{cg}	مقدار ورودی سرعت	u
مرکز ثقل عمودی	Z_{cg}	ماتریس حالت	I
مرکز طولی شناوری	$X_{cb,est}$	ماتریس کوواریانس	Σ

۱- مقدمه

دور (ROVs)^۲ و وسایل نقلیه زیرآبی خودکار (AUVs)^۳ تقسیم می شوند. استفاده از AUV ها برای تحقیق و اکتشاف در اعماق دریا در دو دهه گذشته به سرعت تکامل یافته است و تحقیقات گسترده ای برای توسعه AUV های هوشمندتر و سریع تر در حال انجام است (۱). این وسایل نقلیه زیرآبی بدون سرنشین و بدون اتصال، با استفاده از داده های از پیش تعیین شده عمل می کنند و به طور مستقل، بدون دخالت خارجی در زمان واقعی، در دریا

رونده های زیرسطحی^۱ یا وسایل نقلیه زیرآبی (UVs) می توانند سرنشین دار یا بدون سرنشین باشند. وسایل نقلیه زیرآبی سرنشین دار توسط انسان هایی که در داخل آن هستند، هدایت می شوند، در حالی که وسایل نقلیه زیرآبی بدون سرنشین، روبات های زیرآبی هستند و به دو نوع، وسایل نقلیه کنترل از راه

توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند (۱۴ و ۱۵). این فیلترها با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی ناشی از تحریک سیستم، قادر به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی در شرایط غیرخطی و دارای نویز هستند. پژوهش‌هایی روی روندهای زیرسطحی نشان داده‌اند که فیلتر کالمن می‌تواند با ترکیب داده‌های حاصل از شبیه‌سازی یا آزمون‌های تجربی، ضرایب مهمی را با دقت بالا تخمین زند. همچنین در برخی مطالعات، برای افزایش دقت تخمین، معادلات دینامیکی به صورت ماتریسی بازنویسی شده‌اند تا تعداد پارامترهای آزاد کاهش یافته و همگرایی الگوریتم تسهیل شود (۱۵ و ۱۹).

در برخی دیگر از تحقیقات، مقایسه بین روش‌های REKF و فیلتر H_{∞} توسعه‌یافته نشان داده است که در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری، فیلتر کالمن مقاوم عملکرد بهتری در بازسازی ضرایب واقعی سیستم دارد (۱۵). ساجدی و بزرگ (۱۵)، فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم و فیلتر H_{∞} توسعه‌یافته را برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV نمونه، یعنی SNUUV I، به کار گرفتند و عملکرد دو فیلتر را مقایسه کردند. این نکته به‌ویژه در شرایطی که ورودی‌های سیستم به صورت پله‌ای یا ناپیوسته باشند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا فیلترهای مقاوم توانایی بیشتری در مدیریت اغتشاشات و نویزهای محیطی دارند. همچنین، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند (۲۰ و ۲۱) که استفاده از تحریک‌های مناسب، مانند ورودی‌های پله‌ای با دامنه و سرعت‌های مختلف، می‌تواند تأثیر بسزایی در کیفیت تخمین ضرایب داشته باشد و به طراحی بهینه آزمایش‌ها برای شناسایی سیستم کمک کند.

با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه تخمین مقاوم ضرایب هیدرودینامیکی، هنوز توسعه سازوکارهای تطبیقی برای افزایش کارایی فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم در مواجهه با تغییرات شرایط عملیاتی و عدم قطعیت‌های مدل نیازمند توجه بیشتر است. در اغلب مطالعات پیشین، ضرایب مقاوم‌سازی فیلتر، شامل γ_1 و γ_2 ، به صورت ثابت و بر اساس تنظیمات تجربی تعیین می‌شوند؛ درحالی‌که عملکرد بهینه این ضرایب می‌تواند تحت تأثیر سطح

حرکت یا غواصی می‌کنند (۲ و ۳). روندهای زیرسطحی، از جمله زیردریایی‌ها و وسایل نقلیه زیرسطحی خودکار و کنترل‌شونده از راه دور، نقش مهمی در کاربردهای نظامی، صنعتی، تحقیقاتی، و اکتشافی ایفا می‌کنند (۴). این روندها در عملیات‌هایی مانند پایش بستر دریا، اکتشاف منابع زیرسطحی، نقشه‌برداری از اعماق اقیانوس، و مأموریت‌های نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد دقیق این وسایل به مدل‌سازی صحیح دینامیک حرکت و ضرایب هیدرودینامیکی آن‌ها بستگی دارد (۵ و ۶). از میان این روندها، پلتفرم ریموس^۴ به دلیل طراحی پایدار، ابعاد مناسب و قابلیت اجرای مانورهای پیچیده، به یکی از رایج‌ترین ابزارهای مورد استفاده در تحقیقات و کاربردهای صنعتی تبدیل شده است (۷).

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و کنترل روندهای زیرسطحی، مدل‌سازی دقیق نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه در شرایط مختلف عملیاتی است. این مدل‌سازی نیازمند تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مانند جرم افزوده، ضرایب میرایی، و پاسخ به ورودی‌های کنترلی است. در گذشته، روش‌هایی نظیر شبیه‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یا روش‌های تجربی مانند آزمون‌های تونل کشش و مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM)^۵ برای استخراج این ضرایب به کار گرفته شده‌اند. برای مثال، در یک مطالعه، نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی با استفاده از مدل حجم محدود در محیط انسیس شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داده شده‌اند که دقت بالای این روش را در تخمین ضرایب میرایی و جرم افزوده نشان داده است. همچنین، روش‌هایی مبتنی بر المان مرزی نیز برای محاسبه ضرایب جرم افزوده در هندسه‌های پیچیده با موفقیت به کار رفته‌اند (۸-۱۲).

با این حال، انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های دقیق عددی، مستلزم صرف زمان، هزینه و منابع محاسباتی بالاست (۱۳). از این رو، در سال‌های اخیر، رویکردهای داده‌محور مانند شناسایی سیستم و فیلترهای تخمین وضعیت، به ویژه فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF)^۶ و فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF)^۷،

اصلاح همزمان حالت‌های دینامیکی و ضرایب هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سه سناریوی عملیاتی شامل سرعت‌های پیشروی ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ متر بر ثانیه و زوایای سکان ۵/۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. هدف از انتخاب این سناریوها، بررسی تأثیر سطح تحریک دینامیکی بر همگرایی ضرایب، دقت بازتولید پاسخ‌های دینامیکی و همچنین عملکرد مکانیزم تطبیقی ضرایب مقاوم‌سازی است. نتایج حاصل می‌تواند میزان پایداری و دقت روش پیشنهادی را در شرایط عملیاتی مختلف نشان دهد؛ موضوعی که در مأموریت‌های واقعی ریموس، با توجه به تغییرات سرعت و ورودی‌های کنترلی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بر این اساس، سهم‌های اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در چهار محور خلاصه کرد:

۱- پیاده‌سازی چارچوب REKF برای مدل شیرجه‌ای پلتفرم ریموس با استفاده از بردار حالت تقویت‌شده شامل متغیرهای حالت و ضرایب هیدرودینامیکی؛

۲- ارائه یک مکانیزم تطبیقی مبتنی بر نوآوری اندازه‌گیری برای تنظیم برخط ضرایب مقاوم‌سازی γ_1 و γ_2 به‌منظور افزایش سازگاری فیلتر با شرایط عملیاتی مختلف؛

۳- تخمین آنالین ضرایب هیدرودینامیکی M_q ، $M_{\dot{q}}$ و M_{δ_s} تنها با استفاده از داده اندازه‌گیری زاویه پیچ (θ)؛

۴- ارزیابی سناریو محور عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف سرعت و زاویه سکان و تحلیل تأثیر آن بر همگرایی ضرایب و دقت تخمین.

بنابراین، نوآوری اصلی مقاله حاضر علاوه بر کاربرد REKF در مدل شیرجه‌ای ریموس، در توسعه یک سازوکار تطبیقی برای تنظیم برخط ضرایب مقاوم‌سازی γ_1 و γ_2 و بررسی اثر آن بر عملکرد تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در شرایط دینامیکی مختلف نهفته است.

نویز، میزان تحریک دینامیکی سیستم و شرایط عملیاتی وسیله زیرسطحی تغییر کند. از سوی دیگر، ضرایب هیدرودینامیکی نیز تابعی از هندسه، مشخصات فیزیکی، سرعت پیشروی، زاویه سکان و شرایط مأموریتی هستند. بنابراین، توسعه یک چارچوب تخمین مقاوم با قابلیت تنظیم تطبیقی پارامترهای مقاوم‌سازی و ارزیابی آن بر روی یک پلتفرم عملیاتی مشخص مانند ریموس، از نظر کاربردی و طراحی سامانه‌های هدایت و کنترل اهمیت ویژه‌ای دارد.

