دانشگاه صنعتی سهند
نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق
جلد ۳- شماره ۱-تابستان ۱۳۹۴
صفحه ۷۰ الی ۱۰۰
ISSN: 2322-3146
http://jnsee.sut.ac.ir

شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی مبتنی بر رویتگر غیرخطی EKF پیوسته زمان برای شناور زیرسطحی NPS AUV II

سید حمید موسویان[۱]، حمیدرضا کوفیگر[۲] و محسن اکرامیان[۳]

[۱]کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، h.mousavian@eng.ui.ac.ir

[۲]**نویسنده مسئول**، استادیار مهندسی برق-کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، koofigar@eng.ui.ac.ir

[۳]استادیار مهندسی برق-کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان،m.ekramian@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱)

چکیده

معادلات دینامیکی شناور زیرسطحی خودگردان (AUV) به صورت یک سیستم غیرخطی با ضرایب هیدرودینامیکی متعدد توصیف می‌گردد که این ضرایب تاثیر شدیدی بر عملکردAUV، قابلیت مانور و کنترل پذیری آن دارند. از طرف دیگر مقدار این ضرایب وابستگی زیادی به سرعت شناور و ویژگی‌های هندسی آن دارد. در این مقاله مسأله شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور زیرسطحی خودگردان NPS AUV II توسط رویتگر غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) پیوسته زمان مطرح، و همگرایی خطای حالت ماندگار تخمین به سمت صفر تضمین می‌گردد. به این منظور ضرایب هیدرودینامیکی شناور به عنوان متغیرهای حالت مکمل سیستم در نظر گرفته می‌شود، و با استفاده از رویتگر EKF براساس داده‌های ورودی- خروجی سیستم با وجود نویز در اندازه گیری سنسورها، نهایتاً متغیرهای حالت مدل غیرخطی و ضرایب هیدرودینامیکی مورد نظر متناسب با ایجاد یک مانور حرکتی، موسوم به (مسیر) حلزونی شکل، تخمین زده می‌شوند. به منظور تحلیل عددی عملکرد روش پیشنهادی، معادلات دینامیکی شناور NPS AUV II به عنوان یک نوع شناور زیرسطحی پرکاربرد معرفی، و مقایسه‌ای بین خروجی‌های مدل شناسایی شده و مدل واقعی، انجام می‌گیرد.

واژه های کلیدی

شناور زیرسطحی خودگردان،
رویتگر غیرخطی،
فیلترکالمن توسعه یافته،
ضرایب هیدرودینامیکی،
مانور حلزونی شکل

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

Sahand University ofTechnology

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering
Vol.3, No.1,
Summer 2015
ISSN: 2322 – 3146
http://jnsee.sut.ac.ir

Nonlinear 6DOF Model Identification for Underwater Vehicle NPS AUV II Based on Nonlinear Continuous-time EKF Observer

Sayed Hamid Mousavian[1], Hamid Reza Koofigar[2] and Mohsen Ekramian[3]

[1]MSc graduated in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, h.mousavian@eng.ui.ac.ir

[2]**Corresponding Author**, Assistant Prof., Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, koofigar@eng.ui.ac.ir

[3]Assistant Prof., Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, m.ekramian@eng.ui.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Autonomous underwater vehicle,

Nonlinear observer, Extended Kalman filter,

Hydrodynamic coefficients,

Helical maneuver

The dynamic equations of an autonomous underwater vehicle (AUV) are described as a nonlinear system with multiple hydrodynamic coefficients which strongly affect the performance, maneuverability and controllability of AUV. On the other hand, the values of these coefficients depend on the vehicle speed and the geometric properties. In this paper, the nonlinear model identification problem of NPS AUV II, as a six degree-of-freedom (DOF) autonomous underwater vehicle, is addressed by using the nonlinear continuous-time extended Kalman filter (EKF) observer with guaranteed convergence. To this end, the hydrodynamic coefficients of AUV are considered as the augmented state variables of a six DOF nonlinear model. Based on the input-output data at the presence of the measurement noise of sensors, the state variables and the hydrodynamic coefficients of the nonlinear model in a (path) helical maneuver, are suitably estimated by using the EKF observer. In order to analyze the numerical performance of the proposed method, the dynamic equations of the vehicle are introduced, and a comparison is made between the identified model outputs and those of the real model.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2010-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۱- مقدمه

شناورهای زیرسطحی خودگردان از مهم‌ترین ربات‌های بی سرنشین زیرآبی هستند که ابتدا در بسیاری از تحقیقات دریایی و سپس جهت کاهش خطرات انسانی در بخش‌های گوناگونِ مرتبط با دریا اعم از صنعت نفت و گاز، اکتشافات، بازرسی سدها، صنایع نظامی، تهیه نقشه‌های استراتژیک از مناطق عملیاتی، جنگ ضد زیردریایی و انجام عملیاتی نظیر مین گذاری و نقشه برداری مورد توجه قرار گرفته اند [۱-۴]. هزینه عملیاتی پایین، عدم به خطر افتادن جان انسان‌ها در مأموریت‌های خطرناک، امکان استفاده در شرایط آب و هوایی و دریایی نامساعد، و بسیاری مزایای دیگر باعث گردیده که تقاضا برای این شناورهای زیرسطحی خودگردان نسبت به سایر شناورهای زیرآبی هر روز افزایش یافته و مراکز علمی و صنعتی جهان توجه ویژه ای به این امر داشته باشند [۱، ۳، ۵].

رفتار دینامیکی AUV به دلیل پارامترهای هیدرودینامیکی، غیرخطی و وابسته به زمان می‌باشد و در چنین شرایطی استفاده از روش‌های شناسایی سیستم[1]، مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این نکته که داشتن یک مدل از سیستم به عنوان یک گام اساسی در طراحی کنترل‌کننده مطرح می‌گردد، مسأله شناسایی و تخمین پارامترهای مدل سیستم جهت کنترل شناور موضوعی حائز اهمیت بوده و مستلزم بکارگیری روش‌های شناسایی کارآمد می‌باشد. در مورد مسأله مدل‌سازی و شناسایی دینامیکی شناورهای زیرسطحی در ابتدا می‌بایست رفتار شناور در محیط حقیقی مشاهده گردد تا پس از این مرحله به کمک روش‌های موجود، بتوان مدلی برای متناظر نمودن سیگنال‌های کنترلی سیستم با خروجی سیستم به دست آورد [۶، ۷]. در واقع در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی، مدل‌های ریاضی برای توصیف رخدادهای واقعی محیط پیشنهاد می‌شوند و سپس آزمایشات واقعی برای اعتبار سنجی این مدل‌ها انجام می‌گیرند. معمولاً این مدل‌ها تعدادی پارامتر دارند که نمی‌توانند به صورت مستقیم محاسبه یا اندازه گیری شوند. بنابراین فرآیند تخمین پارامترها نقش اساسی در روند مدل‌سازی تجربی رخدادهای مورد نظر ایفا می‌کنند [۸]. در حقیقت رویه مدل‌سازی دقیق دینامیک یک AUV با دیدگاه شناسایی سیستم اولین گام در طراحی یک AUV کارا می‌باشد.

در واقع برای طراحی یک شناور زیرسطحی خودگردان باید قابلیت مانور و کنترل پذیری آن بر اساس یک مدل ریاضی و از قبل آزمایش شود. مدل ریاضی شامل نیرو و ممان‌های هیدرودینامیکی است که بر اساس یک دسته از ضرایب هیدرودینامیکی بیان شده اند. ضرایب هیدرودینامیکی تاثیر شدیدی بر کارآمدی عملکرد یک AUV دارد [۱، ۷]. بنابراین دانستن مقادیر صحیح این ضرایب که در واقع به معنی یافتن مدل دینامیکی صحیح از شناور می‌باشد مسأله ای مهم و اساسی در میان مطالعات مربوط به AUV بوده و بخصوص در طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های هدایت‌گر خودکارِ[2] مورد استفاده در شناورهای خودگردان، دانستن این ضرایب مسأله ای اساسی است. ضرایب هیدرودینامیکی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی نمود: ضرایب میرایی خطی[3]، ضرایب نیروی اینرسی خطی[4] و ضرایب میرایی غیرخطی[5]. در مرجع [۹] تأثیر ضرایب هیدرودینامیکی مختلف بر کیفیت مانورپذیری اجسام غوطه ور بررسی شده و اثبات شده است که ضرایب میرایی خطی بیشترین تأثیر را در قابلیت مانورپذیری AUV ایجاد می‌کنند. معمولاً این ضرایب از طریق آزمایش آنالیز عددی و یا فرمول‌های تجربی و روش‌های عملیاتی مشخص می‌شوند. اگر چه تست مکانیزم حرکت صفحه ای[6] (PMM) در میان آزمایشات عملی رایج ترین تست می‌باشد [۱۰-۱۲]، اما نتایج مقادیر اندازه گیری شده آن به علت مشکلات عملی آزمایش و دشواری‌های اجرایی و همچنین عدم تطابق کامل شرایط

[1] System Identification
[2] Autopilot
[3] Linear Damping Coefficients
[4] Linear Inertial Force Coefficients
[5] Nonlinear Damping Coefficients
[6] Planar Motion Mechanism - PMM

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

آزمایش با شرایط واقعی (وجود خطا)، دارای دقت کافی نیست و تخمین پارامتر ممکن است به علت تأثیر تفاوت مقیاس دچار بایاس شود. همچنین مراجع [۱۲، ۱۳] به محاسبه برخی از ضرایب هیدرودینامیکی از طریق روش دینامیک سیالات محاسباتی[1] (CFD) پرداخته اند. در واقع در این گونه روش‌ها علی رغم صرف زمان و هزینه بالا، تنها یک یا دو پارامتر در هر دور آزمایش تعیین می‌شود.

این مسائل، معرفی روش‌های جایگزینی را می‌طلبد که این نواقص را رفع کند. استفاده از روش‌های شناسایی سیستم به علت قابلیت استفاده از نتایج آزمایشات قبلی، در زمان بسیار محدود و با صرف هزینه‌های بسیار کمتری در مقایسه با روش‌های آزمایشی و نیز دستیابی به نتایج نسبتاً دقیق [۸] می‌تواند به عنوان روشی کارا در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به کار گرفته شود. در واقع روش شناسایی سیستم برای شناورهای زیردریایی با مسأله تخمین بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشی از تعدادی از پارامترها یا ضرایب هیدرودینامیکی که دینامیک شناور را مشخص می‌نمایند، مرتبط است [۱۴]. چنین اندازه گیری‌هایی در طول آزمایشات تمام مقیاس با سنسورهایی که بر روی سیستم نصب می‌شوند فراهم گردیده و سپس، توسط یک روش تخمین پارامتر پردازش و تحلیل می‌شوند. در طول سالیان اخیر مطالعات بسیاری بر اساس روش‌های گوناگونی در زمینه شناسایی سیستم و تخمین ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای زیرسطحی بی سرنشین صورت گرفته است که در ادامه می‌توان به چندین نمونه از مهمترین آن‌ها اشاره نمود [۶]:

(۱) روش شناسایی حداقل مربعات[2]

این روش به منظور شناسایی خطی مدل سیستم بسیاری از گونه‌های شناور زیرآبی در مراجع گوناگون به کارگرفته شده است. به طور نمونه در مرجع [۱۵]، یک روش شناسایی عملی به منظور تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی مدل‌های ریاضی کوپل شده و غیر کوپل انتخاب شده برای یک شناور زیرآبی بر اساس تکنیک حداقل مربعات ارائه شده است. در این مرجع روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای سیستم شناور بر روی دو مدل مجزا از جمله یک مدل یک درجه آزادی برای حرکت در راستای محور x (Surge) و چرخش حول محور عمودی z (Yaw)، و یک مدل سه درجه آزادی برای دینامیک مود حرکتی Yaw با ایجاد یک مانور حرکتی به صورت زیگزاگ در صفحه افقی بکار گرفته است.

(۲) روش شناسایی تطبیقی[3]

این روش شناسایی نیز به منظور شناسایی تطبیقی پارامترهای مدل بطور مجزا، و یا بصورت ترکیبی با مسأله کنترل شناورهای زیرآبی در مراجع به کارگرفته شده است. هدف از تخمینگرهای پارامتر تطبیقی در واقع اطمینان حاصل کردن از این است که تمام سیگنال‌ها تحت شرایط کافی از تحریک پایدار[4]، کراندار باقی مانده و همچنین مقادیر تخمین زده شده به مقادیر واقعی پارامترهای شناور، همگرا می‌شوند [۱۶]. در این روش دو مسأله انتخاب سیگنال ورودی مناسب با شرایط کافی از تحریک پایدار، به منظور تحریک تمامی مدهای سیستم تحت بررسی، و همچنین انتخاب عددی بهره‌های تطبیق در قوانین تطبیق پیشنهادی توسط طراح، بسیار مهم و پر اهمیت بوده و دارای نقش بسزایی در همگرایی پاسخ‌ها می‌باشد. این دو عامل تا حد زیادی باعث ایجاد محدودیت و پیچیدگی‌هایی در طراحی این شناساگر می‌شوند. به طور نمونه در مرجع [۱۶]، یک تکنیک شناسایی تطبیقی برخط[5] پایدار به منظور شناسایی (عناصر) مدل دینامیکی یک نوع شناور زیرآبی ارائه شده است. در این

[1] Computational Fluid Dynamics - CFD
[2] Least Squares Identification
[3] Adaptive Identification
[4] Persistent Excitation
[5] Online

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

مرجع مقایسه ای از عملکرد روش پیشنهادی با تکنیک متداول شناسایی خارج از خط[1] حداقل مربعات به منظور شناسایی مدل‌های دکوپله شده یک درجه آزادی انتخاب شده برای شناور صورت گرفته است.