در پژوهش حاضر، ضمن بهره‌گیری از ساختار پایه فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF)، یک مکانیزم تطبیقی مبتنی بر نوآوری اندازه‌گیری برای تنظیم برخط ضرایب مقاوم‌سازی γ_1 و γ_2 ارائه شده است. در این رویکرد، مقادیر γ_1 و γ_2 برخلاف روش‌های متداول ثابت نبوده و متناسب با تغییرات خطای نوآوری در طول فرآیند تخمین به‌روزرسانی می‌شوند. هدف از این راهکار، افزایش انعطاف‌پذیری فیلتر در مواجهه با عدم قطعیت‌های مدل و بهبود دقت تخمین در شرایط عملیاتی مختلف است.

در این راستا، مدل شیرجه‌ای پلتفرم ریموس با پارامترها و ضرایب متناظر با این وسیله مورد استفاده قرار گرفته و ضرایب هیدرودینامیکی کلیدی M_q ، $M_{\dot{q}}$ و M_{δ_s} به همراه متغیرهای دینامیکی q ، θ و z در قالب یک بردار حالت تقویت‌شده به‌صورت آنالین تخمین زده شده‌اند. همچنین، بهره فیلتر K_k مطابق ساختار بازگشتی REKF و بر اساس کوواریانس خطای پیش‌بینی، ماتریس اندازه‌گیری و کوواریانس نویز اندازه‌گیری در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. برخلاف برخی پیاده‌سازی‌های ساده‌شده در مطالعات پیشین، در این پژوهش تمامی مراحل به‌روزرسانی فیلتر از جمله محاسبه بهره K_k به‌صورت کاملاً بازگشتی و همزمان با به‌روزرسانی کوواریانس‌ها انجام شده و در کنار سازوکار تطبیقی ضرایب γ_1 و γ_2 ، نقش مهمی در افزایش پایداری عددی و دقت تخمین ایفا می‌کند. با توجه به در نظر گرفتن زاویه پیچ (θ) به‌عنوان خروجی اندازه‌گیری‌شده مستقیم، خطای نوآوری حاصل از اندازه‌گیری زاویه پیچ برای

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی سیستم

در این بخش، مدل وسیله رونده زیرسطحی ریموس در حالت شیرجه‌ای ارائه شده است. این مدل‌سازی بر مبنای فرض جداسازی درجات آزادی عمودی و افقی صورت گرفته است؛ به این معنی که دینامیک حرکت در صفحه عمودی (شامل تغییرات عمق و زاویه پیچ) تا حد زیادی مستقل از دینامیک حرکت عرضی در نظر گرفته می‌شود. در کاربردهای عملیاتی که هدف اصلی، حفظ و کنترل عمق یا دنبال کردن مسیرهای عمودی مشخص است، دینامیک‌های عمودی نقش غالب را ایفا می‌کنند. با حذف مؤلفه‌های دینامیکی کم‌اهمیت‌تر مرتبط با حرکت عرضی، مدل ساده‌سازی شده و پیچیدگی تحلیل و طراحی کنترلر کاهش می‌یابد، در حالی که دقت کافی برای دستیابی به اهداف کنترلی حفظ می‌شود. این رویکرد امکان تمرکز بر پارامترهای کلیدی مانند زاویه پیچ (θ)، سرعت زاویه‌ای پیچ (q) و موقعیت عمودی (z) را فراهم می‌کند. این پارامترها نمایانگر وضعیت دینامیکی وسیله در مود عمق هستند. همچنین ورودی سیستم زاویه‌ی صفحه‌ی دنباله (δ_s) در نظر گرفته شده است. چنانچه حرکت وسیله در صفحه عمودی به صورت آرام و یکنواخت باشد، انتظار می‌رود تغییرات سرعت در راستای عمودی نیز محدود و آهسته باشد. با قرار دادن مبدأ دستگاه مختصات بدنی روی مرکز جرم وسیله و با فرض ناچیز بودن حرکت عرضی، می‌توان مدل دینامیکی AUV در مود عمق را به صورت زیر ساده‌سازی کرد [۱۶]:

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_q} & \frac{M_\theta}{I_{yy} - M_q} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_s \quad (1)$$

برای این حالت، ضرایب هیدرودینامیکی M_q ، M_θ ، M_{δ_s} به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم در نظر گرفته می‌شوند. به منظور برآورد ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم، این ضرایب به عنوان پارامترهای مجهول به بردار حالت تقویت‌شده اضافه می‌گردند.

$$x = [q; \theta; z; M_q; M_\theta; M_{\delta_s}] \quad (2)$$

در این پژوهش، بردار حالت تقویت‌شده شامل سه متغیر حالت دینامیکی و سه ضریب هیدرودینامیکی مجهول است. بنابراین، این شش مولفه به گونه‌ای تخمین زده می‌شوند که ابتدا ضرایب هیدرودینامیکی با ۱۰ درصد اختلاف وارد الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم می‌شوند. سپس، در نهایت، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی و همچنین متغیرهای دینامیکی q ، θ و z نیز تخمین زده خواهند شد.

در این پژوهش، دینامیک شیرجه‌ای ریموس با تمرکز بر حرکت طولی، زاویه پیچ و تغییر عمق مدل‌سازی شده است. متغیرهای (q)، (θ) و (z) به ترتیب بیانگر نرخ زاویه‌ای پیچ، زاویه پیچ و عمق هستند. همچنین، ضرایب کلیدی M_q ، M_θ و M_{δ_s} به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم در نظر گرفته شده‌اند. به منظور تخمین همزمان حالت‌های دینامیکی و ضرایب هیدرودینامیکی، این ضرایب به بردار حالت تقویت‌شده افزوده می‌شوند. بنابراین، بردار حالت تقویت‌شده شامل سه متغیر حالت دینامیکی و سه ضریب هیدرودینامیکی مجهول است.

در آن ساختار، سه مؤلفه نخست بیانگر حالت‌های دینامیکی رونده در مود شیرجه و سه مؤلفه پایانی بیانگر ضرایب هیدرودینامیکی مجهول هستند. بنابراین، ضرایب هیدرودینامیکی به صورت یک مرحله جداگانه یا آفلاین محاسبه نمی‌شوند، بلکه همزمان با حالت‌های دینامیکی و در طول اجرای الگوریتم به روزرسانی می‌گردند. برای بررسی توانایی الگوریتم در همگرایی به مقادیر مرجع، مقدار اولیه ضرایب با خطای نسبی ۱۰ درصد نسبت به مقادیر مرجع وارد فیلتر شده است.

۲-۲- طراحی و پیاده‌سازی فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF)

در اغلب پژوهش‌ها، فیلترهای حالت برای سیستم‌هایی به کار می‌روند که مدل آن‌ها بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و به صورت ثابت فرض می‌شود. این در حالی است که در بسیاری از کاربردهای عملی، از جمله مدل‌سازی وسایل زیرسطحی،

نویز اندازه گیری بوده و هر دو از نوع نویز سفید با مقدار متوسط صفر هستند. ماتریس های کوواریانس این نویزها، به ترتیب Q و R ، شناخته شده اند و روابط زیر برقرار است:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w_k \\ v_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_j^T & v_j^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_k \delta_{kj} & 0 \\ 0 & R_k \delta_{kj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

عبارت $A_k \Delta_{A_k} E_{A_k}$ بیانگر نامعینی پارامتری مدل سیستم بوده، جایی که A_k یک ماتریس مقیاس ۹ معلوم با ابعاد مناسب است. Δ_{A_k} ماتریس نامعلومی است که در شرط زیر صدق می کند:

$$\Delta_{A_k} \Delta_{A_k}^T \leq I \quad (5)$$

یادآوری می شود که برای دو ماتریس A و B ، عبارت $A \leq B$ بدین مفهوم است که $(A-B)$ یک ماتریس منفی نیمه معین است (۱۸). E_{A_k} نیز ماتریس معلومی است که با توجه به ماهیت مساله می توان مقداری برای آن تعیین کرد؛ اگر نامعینی متغیرها مستقل از هم گرفته شوند، آن را برابر با ماتریس واحد قرار داد. هدف از طراحی تخمین گر مقاوم، تخمین متغیرهای حالت سیستم نامعین رابطه ۳ به فرم زیر است:

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}, 0) \quad (6)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \quad (7)$$

که در آن $\hat{x}_k$ مقدار تخمین بوده و K_k ، مقدار بهره فیلتر، باید به نحوی طراحی شود تا تضمین کننده ی آن باشد که مقدار کواریانس خطای تخمین از یک محدوده ی معینی کمتر باشد.

نحوه پیاده سازی الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم، مطابق با چارچوب ارائه شده در مراجع (۱۵ و ۱۶) صورت گرفته است. جزئیات کامل این مراحل، شامل خطی سازی معادلات فرآیند و اندازه گیری، و همچنین الگوریتم های تخمین پیشین و پسین متغیرهای حالت و کوواریانس خطا، در این مراجع به تفصیل شرح داده شده است. پیاده سازی الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم به صورت کلی در زیر بیان شده است (۱۷):

- انتخاب مقادیر عددی γ_1 و γ_2 : γ_2 و γ_1 پارامترهای تنظیم^۱ هستند و با توجه به ماهیت مساله توسط طراح انتخاب می شوند.

پارامترهای سیستم ممکن است با عدم قطعیت یا تغییرات زمانی همراه باشند. از این رو، استفاده از فیلترهای مقاوم برای تخمین متغیرهای حالت یا پارامترهای چنین سیستم هایی ضرورت می یابد.

یکی از روش های مؤثر در این زمینه، فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم (REKF) است که برای سیستم های غیرخطی زمان گسسته با پارامترهای نامعین طراحی شده است (۱۷). این فیلتر با اقتباس از ساختار فیلتر EKF و با استفاده از یک روش شبه خطی سازی برای حل معادله ریکاتی، توسعه یافته است. در پژوهش (۱۷)، معادله ریکاتی جدیدی تحت شرایط نامعینی پارامتری استخراج شده و فیلتر REKF برای یک مسئله موقعیت یابی مبتنی بر تپاختر^۲ پیاده سازی شده است. سپس عملکرد این فیلتر با فیلتر EKF مقایسه شده است.

الگوریتم REKF در محیط نرم افزار متلب پیاده سازی می گردد. پیچیدگی محاسباتی این الگوریتم مشابه فیلتر کالمن توسعه یافته است و نیازی به محاسبات سنگین ندارد. این ویژگی، پردازش آنالین و اجرای الگوریتم در زمان واقعی را بر روی واحدهای پردازشی محدود AUVها (مانند کامپیوترهای تعبیه شده) کاملاً امکان پذیر می سازد.

در مطالعه ساجدی و بزرگ (۱۵) نیز، فیلتر REKF به منظور تخمین مقاوم ضرایب هیدرودینامیکی وسایل زیرسطحی در شرایط دارای عدم قطعیت برای نخستین بار به کار گرفته شده است. بر این اساس، در این پژوهش نیز از فیلتر REKF استفاده شده است تا تخمین دقیقی از پارامترهای سیستم حاصل شود.

سیستم غیرخطی زمان گسسته دارای نامعینی پارامتری به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{aligned} x_k &= f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + \dots \\ &A_{k-1} \Delta_{A_{k-1}} E_{A_{k-1}} x_{k-1} + w_{k-1}, \\ w_k &\sim N(0, Q) \end{aligned} \quad (3)$$

$$y_k = h_k(x_k, v_k), \quad v_k \sim N(0, R)$$

که در آن بردار حالت تقویت شده، u_{k-1} ورودی سیستم، y_k بردار اندازه گیری، f_{k-1} تابع غیرخطی فرآیند و h_k تابع اندازه گیری است. همچنین w_{k-1} و v_k به ترتیب نویز فرآیند و

با این حال، برخلاف مطالعه (۱۵) که در آن ضرایب γ_1 و γ_2 به صورت ثابت در طول فرآیند تخمین در نظر گرفته شده‌اند، در پژوهش حاضر این ضرایب به صورت تطبیقی و بر مبنای نوآوری اندازه‌گیری به‌روزرسانی می‌شوند. این راهکار موجب افزایش قابلیت سازگاری فیلتر با تغییرات شرایط عملیاتی و عدم قطعیت‌های مدل شده و امکان تنظیم پویای سطح مقاوم‌سازی فیلتر را فراهم می‌کند.

در این مرحله، با استناد به بخش طراحی و پیاده‌سازی فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم و بر اساس مقالات منتشرشده (۱۵) و (۱۶)، الگوریتم REKF در محیط متلب پیاده‌سازی شده است. این برنامه، مدل‌سازی و شناسایی آنالین ضرایب هیدروپدینامیکی یک رونده زیرسطحی را با بهره‌گیری از فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم پیاده‌سازی می‌کند. مزیت اصلی این روش نسبت به فیلتر کالمن توسعه‌یافته استاندارد، توانایی بالاتر آن در مقابله با خطاهای مدل‌سازی و نویزهای موجود در داده‌های اندازه‌گیری است.

برای پیاده‌سازی الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم، از مجموعه‌ای از داده‌های فیزیکی، ضرایب مدل و تنظیمات شبیه‌سازی استفاده شده است که به‌طور مستقیم از منابع معتبر استخراج و به‌صورت هدفمند مقداردهی شده‌اند (۱۵ و ۱۶). پارامترهای فیزیکی سیستم شامل سرعت ثابت حرکت وسیله، ممان اینرسی حول محور عرضی، و ضریب گشتاور ناشی از زاویه پیچ هستند که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این مقادیر بیانگر مشخصات فیزیکی وسیله‌ی زیرسطحی ریموس به‌عنوان یک پلتفرم استاندارد در شرایط عملیاتی هستند. همچنین، ضرایب واقعی سیستم، که برای بازنمایی رفتار واقعی دینامیکی در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از مرجع (۱۶) استخراج شده‌اند و در جدول ۱ گزارش شده‌اند. برای آغاز فرآیند تخمین، مقادیر اولیه برای ضرایب نامعین با فرض وجود خطای نسبی ۱۰ درصد نسبت به مقادیر واقعی در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، نویزهای اندازه‌گیری و فرآیند به مدل اضافه شده‌اند. این نویزها به صورت نویز سفید با میانگین صفر و کوواریانس‌های زیر طبق مطالعه (۱۵) در نظر گرفته شده‌اند.

• راه‌اندازی فیلتر با مقدار دهی اولیه به بردار متغیرهای حالت و کوواریانس مربوطه مطابق با رابطه زیر:

$$\hat{x}_0^+ = E(x_0) \quad (8)$$

$$P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

• انتخاب ماتریس Q و R و تشکیل ماتریس $\hat{Q}_k$ با استفاده از مقدار انتخاب شده γ_2 :

$$\hat{Q}_k = \gamma_2(A_k A_k^T) + Q_k \quad (9)$$

$$\hat{R}_k = R_k$$

• خطی‌سازی معادلات فرآیند و اندازه‌گیری، که در آنها عبارات $\hat{h}_k$ و $\hat{f}_k$ نشان‌دهنده معادلات خطی شده سیستم هستند، و همچنین معادلات مربوط به تخمین پیشین متغیرهای حالت و کوواریانس خطای اصلاح، و تخمین پسین متغیرهای حالت و کوواریانس خطای اصلاح، همگی مطابق با الگوی استاندارد ارائه شده در مراجع (۱۵ و ۱۶) پیاده‌سازی شده‌اند.

• تخمین پیشین متغیرهای حالت و کوواریانس خطای اصلاح:

$$P_k^- = (1 - \gamma_2^{-1} - \gamma_1 \gamma_2^{-1})^{-1} F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + \hat{Q}_{k-1} \quad (10)$$

$$\hat{x}_k^- = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}, 0)$$

• تخمین پسین متغیرهای حالت و کوواریانس خطای اصلاح:

$$K_k = (1 - \gamma_2^{-1} - \gamma_1 \gamma_2^{-1})^{-1} P_k^- H_k^T \dots$$

$$((1 - \gamma_2^{-1} - \gamma_1 \gamma_2^{-1})^{-1} H_k P_k^- H_k^T + \hat{R}_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_k^-, 0)] \quad (11)$$

$$P_k^+ = (1 - \gamma_2^{-1} - \gamma_1 \gamma_2^{-1})^{-1} (I - K_k H_k) P_k^- \dots$$

$$(I - K_k H_k)^T + K_k \hat{R}_k K_k^T$$

نکته: برای این که راهبرد فوق جوابی برای مسأله‌ی تخمین

بوده و معادله ریکاتی جواب داشته باشد، لازم است که شرط

$\gamma_2 > \gamma_1 + 1$ برقرار و در هر مرحله از اجرا، شروط زیر برقرار

باشد. اثبات روش به طور مفصل در (۱۷) بیان شده است.

$$\gamma_2 - (x_k^-)^T x_k^- > 0$$

$$(12)$$

$$\gamma_1 - (x_k^+)^T x_k^+ > 0$$

در این پژوهش، مقادیر اولیه ضرایب مقاوم‌سازی γ_1 و γ_2 و

همچنین ماتریس‌های نویز فرایند Q و نویز اندازه‌گیری R بر

اساس تنظیمات ارائه‌شده در مطالعه ساجدی و بزرگ (۱۵)

انتخاب شده‌اند.