(۳) روش شناسایی توسط منطق فازی و شبکه‌های عصبی[2]

شناسایی دقیق سیستم‌های چند ورودی–چند خروجی غیر خطی متغیر با زمان، به ویژه برای سیستم‌های AUV به منظور اجرا و پیاده سازی الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته و ناوبری دقیق آن‌ها، امری بسیار ضروری می‌باشد. به طور کلی شناساگرهای مبتنی بر منطق فازی و یا شبکه عصبی، که برای شناسایی مدل شناورهای زیرآبی مورد استفاده قرار می‌گیرند، یک ایده کلی برای مدلسازی دینامیکی هر وسیله بدنه صلب شش درجه آزادی محسوب می‌شوند. به طور نمونه مرجع [۱۷]، به حل مسأله شناسایی برخط سیستم دینامیک یک AUV با هدف دستیابی به مدل دینامیکی غیرخطی کوپل شده شناور بصورت یک جعبه سیاه می‌پردازد. در واقع این جعبه سیاه با توجه به اطلاعات ورودی–خروجی مستخرج از سیستم، بر اساس دو تکنیک پیشنهادی برخط مدلسازی فازی تطبیقی و روش مدل سازی فازی-عصبی[3] تطبیقی بنا شده است و به منظور غلبه بر تاثیر اختلالات نامعین خارجی و همچنین پیچیدگی‌های مدلسازی نیروهای هیدرودینامیکی AUV در مسأله بکارگیری یک مدل ریاضی و تخمین پارامترهای آن، بکار گرفته شده است. همچنین مرجع [۱۸]، مسأله اجرا و پیاده سازی روش شناسایی سیستم توسط یک شناساگر شبکه عصبی مبتنی بر تکنیک ماشین‌های بردار پشتیبان[4] (SVM) را به منظور مدلسازی غیرخطی دینامیک شناورهای زیرسطحی اژدر شکل[5] مطرح می‌کند. در این مقاله به منظور دستیابی به مقادیر مربوط به مشتقات هیدرودینامیکی شناور و مدل‌های دینامیکی بالک‌های کنترلی، داده‌ها و اطلاعات مستخرج از سیستم بصورت خارج از خط از دو آزمایش عملی روش تست مکانیزم حرکت صفحه ای (PMM) و روش تونل آب گردشی[6] (CWC) اتخاذ شده است و بر مبنای آن‌ها شناساگر عصبی SVM به منظور شناسایی پارامترها و مشتقات هیدرودینامیکی شناور بکار گرفته می‌شود که این روند نهایتاً منجر به مدلسازی غیرخطی دینامیک شناور می‌گردد.

هر یک از این تکنیک‌های ذکر شده دارای مزایا و معایبی می باشند از این رو بایستی به دقت و به طور دقیق، روش شناسایی و مدل شناورهای زیرآبی موردنظر بر اساس شرایط واقعی و ملزومات انتخاب گردد [۶]. در روش‌های یاد شده، آنچه که هدف اصلی می‌باشد یافتن مدل ریاضی مناسبی است که توانایی شبیه سازی رفتار تجربی مسأله مورد بررسی را دارا باشد. در نهایت با بررسی دقیق هر یک از این مقالات مرتبط با سه دسته روش شناسایی فوق و همچنین چندین مرجع وابسته دیگر به آن‌ها از مرجع کامل [۶]، می‌توان بیان نمود که هر یک از این تکنیک‌های ذکر شده پیشین حداقل دارای یکی از قیود محدود کننده زیر می‌باشند:

- خطی سازی معادلات غیرخطی AUV، و نادیده گرفتن اثر کوپلینگ و ترم‌های غیرخطی معادلات سیستم [۱۶]، اطلاع از کران تغییرات نامعینی‌های پارامتری سیستم، و شناسایی جداگانه عناصر نامعلوم هر یک از زیرسیستم‌های شناور توسط شناساگرهای خطی [۱۵، ۱۶]،
- در نظر نگرفتن برخی عوامل تاثیر گذار در روند طراحی شناساگر به منظور شناسایی سیستم نظیر اغتشاشات خارجی محیط و نویزهای اندازه گیری [۱۶–۱۸]،

[1] Offline
[2] Fuzzy Logic and Neural Network Identification
[3] Neurofuzzy Modelling
[4] Support Vector Machines - SVM
[5] Torpedo-Shaped
[6] Circulating Water Channel - CWC

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

- شناسایی سیستم با در نظرگرفتن مود تفکیکی حرکت اعم از مود سمت، عمق و غیره در مانوری خاص [۱۵، ۱۶]، با درنظر گرفتن تعداد بسیار محدودی پارامتر نامعلوم برای سیستم [۱۵، ۱۶]،
- نداشتن تضمین تحلیلی پایداری و عملکرد مقاوم شناساگر در روش پیشنهادی [۱۶-۱۸]،
- لزوم دسترسی به داده‌های ورودی و خروجی سیستم در شرایط مختلف حرکت شناور جهت استنتاج قوانین فازی به صورت جامع و یا آموزش شبکه عصبی [۱۷، ۱۸].

روش شناسایی سیستم به کمک رویتگرهای غیرخطی مانند فیلتر کالمن توسعه یافته و مد لغزشی جهت تخمین حالات سیستم و ضرایب هیدرودینامیکی شناور به عنوان یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد مطرح می‌باشد [۱۹-۲۵]. البته رویتگر غیرخطی مدلغزشی به دلیل دارا بودن دو محدودیتِ کران دار و پیوستگی لیپشیتز[1] توابع غیرخطی سیستم، و همچنین قابلیت اعمال این رویتگر تنها به سیستم‌هایی با فرم نرمال و همبسته، دارای پیچیدگی‌ها و مشکلاتی در پیاده‌سازی می‌باشد [۲۴-۲۶]. در مقابل، رویتگر فیلتر کالمن توسعه یافته می‌تواند به منظور رفع نواقص و محدودیت‌های فوق الذکر، در جهت تخمین حالات سیستم و ضرایب هیدرودینامیکی شناور بکار گرفته شود. در واقع ویژگی مهم فیلتر کالمن توسعه یافته، تخمین متغیرهای حالت یک سیستم در حضور نویز ورودی و نویز اندازه‌گیری با حداقل کواریانس سیگنال خطای تخمین است. بر اساس مراجع [۲۷-۲۹]، فیلتر کالمن در دو گروه فیلتر کالمن پیوسته زمان، و فیلتر کالمن گسسته زمان تقسیم بندی می‌گردند که متناسب با سیستم تحت بررسی و اطلاعات موجود از سیستم، از هر یک از این دو نوع استفاده می‌گردد. با توجه به اهمیت فیلتر کالمن توسعه یافته در کاهش تأثیر نویز در فرآیند تخمین، تحقیقات زیادی در ارتباط با فیلتر کالمن توسعه یافته در مباحث تخمین حالات و تعیمم آن به منظور شناسایی سیستم تا به امروز صورت گرفته است [۱۹-۲۳]. به عنوان نمونه، می‌توان برای شناور مورد نظر، نیروهای هیدرودینامیکی را ابتدا توسط فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده و سپس ضرایب هیدرودینامیکی توسط تحلیل رگرسیون شناسایی گردند [۳۰]. بنابراین نهایتاً به منظور رفع نواقص و محدودیت‌های روش‌های پیشین در زمینه شناسایی سیستم و تخمین ضرایب هیدرودینامیکی AUV، در این مقاله از رویتگر غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته پیوسته زمان، با توجه با قابلیت‌های تئوری و پیاده‌سازی آن، به عنوان شناساگر پارامتر برای مدل غیرخطی شش درجه آزادی سیستم AUV استفاده می‌گردد.

ساختار این مقاله به این صورت است: معادلات دینامیکی AUV در بخش ۲ توصیف می‌گردد. در بخش ۳ فرمول بندی رویتگر غیرخطی EKF پیوسته زمان به عنوان یک شناساگر غیرخطی پارامتر، به منظور تخمین پارامترهای یک سیستم غیرخطی بیان می‌گردد. در بخش ۴ با استفاده از رویتگر غیرخطی EKF پیشنهادی به تخمین حالات سیستم، ضرایب هیدرودینامیکی و شناسایی مدل غیرخطی شناور NPS AUV II پرداخته می‌شود. در بخش ۵ و ۶ نیز به ترتیب نتایج شبیه سازی‌ها و نتیجه گیری مقاله بیان می‌شوند.

۲- معادلات دینامیکی AUV

به منظور استخراج معادلات دینامیکی حرکت شش درجه آزادی شناورها از جمله AUV، تعریف مناسب دستگاه مختصات و درجات آزادی سیستم نقش مهمی در ساده سازی روابط دارد. مجموعه معادلات دینامیکی حاکم بر AUV طبق مدل ارائه شده در [۷]، بر اساس حرکت‌های انتقالی و دورانی به دست می‌آید. برای بررسی سینماتیک و دینامیک حرکت ربات‌های زیرسطحی، دو نوع دستگاه مختصات حرکتی تعریف می‌گردد. اولین دستگاه، مختصات بدنی[2] است که معمولاً مرکز دستگاه مختصات بدنی منطبق

[1] Lipschitz Continuity
[2] Body Fixed Frame

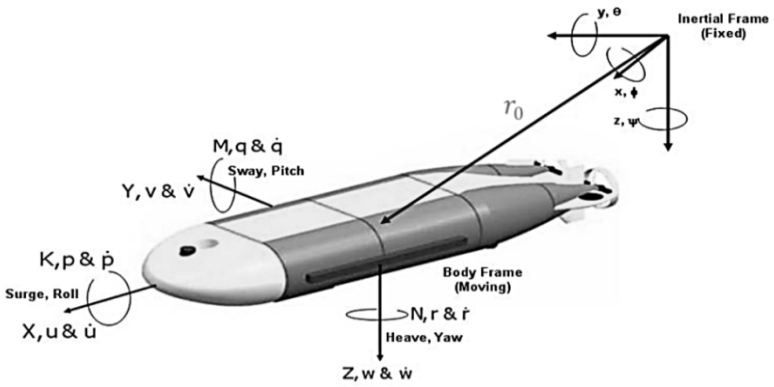
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

بر مرکز شناوری[1] انتخاب می‌شود و دیگری دستگاه مختصات زمینی[2] می‌باشد که ثابت و در نقطه ابتدای حرکت زیرسطحی در سطح آب در نظر گرفته می‌شود [۷]. معادلات حرکت زیرسطحی در مختصات بدنی نوشته می‌شود که بدین ترتیب نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی با تغییر راستای شناور زیرسطحی نسبت به مختصات کلی، تغییر نمی‌کند. در واقع معادلات حرکت معمولاً در دو بخش زیر تعیین می‌شوند:

۱) فرمول‌بندی معادلات سینماتیکی که شامل بردارهای موقعیت، سرعت و شتاب هستند.

۲) استفاده از قوانین نیوتن جهت استخراج معادلات دینامیکی حرکت.

از آنجایی که حرکات شناور زیرسطحی در فضای سه بعدی انجام می‌گیرد، برای چنین سیستمی شش درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، برای یک AUV با شش درجه آزادی، شش محور مختصات مستقل برای تعیین موقعیت و جهت آن مورد نیاز است که موقعیت این دستگاه‌های مختصات بر روی شناور NPS AUV II در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، r_0 بردار مکان مرکز شناوری متحرک نسبت به مختصات زمینی را نشان می‌دهد. بر این اساس، سه مختصات اول و مشتقات زمانی آن‌ها به موقعیت و حرکت انتقالی در طول محورهای x ، y و z مربوط می‌شود و سه مختصات آخر و مشتقات زمانی آن‌ها برای توصیف جهت یابی و حرکت چرخشی در طول محورهای p ، q و r به کار برده می‌شود. توصیف هر یک از متغیرهای مدل دینامیکی در ۶ جهت حرکت، بر طبق علامت گذاری (SNAME 1950) در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ : موقعیت دستگاه‌های مختصات بدنی و زمینی NPS AUV II به همراه متغیرهای حرکت [۷]

جدول ۱ : متغیرهای توصیفی مدل AUV (نماد گذاری SNAME 1950) [۷]

درجه آزادی	راستای حرکت یا چرخش	نیروها و گشتاورها	سرعت های خطی و زاویه ای	موقعیت ها و زوایای اویلر
۱	حرکت در راستای محور x (Surge)	X	u	x
۲	حرکت در راستای محور y (Sway)	Y	v	y
۳	حرکت در راستای محور z (Heave)	Z	w	z
۴	چرخش حول محور طولی x (Roll)	K	p	ϕ
۵	چرخش حول محور عرضی y (Pitch)	M	q	θ
۶	چرخش حول محور عمودی z (Yaw)	N	r	ψ

[1] Center of Bouyancy
[2] Earth Fixed Frame

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

معادلات دینامیکی غیرخطی شش درجه آزادی جسم صلب شناور زیرسطحی در حالت کلی (در مختصات بدنی) به صورت فرم

$$M(v)\,\dot{v} + C(v)\,v + D(v)\,v + g(\eta) = \tau \tag{۱}$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\,v \tag{۲}$$

بیان می‌شود [۷]، که در آن

$$\begin{aligned} &\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{6\times1}\,; \quad \eta_1 = [x, y, z]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1}\,; \quad \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1} \\ &v = [v_1^T, v_2^T]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{6\times1}\,; \quad v_1 = [u, v, w]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1}\,; \quad v_2 = [p, q, r]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1} \\ &\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{6\times1}\,; \quad \tau_1 = [X, Y, Z]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1}\,; \quad \tau_2 = [K, M, N]^T \epsilon\, \mathcal{R}^{3\times1} \end{aligned} \tag{۳}$$

می‌باشد به طوری که، η نشان دهنده بردار چرخش و موقعیت (تعیین جهت) وسیله نسبت به دستگاه مختصات زمینی به عنوان مرجع اینرسی، v بردار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای وسیله نسبت به دستگاه مختصات بدنی، و τ نشان دهنده بردار ورودی‌های کنترل که شامل نیروها و ممان‌های وارده به شناور نسبت به دستگاه مختصات بدنی می‌باشد. به عبارت دیگر، سه مولفه اول در بردار v، η و τ بیانگر کمیات خطی و سه مولفه دوم در این ۳ بردار، بیانگر کمیات دورانی هستند. همچنین در روابط (۱) و (۲)، ترم $M \epsilon \mathcal{R}^{6\times6}$ بیانگر ماتریس جرم و ممان اینرسی (خالص و افزوده)، $C(v) \epsilon \mathcal{R}^{6\times6}$ ماتریس کوریولیس هیدرودینامیکی، $D(v) \epsilon \mathcal{R}^{6\times6}$ ماتریس ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، $g \epsilon \mathcal{R}^{6\times1}$ بردار نیرو و گشتاور گرانشی می‌باشد. بایستی ذکر نمود که مولفه‌های ماتریس‌های جرم افزوده، کوریولیس و میرایی هیدرودینامیکی را ضرایب هیدرودینامیکی بدنه می‌نامند. در واقع ضرایب هیدرودینامیکی تابعی از شکل بدنه بوده و بیانگر نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی وارد بر شناور در محیط زیرآب هستند. ترم $J(\eta)$ نیز یک ماتریس تبدیل با مرتبه کامل بین دستگاه مختصات بدنی و زمینی می‌باشد که وابسته به توابع زوایای اویلر[1] یعنی ϕ، θ، ψ است. در سیستم‌های هدایت و کنترل دریایی، تعیین جهت معمولاً به وسیله زوایای اویلر بیان می‌شود. ماتریس $J(\eta)$، سرعت v در دستگاه بدنی را به سرعت $\dot{\eta}$ در دستگاه زمینی تبدیل می‌کند. بر اساس روابط (۱) تا (۳)، می‌توان روابط سینماتیکی مربوطه را به صورت

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \qquad \Leftrightarrow \qquad \dot{\eta} = J(\eta)\,v \tag{۴}$$

بیان نمود که در آن، ماتریس $J(\eta)$ به صورت

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \tag{۵}$$

می باشد. در واقع در رابطه (۴)، ارتباط متغیرهای جابجایی و سرعت خطی (تبدیل سرعت خطی[2]) توسط

$$\dot{\eta}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{۶}$$

[1] Euler Angles
[2] Linear Velocity Transformation

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

بیان می‌شود، که در آن

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} cos\psi\ cos\theta & -sin\psi\ cos\phi + cos\psi\ sin\theta\ sin\phi & sin\psi\ sin\phi + cos\psi\ cos\phi\ sin\theta \\ sin\psi\ cos\theta & cos\psi\ cos\phi + sin\phi\ sin\theta\ sin\psi & -cos\psi\ sin\phi + sin\theta\ sin\psi\ cos\phi \\ -sin\theta & cos\theta\ sin\phi & cos\theta\ cos\phi \end{bmatrix} \quad (۷)$$

می‌باشد. البته بایستی توجه داشت که ترتیب این سه چرخش اختیاری نمی باشد زیرا معمولاً در کاربردهای هدایت و کنترل از xyz-convention مشخص از نظر زوایای اویلر برای چرخش استفاده می شود.