جدول ۱. اطلاعات مورد نیاز برای رونده زیرسطحی ریموس

Table 1. Required Information for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

u_0	1.5 m/s	1.75 m/s	2 m/s	مقادیر ورودی در شبیه سازی
δ_s	5.5 deg	7.5 deg	10 deg	
L	1.33 m			
D	0.19 m			مشخصات هندسی
V	$3.15e-02\text{ m}^3$			
I_{xx}	$0.177\text{ kg}\cdot\text{m}^2$			
I_{yy}	$3.48744\text{ kg}\cdot\text{m}^2$			ممان های اینرسی
I_{zz}	$3.45\text{ kg}\cdot\text{m}^2$			
m	30.48 kg			
W	299 N			مشخصات مراکز ثقل و جرم و شناوری
B_{hull}	306 N			
X_{cg}	0 m			
Y_{cg}	0 m			
Z_{cg}	$1.96e-02\text{ m}$			
$X_{cb,est}$	$5.54e-03\text{ m}$			
M_{θ}	$-5.77\text{ kg}\cdot\text{m}^2 / \text{s}^2$			
M_q	$-6.87\text{ kg}\cdot\text{m}^2 / \text{s}$			ضرایب هیدرودینامیکی
$M_{\dot{q}}$	$-4.88\text{ kg}\cdot\text{m}^2$			
M_{δ_s}	$-3.46e001\text{ kg}\cdot\text{m}^2 / \text{s}^2$			

قادر به بازتولید رفتار دینامیکی ریموس هستند.

کوواریانس نویز فرآیند و نویز اندازه گیری:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-4} \end{bmatrix}, \quad R = 10^{-2} \quad (13)$$

۳- بحث و نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مدل شیرجه ای ریموس با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم ارائه می شود. شبیه سازی ها در سه سناریوی عملیاتی شامل سرعت های ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ متر بر ثانیه و زاویه های ورودی، سکان ۵/۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه انجام شده اند. هدف از این بررسی، ارزیابی اثر تغییر سطح تحریک دینامیکی بر همگرایی ضرایب تخمینی و دقت بازتولید پاسخ های دینامیکی q ، θ و z است.

پس از شبیه سازی به مدت ۳۰۰ ثانیه، نتایج حاصل از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم ارائه شده است. این نتایج نشان می دهند که الگوریتم پیاده سازی شده از دقت بالایی در برآورد پارامترهای دینامیکی

۳-۲- روند اعتبارسنجی مدل و الگوریتم تخمین

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم، ابتدا پاسخ دینامیکی مدل ریموس با استفاده از ضرایب مرجع تولید می شود. سپس، ضرایب هیدرودینامیکی با مقدار اولیه دارای خطای نسبی ۱۰ درصد نسبت به مقادیر مرجع وارد الگوریتم REKF می شوند تا توانایی فیلتر در همگرایی به مقادیر مرجع بررسی شود. در ادامه، ضرایب تخمینی با مقادیر مرجع مقایسه شده و درصد خطای تخمین برای هر ضریب محاسبه می شود. علاوه بر این، پاسخ های دینامیکی q ، θ و z حاصل از ضرایب تخمینی با پاسخ های مرجع مقایسه می گردند تا مشخص شود ضرایب تخمینی تا چه اندازه

جدول ۲. مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه و زاویه ورودی سکان ۵/۵ درجه در زمان ۳۰۰ ثانیه توسط فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم.

Table 2. Estimated Parameter Values at a Speed of 1.5 m/s and a Rudder Input Angle of 5.5° at 300 s Using the Robust Extended Kalman Filter

نماد	مقدار اسمی	مقدار تخمین	مقدار خطا
M_q	-۶/۸۷	-۷/۲۰	٪ ۴/۸۰
$M_{\dot{q}}$	-۴/۸۸	-۵/۰۸	٪ ۴/۱۰
$M_{\delta s}$	-۳/۴۶	-۳/۶۳	٪ ۴/۹۱

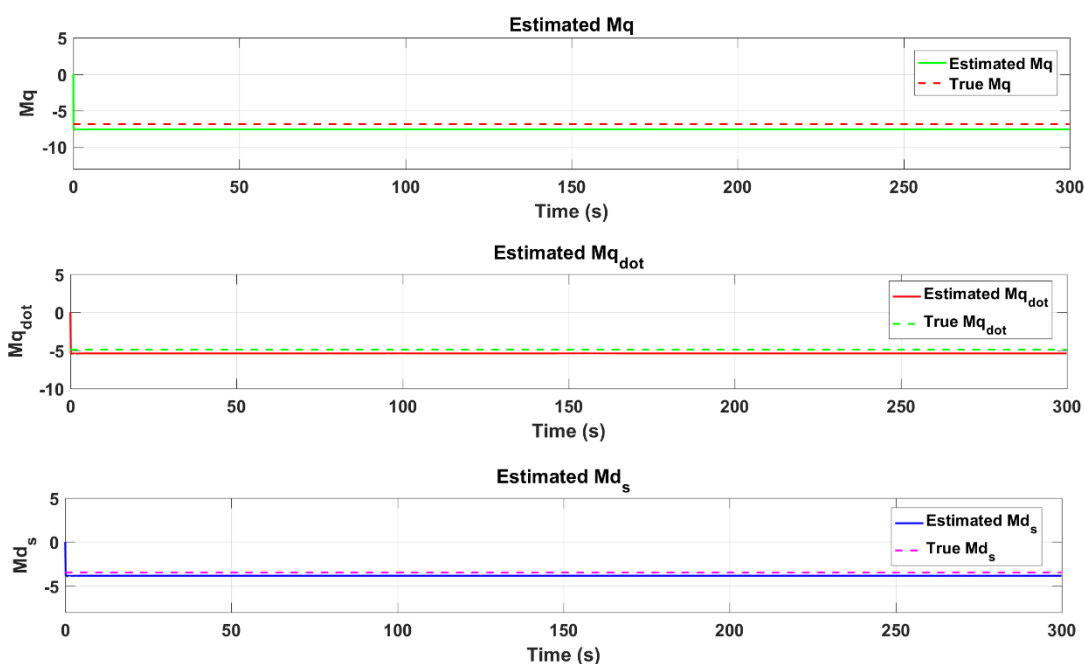


Fig 1. Comparison of the Estimated Hydrodynamic Coefficients Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 1.5 m/s over 300 s.

شکل ۱. مقایسه نتایج تخمین ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه

وضوح نشان می‌دهد. در این پژوهش، REKF به منظور تخمین سه ضریب کلیدی مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که مقادیر مندرج در جدول گواه هستند، تفاوت میان مقادیر اسمی (۱۶) و مقادیر تخمینی نهایی به دست آمده از الگوریتم REKF بسیار ناچیز است. علاوه بر این، درصد خطا برای هر سه ضریب در محدوده قابل قبول زیر ۱۰٪ باقی مانده است. این امر نشان دهنده آن است که روش موجود، با وجود عدم قطعیت‌های مدل و نویزهای اندازه‌گیری، توانسته است به تخمین دقیقی از پارامترهای هیدرودینامیکی دست یابد. در نتیجه، استفاده از

سیستم مورد مطالعه برخوردار است و می‌تواند در شرایط نویزی و عملیاتی، ضرایب هیدرودینامیکی را با دقت قابل قبولی تخمین زند. همچنین، تحلیل حساسیت ضرایب نسبت به ورودی‌های تحریک و سرعت زاویه‌ای انجام شد و نتایج نشان داد طراحی مناسب تحریک ورودی نقش مؤثری در افزایش دقت تخمین ایفا می‌کند.

جدول ۲ به مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی اسمی و تخمینی، به همراه درصد خطای تخمین حاصل از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم می‌پردازد. این مقایسه، دقت بالای فیلتر مذکور را در شناسایی پارامترهای دینامیکی یک وسیله رونده زیرسطحی به

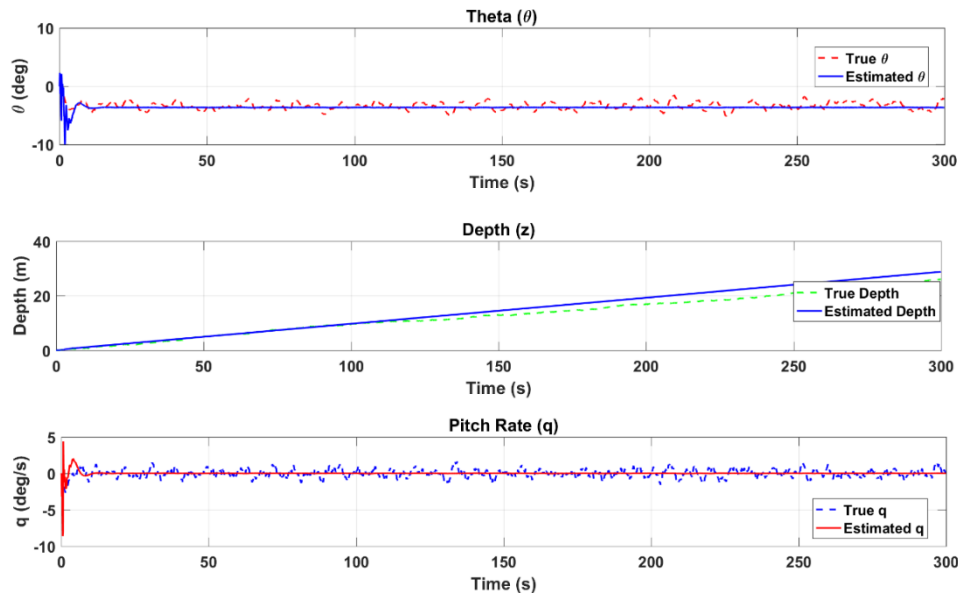


Fig 2. Comparison of the True and Estimated States (θ , q , and z) of the REMUS AUV Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 1.5 m/s over 300 s.

شکل ۲. مقایسه حالت‌های واقعی و تخمینی (θ , q و z) رونده زیرسطحی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم با سرعت ۱/۵ متربرثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با سرعت ۱/۷۵ متربرثانیه و زاویه ورودی سکان ۷/۵ درجه در زمان ۳۰۰ ثانیه توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم.

Table 3. Estimated Parameter Values at a Speed of 1.75 m/s and a Rudder Input Angle of 7.5° at 300 s Using the Robust Extended Kalman Filter

نماد	مقدار اسمی	مقدار تخمین	مقدار خطا
M_q	-۶/۸۷	-۷/۰۲	٪ ۲/۱۸
$M_{\dot{q}}$	-۴/۸۸	-۴/۹۷	٪ ۱/۸۴
M_{δ_s}	-۳/۴۶	-۳/۵۵	٪ ۲/۶۰

دیگر با در نظر گرفتن همان شرایط فیزیکی مسئله، شبیه‌سازی با سرعت ۱/۷۵ متربرثانیه و زاویه ورودی سکان برابر با ۷/۵ درجه اجرا گردید. هدف از این شبیه‌سازی، ارزیابی دقت و کارایی در شرایطی با سرعت بالاتر و زاویه انحراف بیشتر بود. نتایج حاصل نیز به صورت جدول ۳ و نمودار در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. برای بار سوم با در نظر گرفتن همان شرایط فیزیکی مسئله، شبیه‌سازی با سرعت ۲ متربرثانیه و زاویه ورودی سکان برابر با ۱۰ درجه اجرا گردید. نتایج حاصل نیز به صورت جدول ۴ و نمودار در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

در نتیجه با افزایش سرعت و زاویه ورودی سکان، میزان

REKF به عنوان یک ابزار قدرتمند و قابل اتکا در شناسایی آنلاین ضرایب هیدرودینامیکی در سامانه‌های دریایی، به ویژه در محیط‌های نویزی و شرایط غیرخطی، ارزیابی می‌شود.

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف عملیاتی، شبیه‌سازی‌ها برای دو سرعت متفاوت و دو زاویه ورودی مختلف به سکان انجام شد. در هر حالت، مقدار سرعت و زاویه ورودی تغییر داده شده و نتایج حاصل از تخمین پارامترهای دینامیکی به صورت نمودار و جدول ارائه گردید. این تحلیل‌ها کمک می‌کند تا میزان دقت و پایداری روش در مواجهه با تغییرات شرایط کاری سیستم بهتر ارزیابی شود. بنابراین، بار

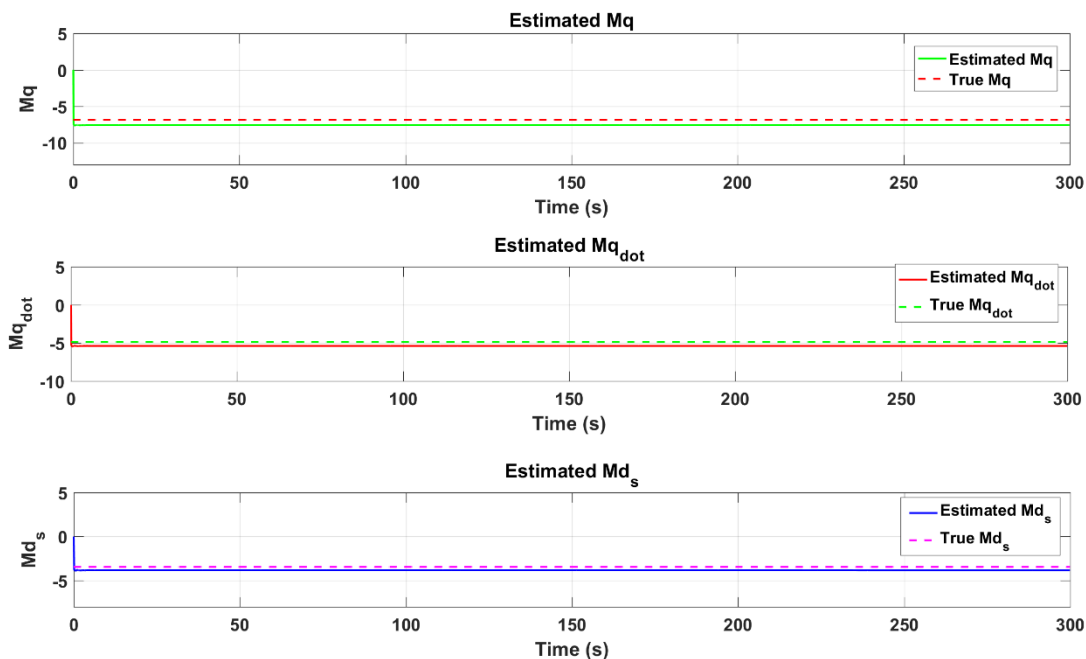


Fig 3. Comparison of the Estimated Hydrodynamic Coefficients Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 1.75 m/s over 300 s.

شکل ۳. مقایسه نتایج تخمین ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم با سرعت ۱/۷۵ متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه.

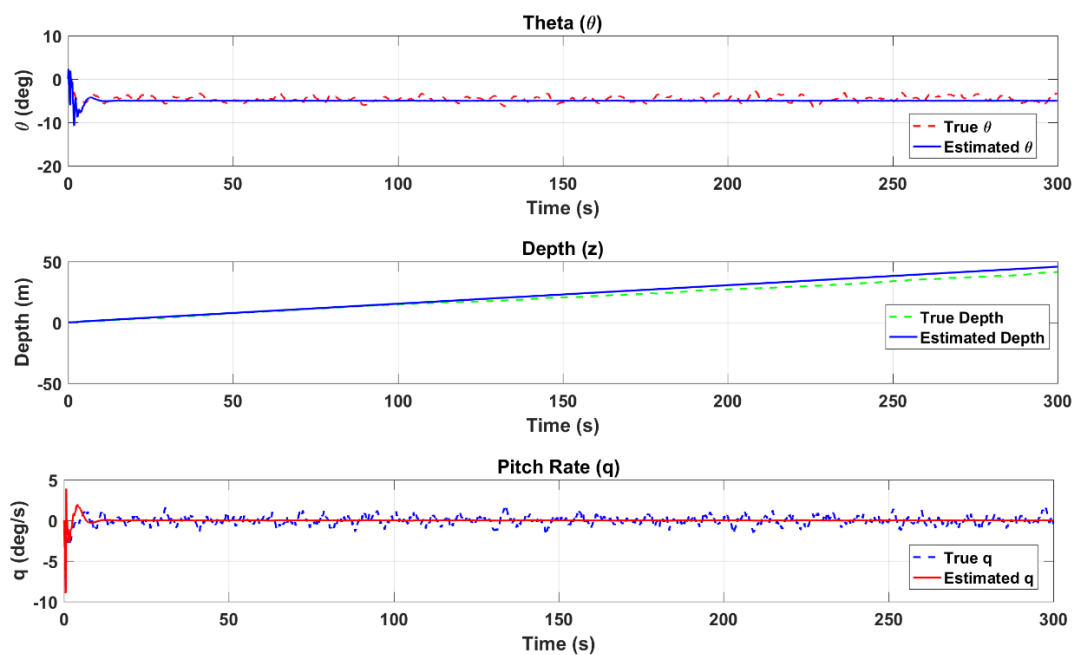


Fig 4. Comparison of the True and Estimated States (θ , q , and z) of the REMUS AUV Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 1.75 m/s over 300 s.