همچنین در رابطه (۴)، رابطه بین زوایا و سرعت زاویه ای (تبدیل سرعت زویه ای[1]) به صورت

$$\dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (۸)$$

برقرار می‌گردد که در آن

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & sin\phi\ tan\theta & cos\phi\ tan\theta \\ 0 & cos\phi & -sin\phi \\ 0 & sin\phi/cos\theta & cos\phi/cos\theta \end{bmatrix} \quad (۹)$$

می‌باشد [۷].

۳- فرمول‌بندی EKF پیوسته زمان به منظور مدلسازی و تخمین پارامترهای یک سیستم غیرخطی

از آنجایی که اندازه‌گیری متغیرهای یک سیستم توسط سنسورهای متعددی صورت می‌گیرد نیاز به راهکاری خواهد بود تا از اندازه‌گیری‌های سنسورهای مختلف نتیجه مناسبی استخراج گردد. در واقع وارد شدن نویز به دینامیک داخلی سیستم و در اندازه‌گیری سنسورها، شناسایی سیستم و طراحی کنترل کننده را برای سیستم با مشکلاتی روبرو می‌سازد. از این جهت، حداقل ساختن تأثیر نویز خروجی اندازه گیری شده در اغلب سیستم‌ها مورد توجه تحقیقات زیادی واقع شده است. از این رو می‌توان از فیلتر کالمن توسعه یافته به عنوان ابزاری قدرتمند جهت کاهش تأثیر نویز در تخمین حالت سیستم، تخمین پارامتر و شناسایی مدل سیستم غیرخطی نیز استفاده نمود. تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته در فرآیند تخمین حالات و شناسایی سیستم در حضور نویز صورت گرفته است [۱۹-۲۳، ۲۷ ، ۲۸]. در واقع فیلتر کالمن توسعه یافته می‌تواند در سیستم‌های غیرخطی که اغتشاش در فرآیند و نویز در اندازه گیری‌های سنسورها موجود است، متغیرهای حالت سیستم را به صورتی بهینه تخمین بزند. پیاده‌سازی و استفاده از این فیلتر در تخمین پارامترهای نامعین سیستم غیرخطی که یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن است، به دلیلِ پیاده‌سازی برخط تخمین‌زنِ پارامتر می‌باشد. در بکارگیری این رویتگر غیرخطی به عنوان شناساگر پارامتر، در حالت خاص، ورودی یا پارامتر مجهول را می‌توان با تبدیل کردن آن‌ها به عنوان متغیرهای حالت (اضافی) مکمل تخمین زد [۳۱]. با تشکیل معادلات تکمیل یافته کلی سیستم، می‌توان در نهایت با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین مناسبی از پارامترهای سیستم به دست آورد.

[1] Angular Velocity Transformation

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

به منظور بکارگیری و فرمول‌بندی رویتگر غیرخطی EKF به عنوان یک شناساگر غیرخطی، معادله حالت و خروجی یک سیستم غیرخطی متغیر با زمان که دارای پارامترهای مجهول است را به صورت

$$\dot{x}_f(t) = f(x_f, u_f, \beta, t) + w_n(t) \tag{۱۰}$$

$$y_f(t) = h(x_f, t) + v_n(t) \tag{۱۱}$$

در نظر بگیرید که در آن، $x_f \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت سیستم، $y_f \in \mathcal{R}^m$ بردار خروجی، $\beta \in \mathcal{R}^p$ بردار پارامترهای مجهول، w_n نویز فرآیند[1] و v_n نویز سنسورها (اندازه گیری)[2] می‌باشد. در واقع ورودی و خروجی سیستم در این معادلات به ترتیب تحت تأثیر سیگنال‌های $w_n(t)$ و $v_n(t)$ به عنوان فرآیندهای تصادفی گوسی یا نرمال[3] به صورت سیگنال‌های نویز سفید با میانگین صفر، قرار گرفته‌اند. همچنین بایستی اشاره نمود که سیگنال‌های $w_n(t)$ و $v_n(t)$ ناهمبسته[4] هستند، به گونه ای که تابع همبستگی متقاطع[5] آن‌ها برابر با $E[w_n(t)\, v_n^T(t)] = 0$ است. مشخصات دو سیگنال نویز به صورت زیر می‌باشد [۲۷-۲۹].

$$w_n(t) = Normal(0, Q), \qquad E[w_n(t)] = 0, \qquad E[w_n(t)\, w_n^T(t)] = Q(t) \tag{۱۲}$$

$$v_n(t) = Normal(0, R), \qquad E[v_n(t)] = 0, \qquad E[v_n(t)\, v_n^T(t)] = R(t) \tag{۱۳}$$

در روابط (۱۲) و (۱۳)، منظور از ترم $Normal$ و E بترتیب تابع گوسی یا نرمال و میانگین یا امید ریاضی[6] می‌باشد، همچنین ماتریس Q بیانگر کواریانس نویز فرآیند و ماتریس R بیانگر کواریانس نویز اندازه گیری است، که با توجه به اطلاعات موجود از نویز مقادیر آن‌ها توسط طراح تعیین می‌گردد. در واقع هدف از طراحی فیلتر کالمن توسعه یافته به عنوان یک رویتگر حالت با کاربرد شناسایی سیستم، تخمین بهینهِ حالت‌های سیستم تحت تأثیر نویزهای ورودی و اندازه‌گیری است. به عنوان اولین گام برای تخمین پارامترهای مجهولِ (بردار β) سیستم غیرخطی روابط (۱۰) و (۱۱)، بایستی هر یک از عناصر بردار β را به عنوان متغیرهای حالت مکمل، در بردار متغیرهای حالت سیستم x_f، قرار داده و بردار حالت جدید x_f^* را تشکیل نمود. بنابراین معادلات (۱۰) و (۱۱) می‌تواند در فرم فضای حالت تکمیل شده به صورت

$$\dot{x}_f^*(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_f(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_f, u_f, \beta, t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_n(t) \\ \eta_n(t) \end{bmatrix} \tag{۱۴}$$

$$y_f(t) = h(x_f^*, t) + v_n(t) \tag{۱۵}$$

بیان شود به طوری که، $w_n \in \mathcal{R}^n$، $\eta_n \in \mathcal{R}^p$ و $v_n \in \mathcal{R}^m$ بیانگر نویز سفید گوسی با میانگین صفر می‌باشند و $x_f^* \in \mathcal{R}^{n+p}$ بردار حالت تکمیل شده سیستم است. سپس برای سیستم معرفی شده با معادلات (۱۴) و (۱۵)، معادلات فیلتر کالمن توسعه یافته یا همان معادله رویتگر حالت به صورت

[1] Process Noise
[2] Measurement Noise
[3] Gaussian or Normal
[4] Uncorrelated
[5] Cross-Correlation
[6] Expected Value or Mean

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

$$\dot{\hat{x}}_f^*(t) = \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_f(t) \\ \dot{\hat{\beta}}(t) \end{bmatrix} = f\left(\hat{x}_f^*, u_f, \hat{\beta}, t\right) + K_f(t)\left(y_f(t) - \hat{y}_f(t)\right) \tag{۱۶}$$

$$\hat{y}_f(t) = h\left(\hat{x}_f^*, t\right) \tag{۱۷}$$

است، که در آن $\hat{x}_f^*(t)$ تخمین متغیرهای حالت مکمل در زمان t و $K_f(t)$ بهره رویتگر است.

همچنین با تعریف خطای تخمین به صورت

$$e(t) = x_f^*(t) - \hat{x}_f^*(t) \tag{۱۸}$$

ماتریس کواریانس خطای تخمین به فرم

$$E\{e(t)\, e(t)^T\} = E\left\{\left[x_f^*(t) - \hat{x}_f^*(t)\right]\left[x_f^*(t) - \hat{x}_f^*(t)\right]^T\right\} = P(t) \tag{۱۹}$$

تشکیل می‌گردد. در واقع، فیلتر کالمن توسعه یافته با کمینه سازی ماتریس کواریانس خطای تخمین ($P(t) = \lim_{t\to\infty}(\{e(t)\, e(t)^T\}) = 0$)، به هدفِ خود که حداقل سازی تاثیر نویزهای فرآیند و اندازه گیری در روند تخمین متغیرهای حالت سیستم است، دست پیدا می‌کند. بدین منظور در ادامه بر اساس مراجع [۲۷-۲۹]، می‌توان سه معادله اصلی در پیاده سازی فیلتر کالمن توسعه یافته زمان پیوسته را به صورت زیر بیان نمود

$$\dot{\hat{x}}_f^*(t) = f\left(\hat{x}_f^*, u_f, \hat{\beta}, t\right) + K_f(t)\left(y_f(t) - h(\hat{x}_f^*, t)\right), \qquad \hat{x}_f^*(0) = \bar{x}_f^*(0) \tag{۲۰}$$

$$K_f(t) = P(t)\, H^{*T}\left(\hat{x}_f^*, t\right) R(t)^{-1} \tag{۲۱}$$

$$\dot{P}(t) = F^*\left(\hat{x}_f^*, t\right) P(t) + P(t)\, F^{*T}\left(\hat{x}_f^*, t\right) - K_f(t)\, H^*\left(\hat{x}_f^*, t\right) P(t) + Q(t), \qquad P(0) = P_0 \tag{۲۲}$$

به طوری که با استفاده از روش خطی سازی ژاکوبین روابط

$$F^*\left(x_f^*, t\right) = \left.\frac{\partial f\left(x_f^*, u_f, \beta, t\right)}{\partial x_f^*}\right|_{x_f^* = \hat{x}_f^*} \tag{۲۳}$$

$$H^*\left(x_f^*, t\right) = \left.\frac{\partial h\left(x_f^*, t\right)}{\partial x_f^*}\right|_{x_f^* = \hat{x}_f^*} \tag{۲۴}$$

به دست می‌آید.

P_0 مقدار کواریانس و میانگین متغیرهای حالت در لحظه صفر، مقادیر از پیش تعیین شده‌ای می‌باشند که در طراحی فیلتر کالمن مورد استفاده قرار می‌گیرند. با انتخاب شرایط اولیه رویتگر حالت به صورت مقدار میانگین متغیر حالت در لحظه صفر، می‌توان مقدار متوسط خطای تخمین را در لحظه صفر برابر با صفر نمود. می‌توان با استفاده از رابطه (۱۸) نشان داد که با چنین انتخابی از شرایط اولیه رویتگر حالت، متوسط خطای تخمین در تمامی لحظات بعدی نیز برابر با صفر است یعنی [۲۷-۲۹]

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

$$\hat{x}_f^*(0) = \bar{x}_f^*(0) = E\{x_f^*(0)\} \quad \Rightarrow \quad E\{e(t)\} = E\{x_f^*(t) - \hat{x}_f^*(t)\} = E\{x_f^*(0) - \hat{x}_f^*(0)\} = 0 \tag{۲۵}$$

همچنین با توجه به در اختیار بودن مقدار کواریانس متغیرهای حالت در لحظه صفر می‌توان ماتریس $P(0)$ را به عنوان شرایط اولیه معادله دیفرانسیل ریکاتی (DRE)[1] در رابطه (۲۲) به صورت زیر به دست آورد.

$$\begin{aligned} P(0) = E\{e(0)\, e(0)^T\} &= E\left\{\left[x_f^*(0) - \hat{x}_f^*(0)\right]\left[x_f^*(0) - \hat{x}_f^*(0)\right]^T\right\} \\ &= E\left\{\left[x_f^*(0) - \bar{x}_f^*(0)\right]\left[x_f^*(0) - \bar{x}_f^*(0)\right]^T\right\} = P_0 \end{aligned} \tag{۲۶}$$

در نهایت به عنوان نتیجه این بخش با استفاده از روابط (۲۰) تا (۲۲)، بترتیب تخمین نهایی حالات سیستم مکمل، بهره فیلتر کالمن توسعه یافته و ماتریس کواریانس خطای تخمین در زمان t بروز رسانی و به دست می‌آیند. سپس به سبب آن نیز، بردار پارامترهای مجهول سیستم (ضرایب هیدرودینامیکی شناور) تعیین و مدل دینامیکی سیستم مشخص می‌شود.