شکل ۴. مقایسه حالت‌های واقعی و تخمینی (θ ، q و z) رونده زیرسطحی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم با سرعت ۱/۷۵ متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با سرعت ۲ متر بر ثانیه و زاویه ورودی سکان ۱۰ درجه در زمان ۳۰۰ ثانیه توسط فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم.

Table 4. Estimated Parameter Values at a Speed of 2 m/s and a Rudder Input Angle of 10° at 300 s Using the Robust Extended Kalman Filter

نماد	مقدار اسمی	مقدار تخمین	مقدار خطا
M_q	-۶/۸۷	-۶/۹۸	٪ ۱/۶۰
$M_{\dot{q}}$	-۴/۸۸	-۴/۹۳	٪ ۱/۰۳
M_{δ_s}	-۳/۴۶	-۳/۵۲	٪ ۱/۷۳

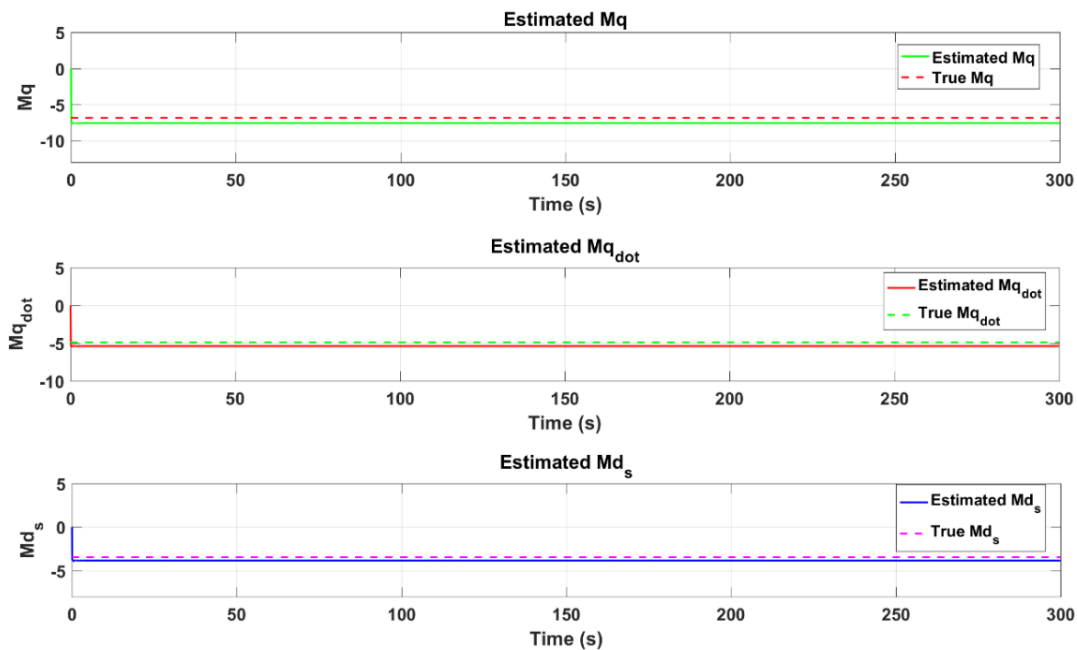


Fig 5. Comparison of the Estimated Hydrodynamic Coefficients Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 2 m/s over 300 s.

شکل ۵. مقایسه نتایج تخمین ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم با سرعت ۲ متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه.

چرخش (q) و عمق (z)، فیلتر توانسته است رفتار سیستم را با دقت مناسبی دنبال کند. همچنین با افزایش سرعت، فیلتر توانایی خود در پیش‌بینی تغییرات دینامیکی سیستم را حفظ کرده و مقادیر خروجی تخمینی، همگرایی مناسبی با پاسخ واقعی داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که فیلتر کالمن توسعه یافته ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی و تخمین دینامیک سیستم‌های غیرخطی مانند رونده‌های زیرسطحی است و می‌تواند در کاربردهای کنترلی و پایش وضعیت این سامانه‌ها نقش مؤثری ایفا کند.

تحریک سیستم افزایش یافته و در نتیجه شرط مشاهده‌پذیری پارامترها بهبود یافته است. به همین دلیل، فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم در شرایط ورودی قوی‌تر، برآورد بهتری از ضرایب هیدرودینامیکی ارائه داده است.

با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته مقاوم، مدلی برای تخمین متغیرهای حالت رونده زیرسطحی ریموس در شرایط مختلف حرکتی طراحی و پیاده‌سازی شد. نتایج به دست آمده برای سه حالت با سرعت‌های ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ متر بر ثانیه و زوایای ورودی سکان متفاوت، نشان می‌دهد که تخمین‌های حاصل از این فیلتر، با مقادیر واقعی تطابق قابل قبولی دارند. به‌ویژه در تخمین نرخ

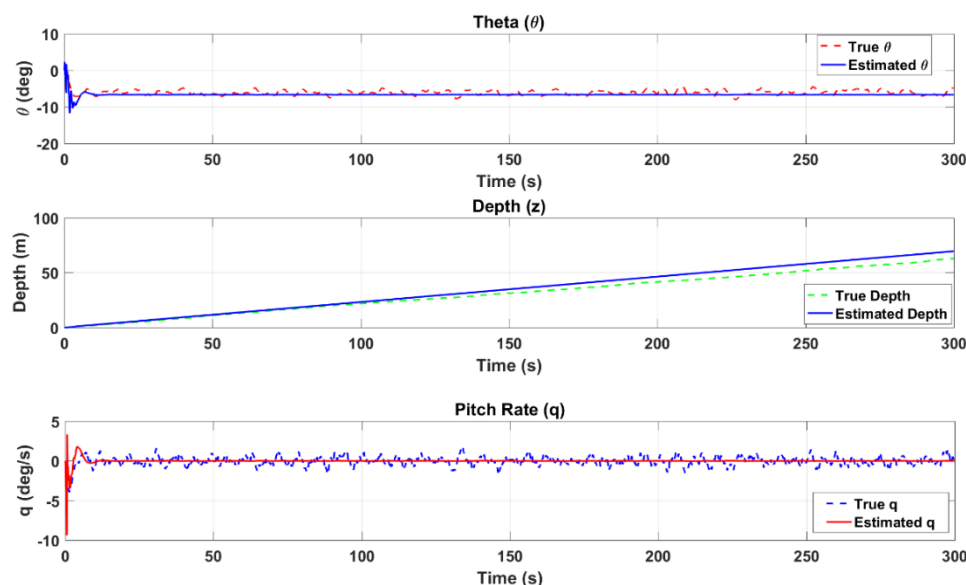


Fig 6. Comparison of the True and Estimated States (θ , q , and z) of the REMUS AUV Using the Robust Extended Kalman Filter at a Speed of 2 m/s over 300 s.

شکل ۶. مقایسه حالت‌های واقعی و تخمینی (θ ، q و z) رونده زیرسطحی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم با سرعت ۲ متر بر ثانیه در زمان ۳۰۰ ثانیه.

جدول ۵. مقایسه‌ی مقدار عمق، زاویه پیچ و نرخ زاویه‌ای پیچ در شرایط سرعت و زاویه ورودی سکان مختلف در ۳۰۰ ثانیه (در حالت تخمین).

Table 5. Comparison of Depth, Pitch Angle, and Pitch Rate Under Different Speed and Rudder Input Angle Conditions at 300 s (Estimated State).