٤- شناسایی مدل غیرخطی و تخمین ضرایب هیدرودینامکی شناور NPS AUV II توسط EKF

در این بخش، براساس مطالب ارائه شده در بخش ۳، با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته به شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی یک نمونه شناور زیرسطحی خودگردان با هدف تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در حضور نویز پرداخته می‌شود. در روند طراحی این شناساگر، کوپلینگ بین تمام مودهای حرکتی شناور در نظر گرفته شده است. روند تخمین از ضرایب هیدرودینامیکی با جمع آوری داده‌های ورودی-خروجی برای یک مدت زمان به اندازه کافی طولانی و سپس پردازش آن‌ها در الگوریتم شناسایی، صورت گرفته است. در این روش (EKF)، نهایتاً ضرایب هیدرودینامیکی تحت بررسی مستقیماً به عنوان خروجی به دست می‌آیند. البته بایستی بیان نمود هنگامی که در ابتدای طراحی این شناساگر، ضرایب هیدرودینامیکی در بردار متغیرهای حالت اصلی سیستم قرار داده می‌شوند، ابعاد ماتریس کواریانس خطای حالت، افزایش می یابد؛ به طوری که اثر منفی بر کارایی تخمین گذاشته و ماتریس ژاکوبین معادله حالت با پیچیدگی مدل نیروهای هیدرودینامیکی، پیچیده خواهد شد [۳۰]. از این رو، مشکل بایاس پارامتر در روند شناسایی سیستم که به علت پیچیدگی مدل ریاضی با تعداد فراوان پارامترهای غیر خطی و همچنین اندازه گیری‌های آغشته با نویز از متغیرهای حالت، ایجاد می‌شود با در نظر گرفتن دو عامل مهم و تاثیر گذار به عنوان یکی از مهم ترین بخش‌های طراحی شناساگر EKF، مرتفع گردیده است [۲۷-۲۹، ۳۲، ۳۳]. عامل اول، مسأله انتخاب صحیح و مناسب مقادیر درایه‌های ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند Q و اندازه گیری R می‌باشد، که به منظور جلوگیری از واگرایی نتایج EKF و تنزل کارآیی و عملکرد تخمین حالات سیستم، بایستی در انتخاب آن‌ها دقت نمود [۳۲، ۳۳]. در این رابطه بایستی بیان نمود که بر اساس مرجع [۳۳]، اگر مقادیر عددی نسبتاً بزرگی برای درایه‌های ماتریس‌های کواریانس نویز انتخاب گردد سبب ایجاد عملکرد نوسانی تخمین حول مقدار واقعی (نامی) می‌شود، در مقابل انتخاب مقادیر عددی بسیار کوچک برای ماتریس‌های کواریانس نویز سبب ایجاد بایاس در تخمین پارامترهای مجهول تحت بررسی می‌گردد. عامل دوم، مسأله انتخاب یک ساختار مناسب برای ماتریس کواریانس نویز فرآیند Q می‌باشد که در این مقاله به صورت یک فرم قطری [۳۲] که درایه‌های آن متناسب با حالات خروجی اصلی سیستم و حالات مکمل (عناصر بردار β) اضافه شده به سیستم، به دو زیر بخش با مقادیر عددی متفاوت بصورت $Q = diag(Q_1, Q_2) \in \mathcal{R}^{26\times26}$ با $Q_1 \in \mathcal{R}^{9\times9} \neq Q_2 \in \mathcal{R}^{17\times17}$ (عدد ۹ و ۱۷ بترتیب بیانگر تعداد حالات خروجی اصلی سیستم و پارامترهای نامعلوم مدل می‌باشد) تقسیم می‌شوند، انتخاب شده است. از این رو در این مقاله با توجه به دو مسأله بیان

[1] Differential Riccati Equation - DRE

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

شده در رابطه با انتخاب ساختار و مقادیر درایه‌های ماتریس‌های کواریانس، و همچنین براساس نتایج بدست آمده برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و خطای تخمین هر یک از آن‌ها، با انتخاب یک فرم قطری و همچنین مقادیر عددی مناسبی برای ماتریس‌های کواریانس نویز، در نهایت عملکرد شناساگر در شناسایی ضرایب مجهول سیستم بهبود یافته و یک مدل تخمین با خطای بسیار اندک نسبت به مدل واقعی ایجاد گردید.

به منظور آغاز اجرای اِعمال الگوریتم شناسایی فیلترکالمن توسعه یافته برای شناسایی مدل و تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی AUV به صورت برخط، در این مقاله از یک مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور زیردریای خودگردان NPS AUV II با ساختار معلوم به عنوان مدل مرجع و حقیقی به منظور تحلیل عددی نتایج، استفاده گردیده است. براساس مراجع [۷، ۳۴]، معادلات حرکت شش درجه آزادی جسم صلب NPS AUV II (یا به نوعی همان معادلات رویتگر) به فرم روابط (۱) و (۲) در بخش ۲، به صورت زیر خواهد بود

$$Surge: \quad X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})]$$

$$Sway: \quad Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})]$$

$$Heave: \quad Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})]$$

$$\begin{aligned} Roll: \quad K = {} & m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ & + I_x\dot{p} + \left(I_z - I_y\right)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pitch: \quad M = {} & m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ & + I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Yaw: \quad N = {} & m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\ & + I_z\dot{r} + \left(I_y - I_x\right)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{yx} + (rq - \dot{p})I_{xz} \end{aligned} \tag{۲۷}$$

که در آن، عناصر X، Y، Z، K، M، N مبین نیروها و گشتاورهای وارد برجسم حول سه محور x، y و z می‌باشند. اکنون بر اساس مطالب ارائه شده در بخش ۳، می‌توان مدل رویتگر رابطه (۲۷) را در قالب روابط (۱۰) و (۱۱) به عنوان یک سیستم غیرخطی با پارامترهای مجهولِ موجود در بردار β، در نظر گرفته و سپس با اضافه نمودن پارامترهای بردار β به عنوان متغیرهای حالت مکمل در بردار متغیرهای حالت سیستم x_f، در نهایت بردار حالت جدید x_f^* را تشکیل داده، و معادلات سیستم را به فرم فضای حالت تکمیل شده روابط (۱۴) و (۱۵) به صورت رابطه

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

$$\begin{bmatrix}\dot{u}\\ \dot{v}\\ \dot{w}\\ \dot{p}\\ \dot{q}\\ \dot{r}\\ \dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\\ \dot{\beta}\end{bmatrix} = [M_{Inertia}]^{-1}\begin{bmatrix} X^T + X_m \\ Y^T + Y_m \\ Z^T + Z_m \\ K^T + K_m \\ M^T + M_m \\ N^T + N_m \\ p + q\,sin\phi\,tan\theta + r\,cos\phi\,tan\theta \\ q\,cos\phi - r\,sin\phi \\ (q\,sin\phi + r\,cos\phi)\,sec\theta \\ 0_{17\times 1}\end{bmatrix} \tag{۲۸}$$

تبدیل نمود، که مبنای اصلی طراحی رویتگر غیرخطی به کار گرفته شده در این پژوهش می‌باشد. در رابطه (۲۸)، $M_{Inertia}$ بیانگر ماتریس اینرسی، حالت اضافی β بیانگر ضرایب هیدرودینامیکیِ (میرایی خطی) مجهول سیستم و عناصر X_m،Y_m،Z_m،K_m،M_m،N_m نشان دهنده مولفه‌های نیروها و گشتاورهای اینرسیایی (داخلی)[1] می‌باشند که در ادامه معرفی شده است [۷، ۳۴].

$$M_{Inertia} = \begin{bmatrix} m-\frac{\rho}{2}L^3 X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & m\,z_G & 0 & \vdots & \\ 0 & m-\frac{\rho}{2}L^3 Y_{\dot{v}} & 0 & -m\,z_G-\frac{\rho}{2}L^4 Y_{\dot{p}} & 0 & -\frac{\rho}{2}L^4 Y_{\dot{r}} & \vdots & \\ 0 & 0 & m-\frac{\rho}{2}L^3 Z_{\dot{w}} & 0 & -\frac{\rho}{2}L^4 Z_{\dot{q}} & 0 & \vdots & \\ 0 & -m\,z_G-\frac{\rho}{2}L^4 K_{\dot{v}} & 0 & I_x-\frac{\rho}{2}L^5 K_{\dot{p}} & -I_{xy} & -I_{xz}-\frac{\rho}{2}L^5 K_{\dot{r}} & \vdots & 0_{6\times 20} \\ m\,z_G & 0 & -\frac{\rho}{2}L^4 M_{\dot{w}} & -I_{xy} & I_y-\frac{\rho}{2}L^5 M_{\dot{q}} & -I_{yz} & \vdots & \\ 0 & -\frac{\rho}{2}L^4 N_{\dot{v}} & 0 & -I_{xz}-\frac{\rho}{2}L^5 N_{\dot{p}} & -I_{yz} & I_z-\frac{\rho}{2}L^5 N_{\dot{r}} & \vdots & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & 0_{20\times 6} & & & \vdots & I_{20\times 20} \end{bmatrix} \tag{۲۹}$$

$$\begin{aligned} X^T = {} & \frac{\rho}{2}L^4\left[X_{pp}\,p^2 + X_{qq}\,q^2 + X_{rr}\,r^2 + X_{pr}\,p\,r\right] \\ & + \frac{\rho}{2}L^3\left[X_{wq}\,w\,q + X_{vp}\,v\,p + X_{vr}\,v\,r + X_{q\delta_s}\,u\,q\,\delta_s + X_{r\delta_r}\,u\,r\,\delta_r\right] \\ & + \frac{\rho}{2}L^2\left[X_{vv}\,v^2 + X_{ww}\,w^2 + X_{v\delta_r}\,u\,v\,\delta_r + X_{w\delta_s}\,u\,w\,\delta_s\right. \\ & \left. + u^2\left(X_{\delta_s\delta_s}\,\delta_s^2 + X_{\delta_r\delta_r}\,u\,r\,\delta_r^2\right)\right] - (W-B)\,sin\theta \\ & + \frac{\rho}{2}L^3\,X_{q\delta_{sn}}\,u\,q\,\delta_s\,\varepsilon(n) + \frac{\rho}{2}L^2\left[X_{\delta_s\delta_{sn}}\,u^2\,\delta_s^2\right]\varepsilon(n) + \frac{\rho}{2}L^2\,u^2\,X_{prop} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y^T = {} & \frac{\rho}{2}L^4\left[Y_{pq}\,p\,q + Y_{qr}\,q\,r\right] + \frac{\rho}{2}L^3\left[Y_{up}\,u\,p + Y_r\,u\,r + Y_{vq}\,v\,q + Y_{wp}\,w\,p + Y_{wr}\,w\,r\right] \\ & + \frac{\rho}{2}L^2\left[Y_v\,u\,v + Y_{vw}\,v\,w + Y_{\delta_r}\,u^2\,\delta_r\right] + (W-B)\,cos\theta\,sin\phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z^T = {} & \frac{\rho}{2}L^4\left[Z_{pp}\,p^2 + Z_{pr}\,p\,r + Z_{rr}\,r^2\right] + \frac{\rho}{2}L^3\left[Z_q\,u\,q + Z_{vp}\,v\,p + Z_{vr}\,v\,r\right] \\ & + \frac{\rho}{2}L^2\left[Z_w\,u\,w + Z_{vv}\,v^2 + Z_{\delta_s}\,u^2\,\delta_s\right] + (W-B)\,cos\theta\,cos\phi \\ & + \frac{\rho}{2}L^3\,Z_{qn}\,u\,q\,\varepsilon(n) + \frac{\rho}{2}L^2\left[Z_{wn}\,u\,w + Z_{\delta_{sn}}\,u^2\,\delta_s\right]\varepsilon(n) \end{aligned}$$

[1] The Components of the Inertial Forces and Moments

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

$$
\begin{aligned}
K^T = {} & \frac{\rho}{2} L^5 \left[K_{qp}\, p\, q + K_{qr}\, q\, r\right] \\
& + \frac{\rho}{2} L^4 \left[K_p\, u\, p + K_r\, u\, r + K_{vq}\, v\, q + K_{wp}\, w\, p + K_{wr}\, w\, r\right] \\
& + \frac{\rho}{2} L^3 \left[K_v\, u\, v + K_{vw}\, v\, w\right] + (y_G\, W - y_B\, B)\, cos\theta\, cos\phi \\
& - (z_G\, W - z_B\, B)\, cos\theta\, sin\phi + \frac{\rho}{2} L^4\, K_{pn}\, u\, p\, \varepsilon(n) + \frac{\rho}{2} L^3\, u^3\, K_{prop}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
M^T = {} & \frac{\rho}{2} L^5 \left[M_{pp}\, p^2 + M_{pr}\, p\, r + M_{rr}\, r^2\right] + \frac{\rho}{2} L^4 \left[M_q\, u\, q + M_{vp}\, v\, p + M_{vr}\, v\, r\right] \\
& + \frac{\rho}{2} L^3 \left[M_w\, u\, w + M_{vv}\, v^2 + M_{\delta_s}\, u^2\, \delta_s\right] + (x_G\, W - x_B\, B)\, cos\theta\, cos\phi \\
& - (z_G\, W - z_B\, B)\, sin\theta + \frac{\rho}{2} L^4\, M_{qn}\, u\, q\, \varepsilon(n) \\
& + \frac{\rho}{2} L^3 \left[M_{wn}\, u\, w + M_{\delta_s n}\, u^2\, \delta_s\right] \varepsilon(n)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
N^T = {} & \frac{\rho}{2} L^5 \left[N_{pq}\, p\, q + N_{qr}\, q\, r\right] \\
& + \frac{\rho}{2} L^4 \left[N_p\, u\, p + N_r\, u\, r + N_{vq}\, v\, q + N_{wp}\, w\, p + N_{wr}\, w\, r\right] \\
& + \frac{\rho}{2} L^3 \left[N_v\, u\, v + N_{vw}\, w + N_{\delta_r}\, u^2\, \delta_r\right] + (x_G\, W - x_B\, B)\, cos\theta\, sin\phi \\
& - (y_G\, W - y_B\, B)\, sin\theta + \frac{\rho}{2} L^3\, u^2\, N_{prop}
\end{aligned}
\tag{۳۰}
$$

$$
\begin{aligned}
X_m &= m[vr - wq + x_G(q^2 + r^2) - y_G(pq) - z_G(pr)] \\
Y_m &= -m[-wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr) + x_G(pq)] \\
Z_m &= m[uq - vp + z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp) + y_G(rq)] \\
K_m &= m[-y_G(-uq + vp) + z_G(-wp + ur)] \\
&\quad -(I_z - I_y)qr + (pq)I_{xz} + (q^2 - r^2)I_{yz} - (pr)I_{xy} \\
M_m &= -m[z_G(-vr + wq) + x_G(-uq + vp)] \\
&\quad -(I_x - I_z)rp + (qr)I_{xy} - (p^2 - r^2)I_{xz} - (qp)I_{yz} \\
N_m &= m[-x_G(-wp + ur) + y_G(-vr + wq)] \\
&\quad -(I_y - I_x)pq + (rp)I_{yz} + (p^2 - q^2)I_{yx} - (rq)I_{xz}
\end{aligned}
\tag{۳۱}
$$

در مدل رویتگر رابطه (۲۸)، بردار متغیرهای حالت تکمیل شده سیستم، متشکل از ۹ حالت اصلی سیستم به همراه ۱۷ ضریب (پارامترهای مجهول) موجود در بردار β، مجموعاً ۲۶ حالت به صورت

$$
x_f^* = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, \beta]^T \tag{۳۲}
$$

در نظر گرفته شده است. به طوری که بردار β، شامل ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی تحت بررسی (ضرایب میرایی خطی)، به صورت

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

$$\beta = \left[M_q, M_{\delta s}, M_w, N_r, N_{\delta r}, N_v, N_p, Z_{\delta s}, Z_q, Z_w, Y_{\delta r}, Y_r, Y_v, Y_p, K_p, K_r, K_v\right] \quad (۳۳)$$

می‌باشد. این ۱۷ ضریب هیدرودینامیکیِ تحت بررسی، در واقع از ۵ حرکت مختلف AUV حاصل شده اند که بیشترین تأثیر را در قابلیت مانورپذیری AUV ایجاد می‌کنند [۳۵، ۳۶]، از این رو مسأله شناسایی این عناصر نقش بسیار مهمی در مدلسازی کل سیستم AUV ایفاء می‌کنند. شایان ذکر است که با توجه به انتخاب شناور سرعت پایین در این مقاله، سایر ضرایب هیدرودینامیکی در روند شناسایی سیستم نسبت به ضرایب هیدرودینامیکی انتخاب شده میرایی خطی شناور، از اولویت برخوردار نیستند. از این رو در واقع در این مقاله با توجه به نوع شناور زیرسطحی انتخابی و همچنین سرعت حرکت آن، به شناسایی همزمان و برخط ضرایب هیدرودینامیکی میرایی خطی AUV در ۵ مود حرکتی مختلف به عنوان یک دیدگاه نو پرداخته می‌شود. معرفی هریک از این ۱۷ ضریب انتخابی به همراه یکا و نوع حرکت ایجاد شده هر یک از آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

بردار خروجی سیستم نیز شامل داده‌های سرعت و موقعیت خطی و زاویه ای به صورت ذیل است.

$$y_f = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi]^T \quad (۳۴)$$

بردار ورودی‌های کنترل مدل شش درجه آزادی شناور زیرسطحی که به منظور تغییر حالت AUV استفاده می‌شود طبق رابطه (۳۵) دارای۶ متغیر مستقل است که با توجه به موقعیت اِعمال هر یک از این ورودی‌ها مطابق شکل ۱، به صورت

$$u_f = \left[\delta_r, \delta_s, \delta_b, \delta_{bp}, \delta_{bs}, n\right]^T \quad (۳۵)$$

تعریف می‌شوند. ۵ درایه اول از بردار ورودی (۳۵)، زاویه صفحات و بالک‌های جهت دهنده به حرکت شناور زیرسطحی هستند و n مقدار سرعت چرخش شافت سیستم پیشرانش (پروانه اصلی شناور زیرسطحی) است که با استفاده از نیروی تحریک یک موتور کنترل می‌شود [۳۷].