سرعت (m/s)	زاویه ورودی سکان (deg)	عمق (m)	زاویه (deg)	نرخ زاویه‌ای (deg/s)
۱/۵	۵/۵	۲۸/۸۲	-۳/۶۵	-۰/۵۸
۱/۷۵	۷/۵	۴۵/۷۲	-۴/۹۸	-۱/۰۷
۲	۱۰	۶۹/۵۵	-۶/۶۴	-۱/۷۰

جدول ۶. مقایسه‌ی مقدار عمق، زاویه پیچ و نرخ زاویه‌ای پیچ در شرایط سرعت و ورودی سکان مختلف در ۳۰۰ ثانیه (در حالت واقعی)

Table 6. Comparison of Depth, Pitch Angle, and Pitch Rate Under Different Speed and Rudder Input Angle Conditions at 300 s (True State).

سرعت (m/s)	زاویه ورودی سکان (deg)	عمق (m)	زاویه (deg)	نرخ زاویه‌ای (deg/s)
۱/۵	۵/۵	۲۵/۹۸	-۲/۲۰	-۰/۵۲
۱/۷۵	۷/۵	۴۱/۳۱	-۳/۳۹	-۰/۸۲
۲	۱۰	۶۲/۸۸	-۴/۸۹	-۱/۲۰

برای مقایسه و تحلیل دقیق‌تر عملکرد مدل در بازه زمانی واقعی در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

طولانی‌تر، مقادیر عمق (z)، زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) پس از ۳۰۰ ثانیه شبیه‌سازی برای هر دو حالت تخمینی و واقعی در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. نتایج سه سناریوی بررسی‌شده نشان می‌دهد که افزایش سرعت پیشروی و زاویه ورودی سکان، سطح تحریک دینامیکی

بالایی برخوردار بوده و پارامترهای مستقل از ورودی‌ها را به‌درستی استخراج کرده است. این عملکرد مناسب، حتی در شرایطی که تنها متغیر قابل اندازه‌گیری مستقیم، زاویه پیچ (θ) است (آن هم با حضور نویز اندازه‌گیری) نشان‌دهنده‌ی پایداری و توانایی بالای این الگوریتم در شناسایی سیستم‌های دینامیکی با اطلاعات محدود و نویزی است.

۳-۱- اعتبارسنجی تکمیلی با مدل فضای حالت در سیمولینک

دسترسی به تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌های تجربی، مانند تونل کشش یا مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM)، و همچنین اجرای شبیه‌سازی‌های دقیق (CFD)، به دلیل هزینه بالا و زمان‌بر بودن، همواره امکان‌پذیر نیست. از این رو، در این پژوهش برای تقویت روند اعتبارسنجی عددی، یک اعتبارسنجی تکمیلی با استفاده از مدل فضای حالت در محیط سیمولینک انجام شد. هدف از این بخش، بررسی همخوانی پاسخ‌های حاصل از مدل فضای حالت با نتایج تخمینی فیلتر (REKF) است. برای این منظور، ماتریس‌های فضای حالت برگرفته از مرجع (۱۶) در محیط سیمولینک پیاده‌سازی شده و پاسخ‌های عمق (z)، زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) در بازه زمانی ۳۰۰ ثانیه بررسی شدند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌های حاصل از مدل سیمولینک با روند پاسخ‌های تخمینی (REKF) همخوانی قابل قبولی دارند. این نتیجه، اعتبار عددی مدل و روند تخمین را تقویت می‌کند؛ با این حال، برای تأیید نهایی عملکرد روش در شرایط عملیاتی واقعی، استفاده از داده‌های تجربی یا آزمون میدانی ضروری است. ماتریس‌های حالت مورد استفاده به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$A = \begin{pmatrix} -0.82 & -0.69 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.54 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -4.16 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۱۴)$$

پس از پیاده‌سازی مدل فضای حالت در محیط سیمولینک و اعمال زاویه ورودی سکان برابر با ۵.۵ درجه (معادل ۰.۰۹۵ رادیان)، شبیه‌سازی در بازه‌ی زمانی ۳۰۰ ثانیه انجام گرفت. در این مدل، پاسخ سیستم در سه خروجی کلیدی شامل عمق (z)،

سیستم را افزایش داده و باعث بهبود همگرایی ضرایب تخمینی شده است.

پس از بررسی همگرایی ضرایب هیدرودینامیکی، توانایی مدل تخمینی در بازتولید پاسخ‌های دینامیکی ریموس نیز ارزیابی شد. برای این منظور، مقادیر عمق (z)، زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) در انتهای بازه شبیه‌سازی ۳۰۰ ثانیه برای دو حالت مرجع و تخمینی مقایسه شدند. این مقایسه نشان می‌دهد که ضرایب تخمینی تا چه اندازه قادرند رفتار دینامیکی مدل را در سناریوهای مختلف بازسازی کنند.

مقایسه پاسخ‌های تخمینی و مرجع نشان می‌دهد که روند تغییرات (z)، (θ) و (q) در هر سه سناریو با پاسخ مرجع همخوانی دارد. با افزایش سرعت و زاویه سکان، مقدار نهایی عمق، زاویه پیچ و نرخ پیچ نیز مطابق انتظار تغییر کرده است. اگرچه اختلاف‌هایی بین مقادیر تخمینی و مرجع مشاهده می‌شود، این اختلاف‌ها در محدوده قابل قبول باقی مانده و روند کلی پاسخ دینامیکی به‌درستی بازتولید شده است. بنابراین، ضرایب تخمینی فقط از نظر مقدار عددی به مقادیر مرجع نزدیک نشده‌اند، بلکه توانسته‌اند رفتار دینامیکی ریموس در مود شیرجه را نیز با دقت مناسبی بازسازی کنند.

بنابراین همان‌طور که نتایج نشان داد، در این شبیه‌سازی، الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم (REKF) با موفقیت توانسته است ضرایب هیدرودینامیکی و حالت‌های دینامیکی یک رونده زیرسطحی ریموس را به‌صورت آنالین و درست تخمین بزند. نتایج نشان می‌دهند که ضرایب هیدرودینامیکی نظیر $M_q, M_{\dot{q}}, M_{\delta_s}$ به‌خوبی به مقادیر واقعی همگرا شده‌اند. همچنین تخمین حالت‌هایی مانند عمق (z)، زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) با دقت بالایی انجام شده است. با اینکه در متلب، مقدار سرعت و زاویه ورودی سکان تغییر داده شده است، ضرایب هیدرودینامیکی تخمینی در همه‌ی حالت‌ها تقریباً یکسان باقی مانده‌اند، و تنها مقادیر متغیرهای وابسته مانند حالت‌هایی مانند عمق (z)، زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) مطابق انتظار تغییر کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم از دقت و صحت

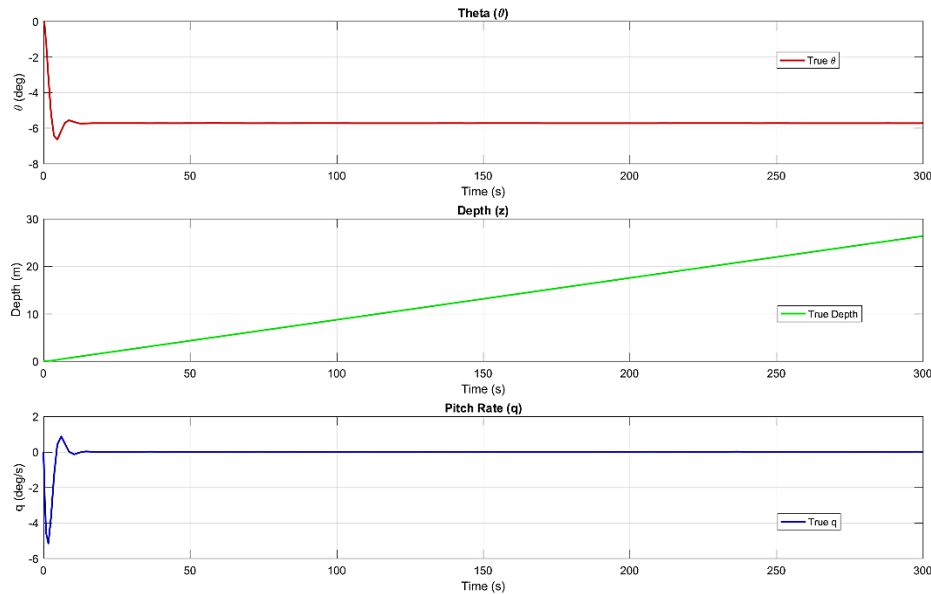


Fig 7. True States (θ , q , and z) of the REMUS AUV Obtained Using MATLAB/Simulink over 300 s.

شکل ۷. نمایش حالت‌های واقعی (θ , q و z) رونده زیرسطحی با استفاده از سیمولینک متلب در زمان ۳۰۰ ثانیه.