سیستم تحریک بالک‌ها می‌تواند به صورت یک مدل ساده مرتبه اول و با لحاظ نمودن نرخ اشباع حرکت بالک‌ها در نظر گرفته شود. بدین منظور می‌توان از دو سناریو حرکتی مهم در این زمینه به صورت سری‌های زمانی متفاوتی از زاویه بالک‌ها با دامنه متغیر یا ثابت به صورت‌های زیگزاگ و پله ای به عنوان ورودی سیستم برای ایجاد مانورهای متفاوتی از حرکت زیرسطحی به مدل اعمال نمود. بنابراین در این مقاله، برای ایجاد دقت و صحت فرآیند تخمین، مانور پیشنهادی از ترکیب دو حرکت سمت و عمق رو به پایین استفاده شده است، که باعث ایجاد مانور معروف و پرکاربرد (مسیر) حلزونی شکل یا مارپیچی برای شناور زیرسطحی می‌شود. این مانور حلزونی شکل انتخابی، یکی از مانورهایی است که باعث تحریک حداکثری مدهای حرکتی AUV و در نتیجه سبب شناسایی مدل سیستم و یافتن ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با آن‌ها می‌شود.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

جدول ۲ : ضرایب هیدرودینامیکی مهم تحت بررسی مدل غیر خطی AUV [۷، ۳۵، ۳۶، ۳۸]

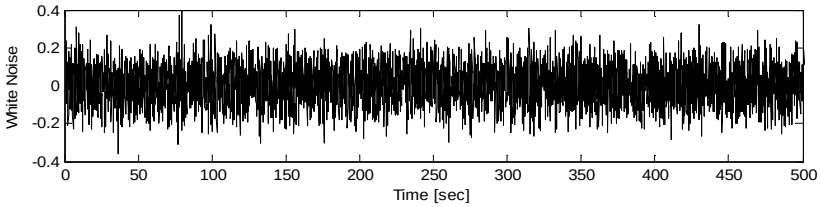
ردیف	ضرایب هیدرودینامیکی	توضیح	یکا	نوع حرکت
۱	M_q	ضریب مانوردهی[1] گشتاورِ M جرم افزوده عرضی[2] و لیفت بالک‌های کنترلی[3]	kg * m / rad	ضرایب حرکت Pitch
۲	$M_{\delta s}$	ضریب مانوردهی گشتاورِ M لیفت بالک‌های کنترلی	kg / rad	
۳	M_w	ضریب مانوردهی گشتاورِ M مانک[4] و بالک‌های کنترلی و بدنه	kg	
۴	N_r	ضریب مانوردهی گشتاورِ N لیفت بالک‌های کنترلی و جرم افزوده عرضی	kg * m / rad	ضرایب حرکت Yaw
۵	$N_{\delta r}$	ضریب مانوردهی گشتاورِ N لیفت بالک‌های کنترلی	kg / rad	
۶	N_v	ضریب مانوردهی گشتاورِ N مانک و لیفت بالک‌های کنترلی و بدنه	kg	
۷	N_p	ضریب مانوردهی گشتاورِ N جرم افزوده عرضی	kg * m / rad	
۸	$Z_{\delta s}$	ضریب مانوردهی نیروی Z لیفت بالک‌های کنترلی	kg / (m * rad)	ضرایب حرکت Heave
۹	Z_q	ضریب مانوردهی نیروی Z بالک‌های کنترلی و جرم افزوده عرضی	kg / rad	
۱۰	Z_w	ضریب مانوردهی نیروی Z لیفت بالک‌های کنترلی و بدنه	kg / m	
۱۱	$Y_{\delta r}$	ضریب مانوردهی نیروی Y لیفت بالک‌های کنترلی	kg / (m * rad)	ضرایب حرکت Sway
۱۲	Y_r	ضریب مانوردهی نیروی Y لیفت بالک‌های کنترلی و جرم افزوده عرضی	kg / rad	
۱۳	Y_v	ضریب مانوردهی نیروی Y لیفت بالک‌های کنترلی و بدنه	kg / m	
۱۴	Y_p	ضریب مانوردهی نیروی Y جرم افزوده عرضی	kg / rad	
۱۵	K_p	ضریب مانوردهی گشتاورِ K جرم افزوده عرضی	kg * m / rad	ضرایب حرکت Roll
۱۶	K_r	ضریب مانوردهی گشتاورِ K جرم افزوده عرضی	kg * m / rad	
۱۷	K_v	ضریب مانوردهی گشتاورِ K جرم افزوده عرضی	kg	

در این پژوهش برای شبیه سازی این مانور معروف از ورودی‌های بالک ۰.۱۷۵ رادیان بر ثانیه (۱۰ درجه)، برای هر دو بالک‌های سکان (δ_r) و صفحه‌های کنترلی پاشنه (δ_s) استفاده شده است که به صورت اعمال یک سری زمانی با دامنه ثابت به صورت پله ای انتخاب شده است. همچنین در این مقاله، از آنجایی که سرعت حرکت AUV مورد نظر، به صورت ثابت و پایین در نظر گرفته شده است (مسأله شناسایی شناور سرعت پایین برای کاربردهای علمی تحقیقاتی، اکتشافات و غیره)، در روند شناسایی ضرایب هیدرودینامیکی AUV، سرعت حرکت شافت سیستم پیشرانش نیز به صورت ثابت و برابر با $n = ۵۰۰\ rpm$ انتخاب شده است [۷]. بایستی به این نکته توجه داشت که در صورت انتخاب گزینه ای دیگر برای میزان سرعت حرکت شناور در روند شناسایی ضرایب هیدرودینامیکی AUV، براساس خواص دینامیکی و فیزیکی سیستم مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی نیز تغییر خواهند نمود

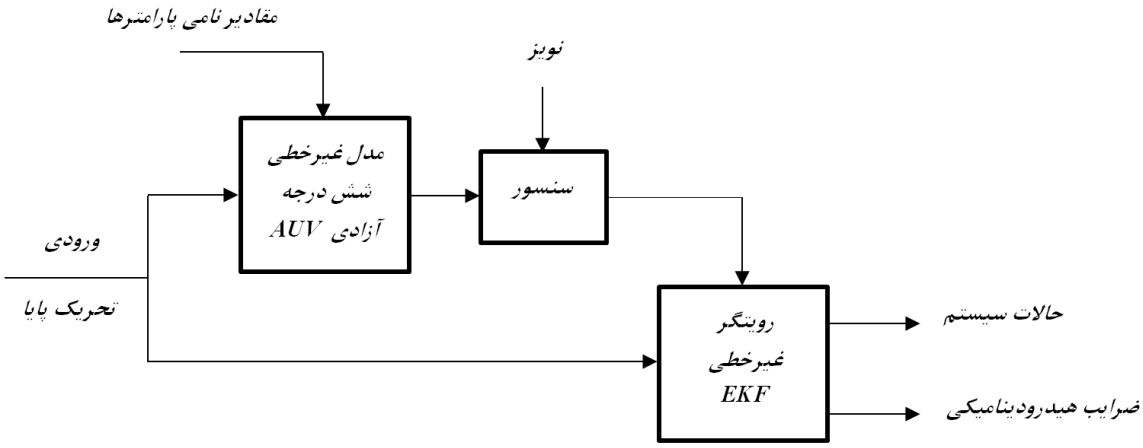
[1] Maneuvering Coefficient
[2] Added Mass Cross-Term
[3] Fin Lift
[4] Munk

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

[۷، ۳۴]، که این روند، افزایش حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی شناور، پیچیدگی روند تخمین پارامترها و همچنین لزوم انتخاب مانور مناسب را به دنبال دارد. همچنین گام زمانی شبیه سازی برابر با T=0.01 انتخاب شده است. از آنجایی که در کاربردهای عملی معمولاً نویزهای تاثیر گذار بر روی سیستم را از نوع نویز سفید در نظر می‌گیرند [۲۷-۲۹]، بنابراین در شبیه سازی‌های این بخش نیز، مسأله تخمین حالات سیستم AUV توسط EKF در حضور نویز سفید با توان ۰.۱ به عنوان نویز اندازه گیری (خروجی) بررسی می‌گردد. به طور معمول میزان توان نویز انتخابیِ اعمال شده در بخش شبیه سازی‌ها، بایستی متناسب با میزان دامنه حالت-های اندازه گیری شده سیستم باشد که در این مقاله بر اساس شبیه سازی‌های صورت گرفته، منطقی است که یک نویز با توان کمتر از یک انتخاب شود. از این رو متناظر با آن در نرم افزار MATLAB از یک بلوک نویز سفید با میانگین صفر و توزیع نرمال با توان (قدرت) ۰.۱ استفاده شده است. شکل ۲ نمایی از نویز قرار گرفته بر روی سنسورها که به بردار خروجی سیستم اضافه گردیده است را نشان می‌دهد. در نهایت، بلوک دیاگرام کلی الگوریتم تخمین به وسیله رویتگر (شناساگر) غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته به منظور شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II و همچنین تخمین برخط ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی آن در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲ : نویز (سفید) اندازه گیری



شکل ۳ : ساختار پیشنهادی سیستم تخمین توسط رویتگر غیرخطی EKF برای شناور NPS AUV II

۵- نتایج شبیه سازی

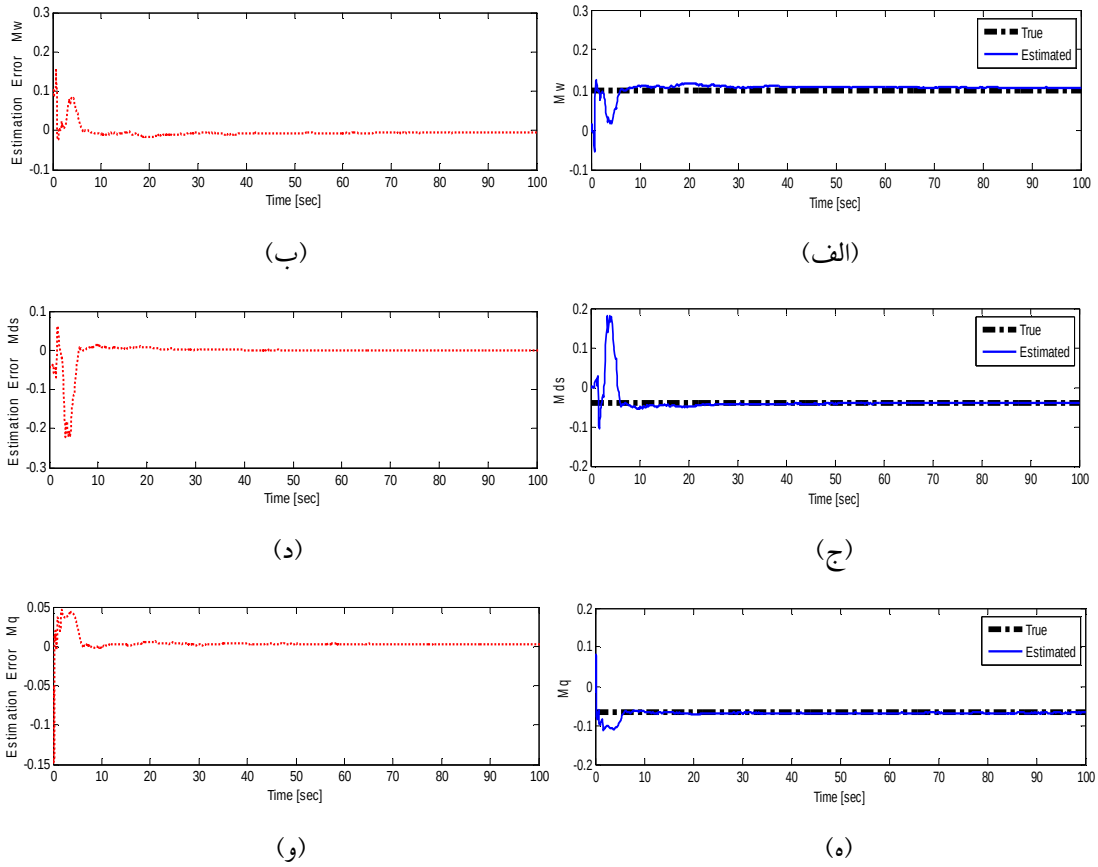
در این بخش، با در نظر گرفتن ساختار کلی سیستم تخمین پیشنهادی شکل ۳، و با اعمال شناساگر فیلتر کالمن توسعه یافته پیشنهادی از بخش ۴، به مدل غیر خطی شش درجه آزادی شناور زیرسطحی NPS AUV II [۷، ۳۴]، مسأله ارزیابی رفتار این شناساگر مطرح و نتایج حاصل از شبیه سازی‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبیه سازی‌های انجام گرفته، موقعیت‌ها و جهات گردش اولیه به کار گرفته شده در مدل غیرخطی واقعی و تخمین AUV برابر با $[x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0] = [11,11,11,1,1,1]$ و

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

ورودی‌های اولیه به صورت $[u_0, p_0, q_0, r_0] = [1,1,1,1]$ و همچنین $[w_0, v_0] = [1,1]$ فرض شده اند. شرایط اولیه مربوط به ماتریس کواریانس خطای تخمین و بردار ضرایب هیدرودینامیکی مورد نظر نیز بترتیب به صورت $P(0) = P_0 = diag(0.1) \in \mathcal{R}^{26\times26}$ و $\beta(0) = [0.0001] \in \mathcal{R}^{1\times17}$ انتخاب گردید. ماتریس‌های کواریانس نویز خروجی و حالت نیز بترتیب به فرم $R = diag(0.001) \in \mathcal{R}^{9\times9}$ و $Q = diag(Q_1, Q_2) \in \mathcal{R}^{26\times26}$ به طوری که $Q_1 = diag(0.0001) \in \mathcal{R}^{9\times9}$ و $Q_2 = diag(0.001) \in \mathcal{R}^{17\times17}$ در نظر گرفته شده است. با انجام شبیه‌سازی‌ها بر اساس ساختار شکل ۳، در نهایت خروجی‌های سیستم تخمین زده شده AUV (شامل عناصر بردار β و متغیرهای حالت سیستم) در مقایسه با سیستم حقیقی [۷، ۳۴]، به صورت شکل‌های ۴ تا ۱۰ به دست می‌آیند.