هرچند برای اطمینان از عملکرد در شرایط عملیاتی واقعی، اجرای آزمون میدانی با داده‌های اقیانوسی ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم برای تخمین آنالین ضرایب هیدرودینامیکی مدل شیرجه‌ای رونده زیرسطحی ریموس به کار گرفته شد. ضرایب M_q , $M_{\dot{\theta}}$, $M_{\dot{q}}$ همراه با حالت‌های دینامیکی (q), (θ) و (z) در قالب بردار حالت تقویت‌شده تخمین زده شدند. نتایج حاصل از سه سناریوی شبیه‌سازی شده نشان داد که ضرایب تخمینی در هر سه حالت به مقادیر مرجع همگرا شده و خطای تخمین در محدوده قابل قبول باقی می‌ماند. همچنین، با افزایش سرعت پیشروی و زاویه ورودی سکان، سطح تحریک دینامیکی سیستم افزایش یافته و کیفیت همگرایی ضرایب بهبود یافته است. مقایسه پاسخ‌های دینامیکی حاصل از ضرایب تخمینی با پاسخ‌های مرجع نشان داد که مدل تخمینی قادر است روند تغییرات عمق، زاویه پیچ و نرخ زاویه‌ای پیچ را با دقت مناسبی بازتولید کند. افزون بر این، اعتبارسنجی تکمیلی با مدل فضای حالت در محیط سیمولینک، همخوانی قابل

زاویه پیچ (θ) و نرخ زاویه‌ای پیچ (q) به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شد نتایج از محیط سیمولینک با نتایج تخمین با فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقاوم همخوانی مطلوبی دارد.

تحلیل نمودارهای خروجی حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مقادیر تخمینی متغیرهای حالت، دقت و پایداری مناسبی دارند. این موضوع بیانگر آن است که ساختار مدل طراحی شده قادر به بازتولید رفتار واقعی سیستم با دقت قابل قبول است. به ویژه، همگرایی مناسب در خروجی‌ها و اختلاف ناچیز بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مرجع، نشان از عملکرد مؤثر مدل در تخمین ضرایب دینامیکی سیستم دارد. این نتایج همچنین بیانگر آن هستند که استفاده از ورودی پیوسته در یک بازه زمانی نسبتاً بلند، به مدل فرصت کافی برای تثبیت دینامیک سیستم داده و سبب بهبود کیفیت تخمین در متغیرهای کلیدی شده است.

اگرچه مقاله داده تجربی مستقیم از محیط اقیانوس واقعی ارائه نداده، اما شواهد شبیه‌سازی پایداری در برابر نویز، خطای کمتر از ۱۰٪ و قابلیت به‌روزرسانی آنالین نشان می‌دهد که روش پتانسیل خوبی برای عملکرد در شرایط واقعی دارد.

این حال، از آنجا که در این پژوهش داده تجربی مستقیم از آزمون میدانی یا آزمایشگاهی استفاده نشده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده عملکرد روش با داده‌های تجربی، آزمون PMM یا داده‌های میدانی اقیانوسی نیز ارزیابی شود.

قبولی میان پاسخ‌های شبیه‌سازی شده و نتایج تخمینی نشان داد. بر این اساس، REKF می‌تواند به عنوان یک ابزار عددی مناسب برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و پشتیبانی از طراحی کنترل ریموس در شرایط عملیاتی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. با

واژه‌نامه

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 1. Underwater vehicle | 5. Planar Motion Mechanism | 9. Scaling Matrix |
| 2. Remotely Operated Vehicle | 6. Extended Kalman Filter | 10. Tuning Parameters |
| 3. Autonomous Underwater Vehicle | 7. Robust Extended Kalman Filter | |
| 4. REMUS | 8. Pulsar | |

مراجع

- [1] Karimi A., Ghasemi R.H. Equipping of a Hovering Type Autonomous Underwater Vehicle with Ballast Tanks and its effect on Degrees of Freedom. *Modares Mechanical Engineering* 2017; 17(7): 397-404.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10275940.1396.17.7.34.6>
- [2] Tarighi, R., Kazemi, M. H., Ghasemi, R.H. Robust position control with combining inner and outer Loop based on sliding mode for a Solar Powered Autonomous underwater vehicle (AUV). *Iranian Journal of Marine Technology*, 2025; 11(4): 16-30. Magiran ID: 2828392.
<https://www.magiran.com/paper/2828392>
- [3] Kadkhodaei A., Ghasemi R.H. Representation of New Variable Thrust Vector Underwater Robotic Platform for Complex Trajectory Tracking. *J. Eur. Des Systèmes Autom.* 2021; 54(3): 411-421.
<https://doi.org/10.18280/jesa.540304>
- [4] Amirkolaii, F.S., Ghasemi, R.H. Representation of an autonomous underwater vehicle and trajectory controller design for in-water ship hull inspection. *Modares Mechanical Engineering*. 2016; 15(10): 12-22.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.10.33.7>
- [5] Rasekh M, Mahdi M. Combining CFD, ASE, and HEKF approaches to derive all of the hydrodynamic coefficients of an axisymmetric AUV. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021; 236(2): 474-492.
<https://doi.org/10.1177/14750902211034361>
- [6] Huajun Z, Xinchu T, Hang G, Shou X. The parameter identification of the autonomous underwater vehicle based on multi-innovation least squares identification algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020; 17(2): 172988142092101.
<https://doi.org/10.1177/1729881420921016>
- [7] Mahdi, M., Malekpoor, M. Extraction of Hydrodynamic Coefficients of the Remus Underwater Vehicle Robot by Coupling the CFX Software Simulator and Kalman Filter Estimator Code. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2022; 11(1): 71-81.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.5.7>
- [8] Ghasemi R.H., Khodayari M.H. Sliding mode control of an autonomous underwater vehicle with parametric uncertainty and sensors noises. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019; 48(4): 107-116.
<https://www.magiran.com/author/456727>
- [9] Hakamifard M., Rostami-Varnousfaaderani, M. Numerical Calculation of maneuvering Damping and Added Mass Coefficients of an Autonomous Underwater Vehicle up to Third Order using Finite Volume Method. *Journal of Marine Science and Technology*, 2021; 20(1): 1-20.
<https://doi.org/10.22113/jmst.2019.167904.2253>
- [10] Cardenas P, de Barros EA. Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches. *IEEE J Oceanic Eng.* 2020; 45: 1157-1176.
<https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2930421>
- [11] Shadlaghani, Arash. Numerical Modeling of Hydrodynamic Coefficients of a Submerged Body in Accelerated Motion. Master's thesis, Isfahan University of Technology, 2014.
- [12] Abdollah Sakaki, Mohsen Sadeghian Kerdabadi. Experimental and numerical determination of the hydrodynamic coefficients of an autonomous

- underwater vehicle. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. 2020; 62(134): 124-135. <https://doi.org/10.17402/427>
- [13] Ahmed F, Xiang X, Jiang C, Xiang G, Yang S. Survey on traditional and AI based estimation techniques for hydrodynamic coefficients of autonomous underwater vehicle. Ocean Engineering. 2023; 268: 113300. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113300>
- [14] Deng F, Levi C, Yin H, Duan M. Identification of an Autonomous Underwater Vehicle hydrodynamic model using three Kalman filters. Ocean Engineering. 2021; 229: 108962. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108962>
- [15] Sajedi Y, Bozorg M. Robust estimation of hydrodynamic coefficients of an AUV using Kalman and H_∞ filters. Ocean Engineering. 2019; 182: 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.039>
- [16] Prestero T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution; 2001. <https://doi.org/10.1575/1912/3040>
- [17] Xiong, K., Wei, C. L., & Liu, L. D. Robust Kalman filtering for discrete-time nonlinear systems with parameter uncertainties. Aerospace Science and Technology, 2012; 18(1): 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.03.012>
- [18] Simon, D. Optimal State Estimation. Vol. 5. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006. <https://doi.org/10.1002/0470045345>
- [19] Ebrahimi, S., Bozorg, M., Zare Ernani, M. Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Dynamic Using Extended Kalman Filter with ARMA Noise Model. International Journal of Robotics, Theory and Applications, 2015; 4(1): 22-28. <https://www.sid.ir/files/Server/je/1027220150103.pdf>
- [20] Wang Z., Guedes Soares C., Zou Z. Optimal Design of Excitation Signal for Identification of Nonlinear Ship Manoeuvring Model. Ocean Engineering, 2020; 196: 106778. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106778>
- [21] Tiano A., Sutton R., Lozowicki A., Naeem W. Observer Kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle. Control Engineering Practice, 2007; 15(6): 727-739. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.004>