بر اساس نتایج شکل‌های ۴ تا ۸، و همچنین مقایسه بین ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به ۵ دسته حرکتی مختلف از مدل شناسایی شده و مقادیر ضرایب واقعی آن‌ها برگرفته از مراجع [۷، ۳۴]، مشاهده می‌گردد که شناساگر EKF پیشنهادی با عملکرد مطلوبی سبب همگرایی نسبتاً دقیق ضرایب تخمین زده شده به صورت قابل قبولی به سمت مقادیر واقعی شده است. علاوه بر این، خطای تخمین هر یک از این ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی در شکل‌های ۴ تا ۸، در مدت زمان محدودی به سمت صفر همگرا می‌گردد، که این حاکی از صحت عملکرد الگوریتم تخمین پیشنهادی می‌باشد. نتایج حاصل از تخمین ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی مورد نظر بر اساس مدهای حرکتی شناور به صورت زیر به ۵ دسته تفکیک شده اند.

۱) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با مد حرکتی Pitch :

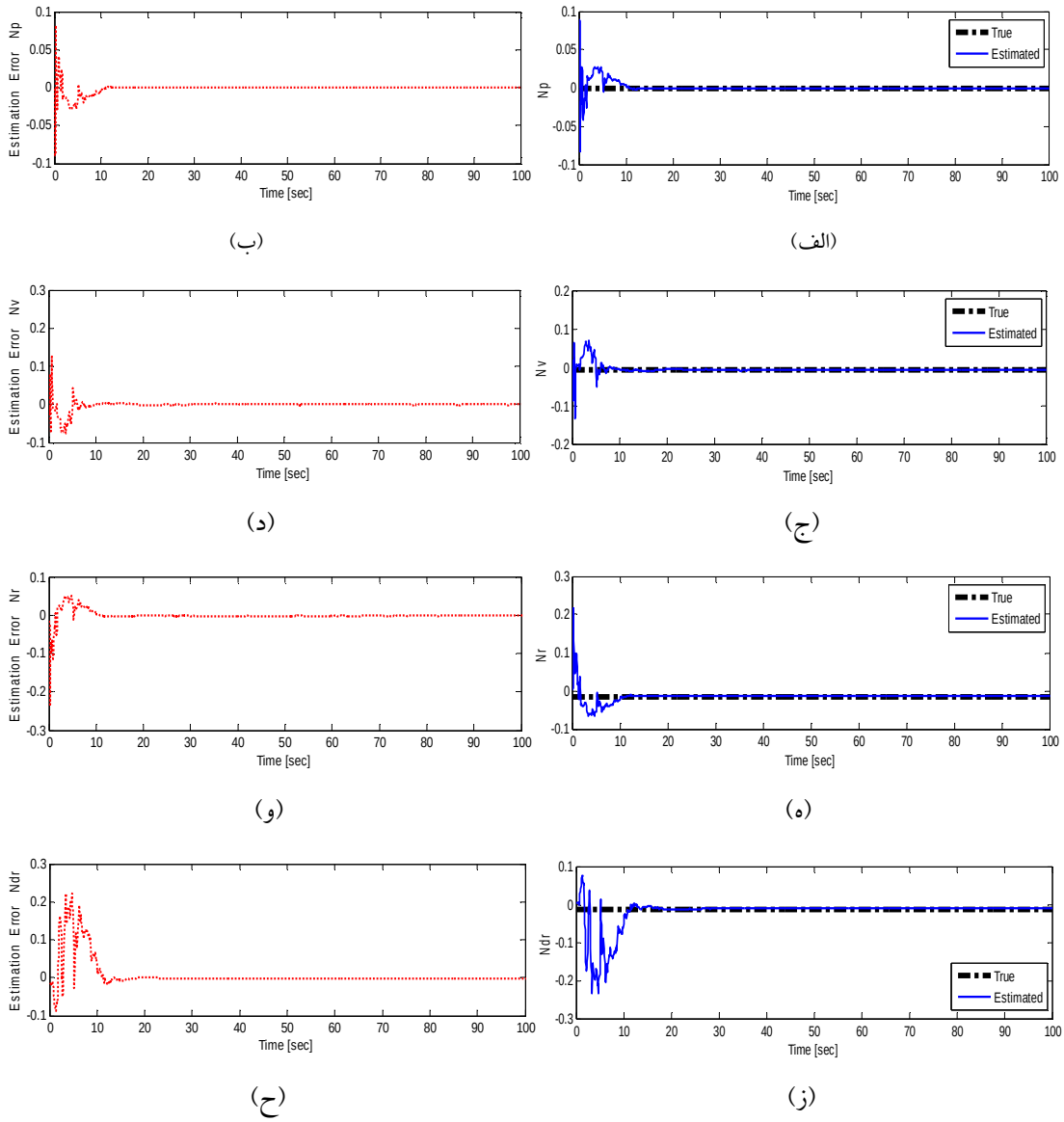


شکل ۴ : تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مد حرکتی Pitch از مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،

(الف) M_w ، (ب) خطای تخمین M_w ، (ج) $M_{\delta s}$ ، (د) خطای تخمین $M_{\delta s}$ ، (ه) M_q ، (و) خطای تخمین M_q

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۲) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با مد حرکتی Yaw:



شکل ۵: تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مد حرکتی Yaw از مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،

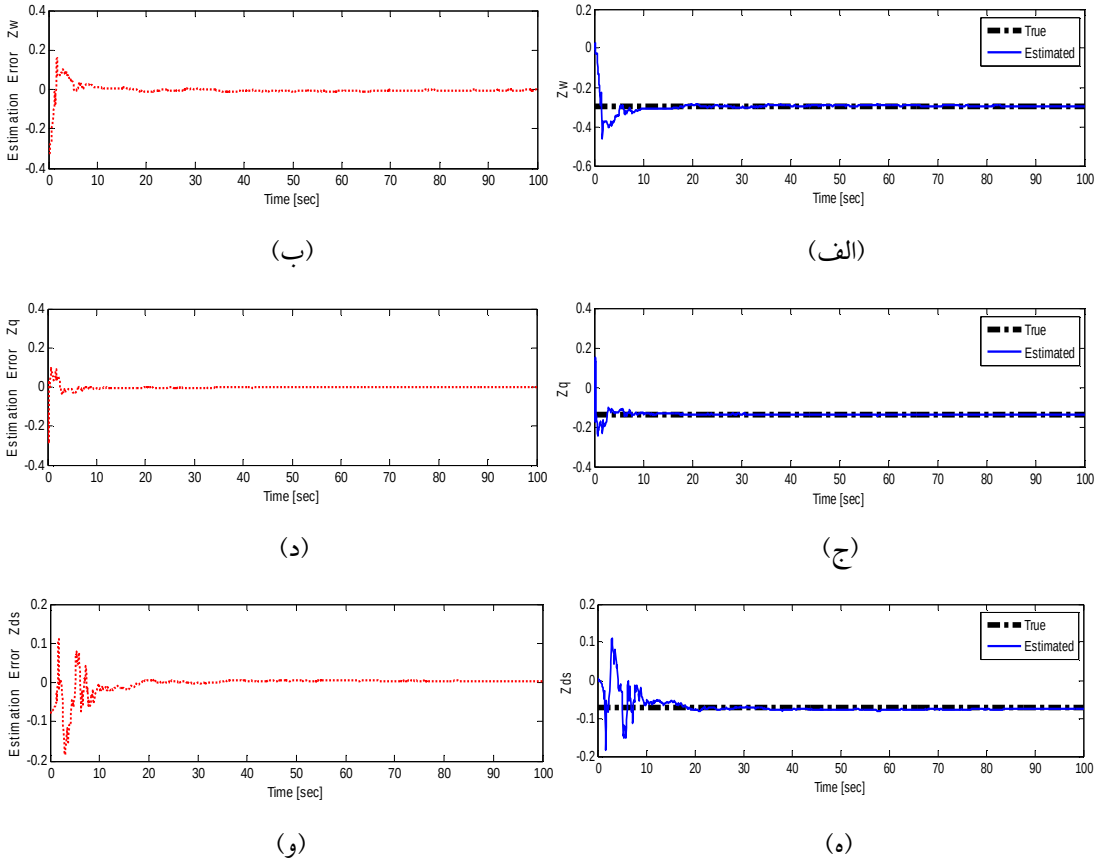
(الف) N_p، (ب) خطای تخمین N_p، (ج) N_v، (د) خطای تخمین N_v،

(ه) N_r، (و) خطای تخمین N_r، (ز) $N_{\delta r}$، (ح) خطای تخمین $N_{\delta r}$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۳) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با مد حرکتی Heave:

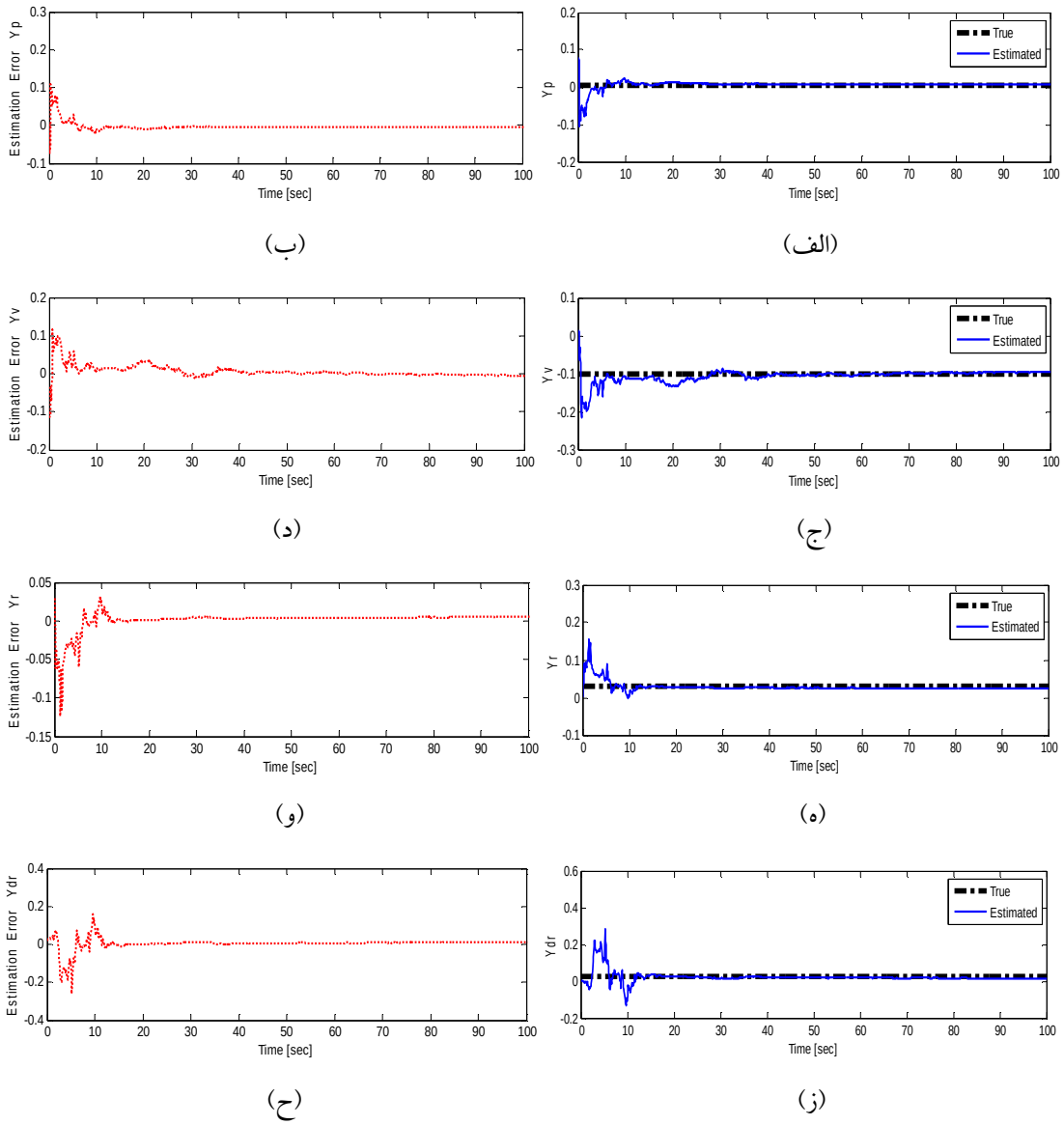


شکل ۶: تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مد حرکتی Heave از مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،

(الف) Z_w، (ب) خطای تخمین Z_w، (ج) Z_q، (د) خطای تخمین Z_q، (ه) $Z_{\delta s}$، (و) خطای تخمین $Z_{\delta s}$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۴) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با مد حرکتی Sway:



شکل ۷: تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مد حرکتی Sway از مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،

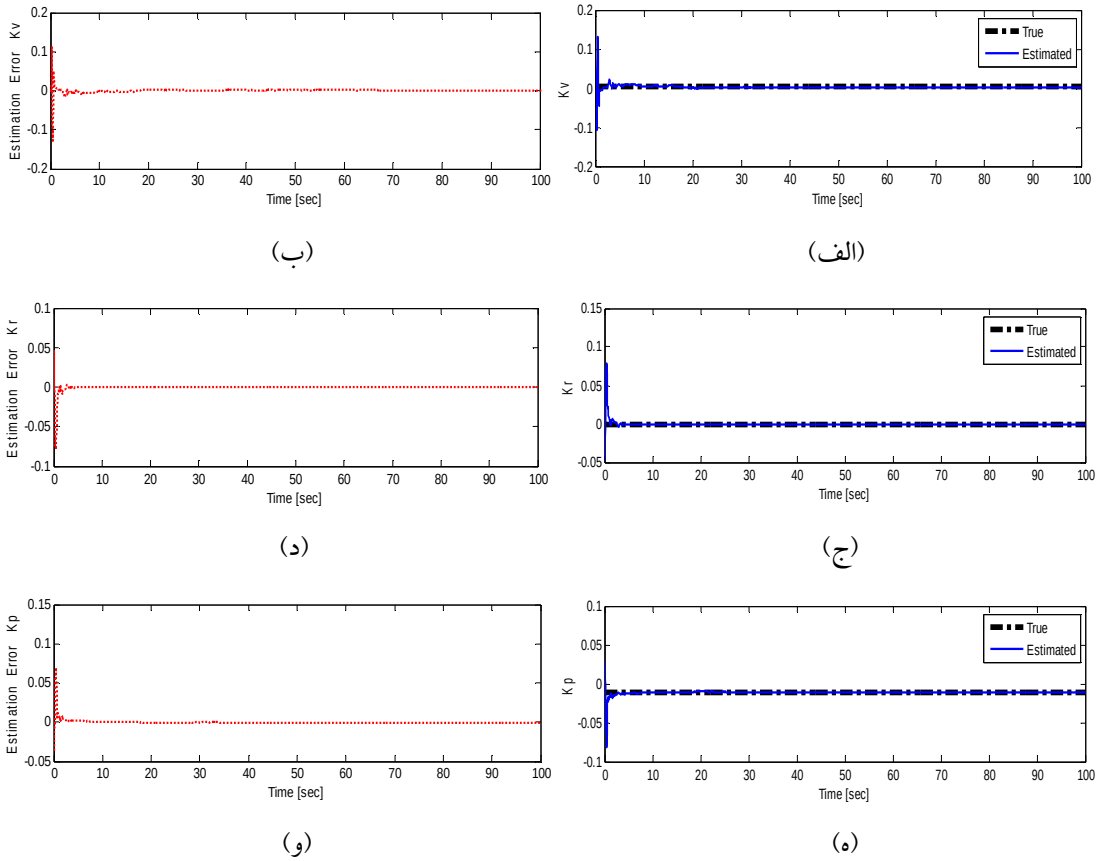
(الف) Y_p ، (ب) خطای تخمین Y_p ، (ج) Y_v ، (د) خطای تخمین Y_v ،

(ه) Y_r ، (و) خطای تخمین Y_r ، (ز) $Y_{\delta r}$ ، (ح) خطای تخمین $Y_{\delta r}$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۵) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با مد حرکتی Roll:



شکل ۸: تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مد حرکتی Roll از مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،

(الف) K_v ، (ب) خطای تخمین K_v ، (ج) K_r ، (د) خطای تخمین K_r ، (ه) K_p ، (و) خطای تخمین K_p

در نهایت، در جدول ۳ مقادیر نهایی شناسایی شده ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی مدل غیر خطی AUV توسط رویتگر غیرخطی EKF با هدفِ شناسایی مدل شناور به صورت عددی ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر نهایی شناسایی شده ۱۷ ضریب هیدرودینامیکی مدل غیر خطی AUV

ردیف	پارامتر ها	مقادیر شناسایی شده	ردیف	پارامتر ها	مقادیر شناسایی شده
۱	Y_p	۰/۰۰۷۲	۱۰	Z_q	−۰/۱۳۷۳
۲	Y_v	−۰/۰۹۷۰	۱۱	$Z_{\delta s}$	−۰/۰۷۲۷
۳	Y_r	۰/۰۲۴۷	۱۲	K_v	۰/۰۰۳۸
۴	$Y_{\delta r}$	۰/۰۱۷۵	۱۳	K_r	$-۵/۷۸۹۱ \times ۱۰^{-۴}$
۵	N_p	$-۶/۹۶۳۶ \times ۱۰^{-۴}$	۱۴	K_p	−۰/۰۱۰۹
۶	N_v	−۰/۰۰۶۲	۱۵	M_w	۰/۱۰۳۰
۷	N_r	−۰/۰۱۵۲	۱۶	$M_{\delta s}$	−۰/۰۴۰۳
۸	$N_{\delta r}$	−۰/۰۱۳۲	۱۷	M_q	−۰/۰۶۷۵
۹	Z_w	−۰/۳۰۰۷			

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

اکنون با در دست داشتن مقادیر واقعی ضرایب هیدرودینامیکی [۷، ۳۴]، ارزیابی روش (شناسایی) به کار گرفته شده قابل انجام است. بدین منظور ضرایب هیدرودینامیکی شناسایی شده توسط فیلتر کالمن توسعه یافته برای تولید مدل شناور زیرسطحی تحت ورودی زوایای بالک ذکر شده (در همین بخش)، به کار گرفته شده اند. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمایی از ۱۲ حالت (خروجی) سیستم مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II، از حالت‌های مدل واقعی و تخمین زده شده در دو دسته مجزا در حالت مقایسه‌ای ارائه شده است.

در شکل ۹، کارایی مدل (واقعی و تخمین زده شده) در تولید مسیر حرکت شبیه‌سازی شده (موقعیت و جهت‌گیری شناور زیرسطحی در هر لحظه) نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۰، مقدار سرعت تخمین زده شده با استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی شناسایی شده، نسبت به سرعت واقعی (سرعت شبیه‌سازی شده و سرعت اندازه‌گیری شده) ارائه شده است که بر اساس همگرایی سیگنال خطای تخمین به سمت صفر برای هر یک از آن‌ها و همچنین کوچک بودن کران این سیگنال خطا، تطابق مطلوبی را بین این دو (مدل واقعی و مدل تخمین) نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱ نیز، می‌توان روند همگرایی کمینه سازی ماتریس کواریانس خطای حالت ماندگار تخمین ($P(t)$) به سمت صفر را مشاهده نمود. نتایج این شکل حاکی از برآورده شدن شرط $P(t) = \lim_{t\to\infty}(\{e(t)\, e(t)^T\}) = 0$ [۲۷-۲۹]، و در نهایت تحقق هدف نهایی شناساگر EKF پیشنهادی در شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II می‌باشد.

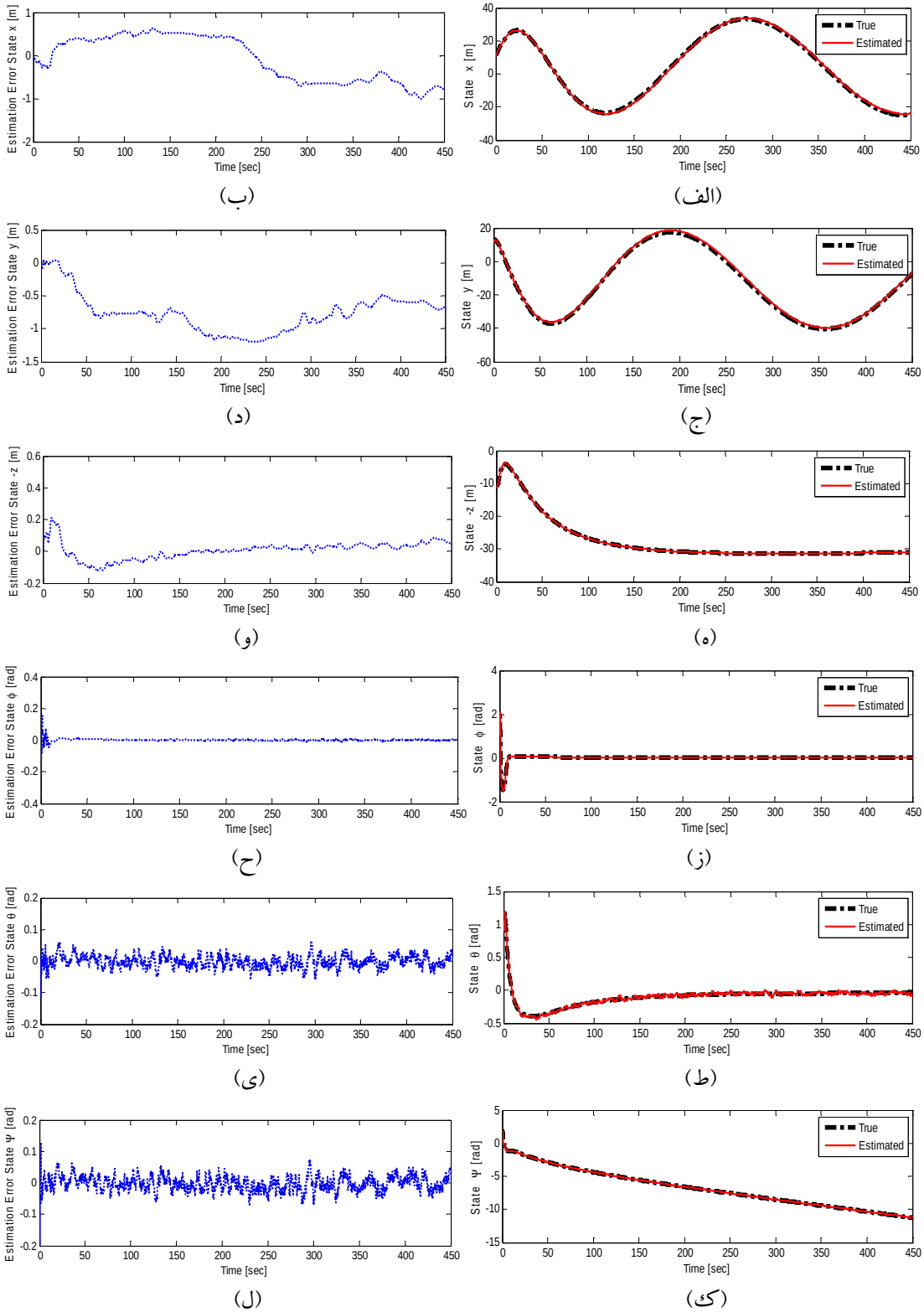
سرانجام در شکل ۱۲ نمایی از مسیر حرکت مانور حلزونی شکل تولید شده توسط سیستم تخمین زده شده و مدل واقعی شش درجه آزادی AUV ارائه شده است، که اختلاف بسیار اندک این دو مسیر تولید شده حاکی از صحت عملکرد الگوریتم شناسایی پیشنهادی در شناسایی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور و تخمین ۱۷ ضریب میرایی خطی موثر در مانور دهی AUV می‌باشد.

در پایان بایستی بیان نمود که از نتایج استخراج شده (مدل غیرخطی شناسایی شده به همراه ضرایب هیدرودینامیکی تخمین زده شده) توسط روش شناسایی پیشنهادی در این مقاله، به راحتی می‌توان در طراحی سیستم‌های هدایت و کنترل شناور زیرسطحی NPS AUV II استفاده نمود.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

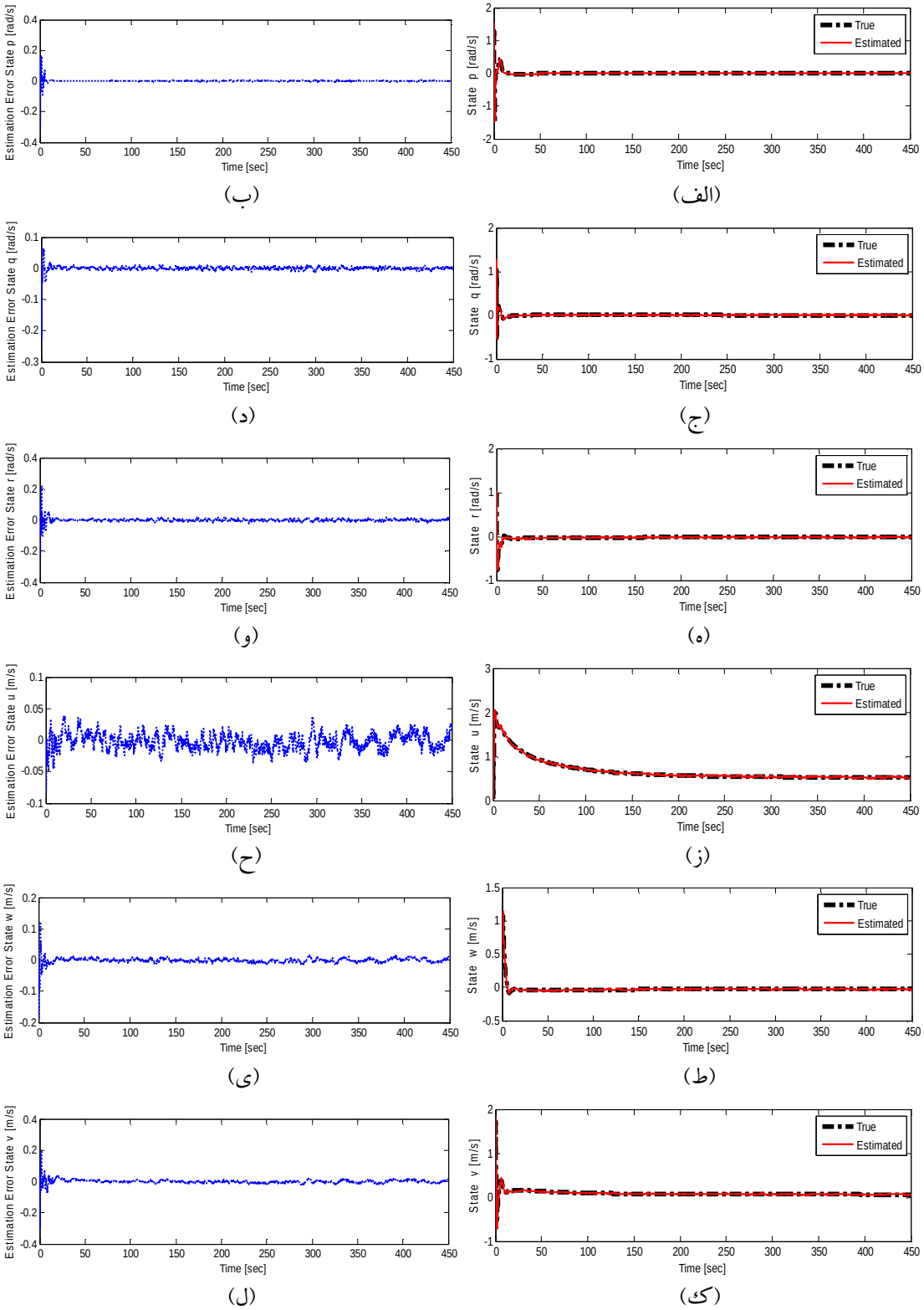
۱) کارایی مدل در تولید مسیر حرکت شبیه سازی شده (موقعیت و جهت گیری شناور زیرسطحی در هر لحظه)



شکل ۹: نمایی از تغییر موقعیت و جهت گیری سیستم تخمین زده شده و واقعی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،
(الف) x ، (ب) خطای تخمین x ، (ج) y ، (د) خطای تخمین y ، (ه) $-z$ ، (و) خطای تخمین $-z$ ،
(ز) φ ، (ح) خطای تخمین φ ، (ط) θ ، (ی) خطای تخمین θ ، (ک) ψ ، (ل) خطای تخمین ψ

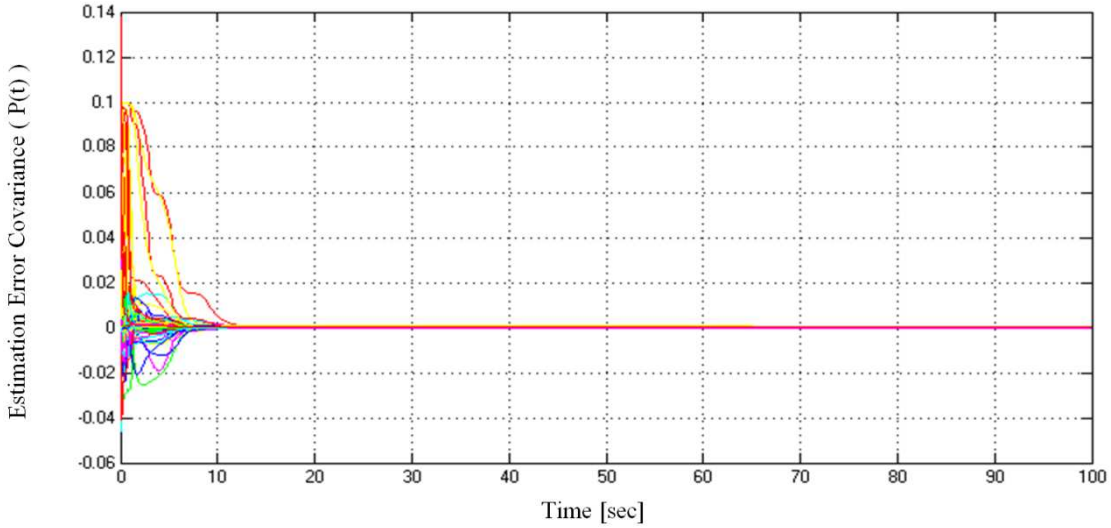
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

۲) مقدار سرعت تخمین زده شده با استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی شناسایی شده نسبت به سرعت واقعی (سرعت شبیه سازی شده و سرعت اندازه گیری شده)

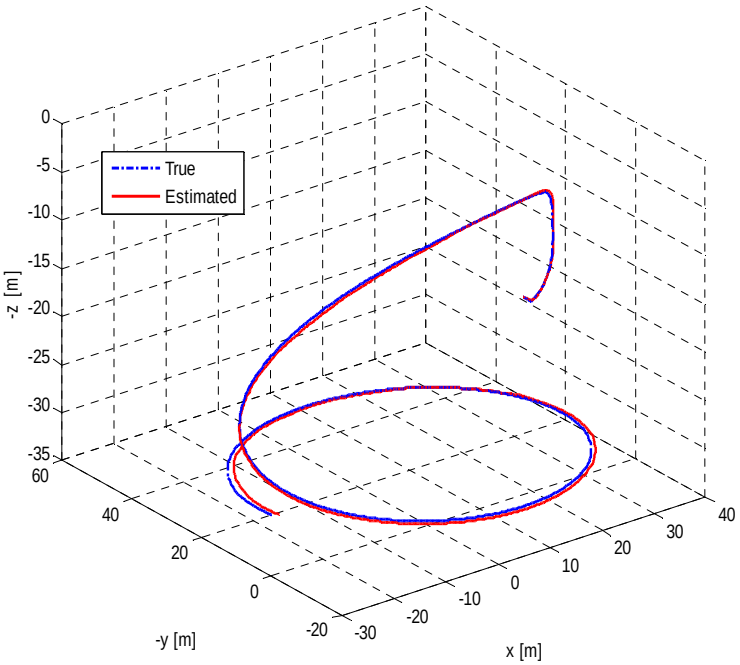


شکل ۱۰ : نمایی از تغییر سرعت‌های سیستم تخمین زده شده و واقعی مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور NPS AUV II،
(الف) p ، (ب) خطای تخمین p ، (ج) q ، (د) خطای تخمین q ، (ه) r ، (و) خطای تخمین r ،
(ز) u ، (ح) خطای تخمین u ، (ط) w ، (ی) خطای تخمین w ، (ک) v ، (ل) خطای تخمین v

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]



شکل ۱۱ : روند کمینه سازی ماتریس کواریانس خطای حالت ماندگار تخمین ($P(t)$) توسط شناساگر EKF پیشنهادی



شکل ۱۲ : مقایسه ای بین عملکرد مدل شناسایی شده و واقعی در تولید مسیر حرکت AUV در صفحه سه بعدی x ، y ، $-z$

۵-۱- جمع بندی نتایج شبیه سازی

براساس روند پیشنهادی برای فرمول بندی رویتگر غیرخطی EKF، به عنوان یک شناساگر غیرخطی، و بر اساس نتایج شبیه سازی-های حاصل شده در بخش ۵، می‌توان به عنوان جمع بندی موضوع تحت بررسی به چندین نمونه از مزایای بدست آمده در این مقاله در مقایسه با فعالیت‌های انجام شده برای شناورهای زیرسطحی توسط رویتگر غیرخطی EKF در مراجع [۱۹-۲۳]، به صورت زیر اشاره نمود :

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

(الف) شناسایی همزمان و برخط کلیه ضرایب هیدرودینامیکی میرایی خطی برای تعیین دینامیک شناور زیرسطحی AUV با انتخاب یک مانور مناسب با توانایی تحریک یکجا و همزمان برای ۵ مود حرکتی مختلف، بدون اعمال دو محدودیت تفکیک مود حرکتی شناور در جهتی خاص و در نظر گرفتن تعداد اندک پارامترهای نامعلوم که در روشهای قبلی اعمال شده است [۱۹-۲۳].

(ب) عدم اعمال فرضیات محدود کننده در روش پیشنهادی مانند تفکیک معادلات غیرخطی شش درجه آزادی سیستم AUV به زیرسیستم‌های حرکتی مختلف بدون در نظر گرفتن اثر کوپلینگ و ترم‌های غیرخطی بین معادلات کل سیستم، و یا خطی سازی معادلات سیستم و تفکیک مدل به زیرسیستم‌های خطی جداگانه، در مقایسه با مراجع [۱۹-۲۱، ۲۳].

(ج) ارائه نتایج شبیه سازی مربوط به روند کمینه سازی ماتریس کواریانس خطایی تخمین و همگرایی خطایی تخمین هر یک از پارامترها به سمت صفر، در مقایسه با مراجع [۱۹-۲۳]. قابل ذکر است که بدلیل انتخاب مناسب ساختار و مقدار درایه‌های ماتریس-های کواریانس نویز، سرعت و دقت تخمین پارامترها قابل قبول و رضایت بخش می‌باشد.

(د) انتخاب مناسب سیگنال ورودی برای شناور جهت تحریک همزمان تمامی ۵ مود حرکتی سیستم به منظور شناسایی عناصر نامعلوم دینامیک AUV در مودهای انتخابی، و ایجاد یک مانور تحقق پذیر به منظور پیاده سازی عملی روش پیشنهادی در مقایسه با مراجع [۱۹-۲۳].

٦- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل غیرخطی شش درجه آزادی شناور زیرسطحی خودگردان NPS AUV II، توسط رویتگر غیرخطی فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) شناسایی شد. در واقع ضرایب هیدرودینامیکی AUV به عنوان متغیرهای حالت مکمل سیستم در نظر گرفته شد، و همانند سایر متغیرهای حالت سیستم مثل جابجایی و سرعت شناور، در حین انجام مانور انتخابی، توسط EKF پیشنهادی تخمین زده شد. در روند طراحی شناساگر پیشنهادی با در نظر گرفتن مقادیر مناسب برای ماتریس‌های کواریانس نویز، همگرایی نتایج تخمینِ مدل غیرخطی به مقادیر واقعی سیستم و همچنین همگرایی ماتریس کواریانس خطای حالت ماندگار تخمین به سمت صفر با سرعت بالا و دقت قابل قبولی انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده از شبیه سازی‌ها و مقایسه عملکرد مدل شناسایی شده و مدل واقعی در تولید مانور حلزونی شکل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند مدل دینامیکی غیرخطی سیستم را با دقت خوبی شناسایی نماید. علاوه براین روش شناسایی پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب و کم هزینه به منظور شناسایی مدل و تعیین ضرایب هیدرودینامیکی شناور بر اساس اطلاعات مستخرج از آزمایشات عملی به کار گرفته شود، و همچنین محدودیت‌های دو روش عملی CFD و PMM را بر طرف نماید. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش طراحی شده قابلیت اعمال به دسته وسیعی از شناورهای دریایی و زیردریایی را دارد.

مراجع

[۱] سیف، محمد سعید؛ صادق زاده پراپری، بهنام؛ *اصول طراحی زیرسطحی های بدون سرنشین*، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲.

[2] H. R. Koofigar, "Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties", SICE Annual Conference, pp. 192-196, 2012

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

[3] N. Burlutskiy, Y. Touahmi, B. H. Lee, "Power efficient formation configuration for centralized leader–follower AUVs control", Journal of marine science and technology, Vol. 17, No. 3, pp. 315-329, 2012.

[4] N. Fischer, D. Hughes, P. Walters, E. M. Schwartz, W. E. Dixon, "Nonlinear rise-based control of an autonomous underwater vehicle", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 30, No. 4, pp. 845-852, 2014.

[5] O. Yildiz, R. B. Gokalp, A. E. Yilmaz, "A review on motion control of the underwater vehicles", Electrical and Electronics Engineering, pp. 337-341, 2009.

[6] J. Yu, A. Zhang, X. Wan, "Development in identification of underwater vehicles", Center for Underwater Vehicles Research, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2003.

[7] T. I. Fossen, Guidance and control of ocean Vehicles. John Wiley and Sons Ltd, first edition, 1994.

[۸] کراری، مهدی؛ شناسایی سیستم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۸.

[9] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 6, pp. 1475–1483, 1990.

[10] J. Pereira, A. Duncan, "System identification of underwater vehicles", Proceedings of the International Symposium on Underwater Technology, pp. 419-424, 2000.

[11] J. Y. Bae, K. H. Sohn, "A study on maneuvring motion characteristics of Manta-type unmanned undersea vehicle", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 2, pp. 114-126, 2009.

[12] H. Zhang, Y. R. Xu, H. P. Cai, "Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients." Journal of Marine Science and Application, Vol. 9, No. 2, pp. 149-155, 2010.

[13] Z. Jinxin, S. Yumin, J. Lei, C.Jian, "Hydrodynamic performance calculation and motion simulation of an AUV with appendages", Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, Vol. 2, pp. 657-660, 2011.

[14] K. Kim, J. Kim, H. S. Choi, K. Y. Lee, W. Seong, "Estimation of hydrodynamic coefficients of a test-bed AUV-SNUUV I by motion test", Oceans MTS/IEEE, Vol.1, pp. 186-190, 2002.

[15] J. P. J. Avila, D. C. Donha, J. C. Adamowski, "Experimental model identification of open-frame underwater vehicles", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 60, pp. 81-94, 2013.

[16] D. A. Smallwood, L. L. Whitcomb, "Adaptive identification of dynamically positioned underwater robotic vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 505-515, 2003.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

[17] O. Hassanein, G. Sreenatha, T. Ray, "Improved fuzzy neural modeling for underwater vehicles", International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology , Vol.71, pp. 1208-1215, 2012.

[18] F. Xu, Z. J. Zou, J. C. Yin, J. Cao, "Identification modeling of underwater vehicles' nonlinear dynamics based on support vector machines", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 67, pp. 68-76, 2013.

[19] A. Alessandri, M. Caccia, G. Indiveri, G. Veruggio, "Application of LS and EKF techniques to the identification of underwater vehicles", IEEE International Conference on Control Applications, Vol. 2, pp. 1084-1088, 1998.

[20] A. Tiano, R. Sutton, A. Lozowicki, and W. Naeem,"Observer kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle", Journal of Control Engineering Practice, Vol. 15, No. 6, pp. 727-739, 2007.

[21] J. C. Cutipa Luque, D. C. Donha, "Auv identification and robust control", 18th IFAC World Congress. Vol. 18, No. 1, 2011.

[22] M. Z. Ernani, M. Bozorg, S. Ebrahimi, "Identification of an autonomous underwater vehicle dynamic using extended kalman filter with ARMA noise model", International Journal of Robotics(Theory and Applications), 2014.

[23] A. R. M. Pinheiro, E. Apolonio De Barros, "Identification of Hydrodynamic Derivatives from AUV 'Pirajuba' Using Extended Kalman Filter", Symposium on Computing and Automation for Offshore Shipbuilding, pp. 11-16, 2013.

[24] A. J. Mitchell, E. W. McGookin, D. J. Murray-Smith, "Implementation of sliding mode observer based reconfiguration in an autonomous underwater vehicle", Journal of Acta Polytechnica ,Vol. 45, No. 4, 2005.

[25] A. Rhif, Z. Kardous, N. B. Braiek, "A high-order sliding mode observer: torpedo guidance application", Journal of Engineering & Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 13-18, 2013.

[26] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, A. Levant, Sliding mode control and observation, Birkhäuser Basel, 2014.

[27] F. L. Lewis, L. Xie, D. Popa, Optimal and robust estimation: With an Introduction to Stochastic Control Theory. CRC Press, Second Edition, 2007.

[28] C. K. Chui, and G. Chen, Kalman filtering with real time applications, Springer, fourth Edition, 2009.

[29] D.Simon, Optimal state estimation kalman hinf and nonlinear approaches, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]

[30] K. Y. Hyeon, and K. P. Rhee, "Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique", International Journal of Ocean Engineering, Vol. 30, No. 18, pp. 2379-2404, 2003.

[31] L. R. Ray, "Nonlinear tire force estimation and road friction identification: Simulation and experiments", Journal of Automatica, Vol. 33, No. 10, pp. 1819-1833, 1997.

[32] T. Berry, T. Sauer, "Adaptive ensemble Kalman filtering of non-linear systems", Journal of Tellus A, Vol. 65, 2013.

[33] M. Karasalo, X. Hu, "An optimization approach to adaptive Kalman filtering", Journal of Automatica, Vol. 47, No. 8, pp. 1785-1793, 2011.

[34] A. J. Healey, D.Lienard, "Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles", IEEE Journal of Oceanic Engineering,Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.

[35] D. Sen, "A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies", Journal of ship Research, Vol. 44, No. 3, pp. 186-196, 2000.

[36] S. Tang, T. Ura, T. Nakatani, B. Thornton, T. Jiang, "Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 373-386, 2009.

[37] B. Geranmehr, S. R. Nekoo, "Nonlinear suboptimal control of fully coupled non affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation." International Journal of Ocean Engineering, Vol. 96, pp. 248-257, 2015.

[38] T. Prestero, Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle, M.Sc. in Ocean Eng. and M.Sc. in Mechanical Eng. Massachusetts Institute of Technology (M.I.T) & the Woods Hole Oceanographic Inst., 2001.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.5.5]