J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 45, 2025. (16-28)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Development of a search and rescue vessel (SAR) dynamic model based on the Extended Kalman filter (EKF) to estimate the accurate state of the vessel maneuver

Fatemeh zolfagharnasab[1], Mohammad Saeed seif[2*]

[1] *PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology*
[2] *Professor, Center of Excellence in Hydrodynamics & Dynamics of Marine Vehicle, Sharif University of Technology*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: *9 Jun 2024*
Last modification: 23 Feb 2025
Accepted: *27 Feb 2025*
Available online: *3 Mar 2025*

Article type:
Research paper

Keywords:
Dynamic model
Extended Kalman filter
Maneuver
System identification
Estimate the situation

ABSTRACT

The accurate estimation and prediction of the trajectories of maneuvering vessels in navigation are important tools to improve maritime safety and security. Therefore, many conventional navigation systems and Vessel Traffic Management & Reporting Services are equipped with Radar facilities for this purpose. However, the accuracy of the predictions of maneuvering trajectories of vessels depends mainly on the goodness of estimation of vessel position, velocity and acceleration. In this article, the information related to two navigation devices named GPS and INS is collected and by giving the data obtained from the system identification and using the equations of the developed Kalman filter algorithm, the path and position of the two zigzag and bypass maneuvers are estimated. to be and finally, after estimating the maneuvering path, the movement of the float is validated with the experimental movement recorded by the navigation devices Among the innovations that can be mentioned in this article is the integration of the control system design based on the dynamic model for a high-speed boat. Because the work on the high-speed float using the system identification method is very limited. The reason for using the developed Kalman filter method is that this method is able to estimate several unknowns in a nonlinear system by only having measured inputs from model testing.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۵، ۱۴۰۴، (۲۸-۱۶)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

توسعه مدل دینامیکی شناور جستجو و نجات(SAR) مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)جهت تخمین وضعیت دقیق مانور شناور

فاطمه ذوالفقارنسب [۱]، محمد سعید سیف [۲]*

[۱] دانشجوی دکتری رشته مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، fzolfagharnasab@yahoo.com

[۲] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

مدل دینامیکی

فیلتر کالمن توسعه یافته

مانور

شناسایی سیستم

تخمین وضعیت

چکیده

برآورد و پیش‌بینی دقیق مسیر کشتی‌های مانور در ناوبری، ابزار مهمی برای بهبود ایمنی و امنیت دریایی است. بنابراین، بسیاری از سیستم‌های ناوبری مرسوم و خدمات مدیریت و گزارش ترافیک کشتی‌ها برای این منظور به امکانات رادار مجهز هستند. با این حال، دقت پیش‌بینی‌های مسیر مانور شناورها عمدتاً به خوبی تخمین کشتی بستگی دارد. در این مقاله اطلاعات مربوط به دو دستگاه ناوبری با عنوان GPS و INS، داده برداری می گردد و با دادن داده های حاصل از شناسایی سیستم و با استفاده از معادلات الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته مسیر و موقعیت سه مانور زیگزاگ، دور زدن و شتاب گیری تخمین زده می شود و در نهایت پس از تخمین مسیر مانور حرکت شناور با حرکت تجربی ثبت شده توسط دستگاههای ناوبری اعتبار سنجی می گردد. از جمله نوآوری هایی که می توان در این مقاله به آن اشاره کرد یکپارچه سازی طراحی سیستم کنترل براساس مدل دینامیکی برای یک شناور تندرو در مقیاس واقعی است، چرا که کار بر روی شناور تندرو در مقیاس واقعی با استفاده از روش شناسایی سیستم بسیار محدود است. علت استفاده از روش فیلتر کالمن توسعه یافته این است که این روش قادر است چندین مجهول را در یک سیستم غیرخطی تنها با داشتن ورودی های اندازه گیری شده از تست مدل تخمین بزند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

۱ - مقدمه

مانور پذیری شناورها از جهات مختلف دارای اهمیت است به خصوص شناورهای تندرو، شناور با هر کاربرد و مأموریتی که باشد، توانایی مانور مناسب یک امتیاز مثبت برای آن خواهد بود. به عنوان مثال شناورهای جستجو و نجات یا SAR در موقعیت های ویژه نیازمند تغییر سرعت و مسیر بوده و این موضوع یک قابلیت حیاتی برای آن‌ها محسوب می گردد و این موضوع هم پیش از ساخت و هم پس از آن مورد توجه زیادی قرار می گیرد. از این رو پیش بینی چگونگی مانور می تواند کمک شایانی به طراحی و بهره برداری مناسب از یک شناور به خصوص شناورهای تندرو نماید.

علاوه بر آن می توان گفت نیاز مبرم و ضروری به یک پایگاه داده از اطلاعات تست های مانورپذیری شناور پروازی با مقیاس واقعی بیانگر اهمیت بررسی مانور شناور به صورت تجربی است.

از دیگر اهمیت هایی که می توان به آن اشاره کرد این است که کارایی شناورها در بنادر یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار در طراحی بنادر می باشد. یکی از مهم ترین عواملی که در تعیین کارایی شناور نقش اساسی دارد مانور شناور در شرایط محیطی مختلف در داخل بندر می باشد. از این رو مانورپذیری مناسب این شناورهای جستجو و نجات در داخل خور موسی واقع در بندرامام خمینی(ره) حائز اهمیت است.

موضوع شناسایی سیستم از قدمت تاریخی طولانی برخوردار است. گرچه، این موضوع در حوزه مهندسی کنترل تعریف شده است، ولیکن به لحاظ محتوایی در تمامی رشته‌های علوم مهندسی تظاهر پیدا می‌کند. زیرا، در تمامی مباحث علوم مهندسی، معمولاً، یک محقق با یک پدیده یا سیستمی نامعلوم سروکار دارد که بخش مهمی از تحقیق او صرف کسب آگاهی از رفتار آن پدیده یا سیستم در شرایط عادی و پی‌بردن به رفتار احتمالی پدیده یا سیستم، تحت شرایط خاص معطوف می‌گردد. بنابراین، استفاده از روش‌های مختلف در شناسایی سیستم، این امکان را فرآهم می‌آورد که با در اختیار داشتن داده‌های تجربی از پدیده یا سیستم مورد نظر، یک مدل عملکردی از رفتار آن را به دست آورد[۱].

فیلتر کالمن، یک تخمین‌گر است که از تخمین حالت قبل و مشاهده فعلی برای محاسبه تخمین حالت فعلی استفاده می‌کند و یک ابزار بسیار قوی برای ترکیب اطلاعات در حضور نامعینی‌ها است. در برخی موارد، توانایی فیلتر کالمن برای استخراج اطلاعات دقیق خیره کننده است. فیلتر کالمن مدت‌هاست که به عنوان راه‌حل بهینه برای بسیاری از کارهای ردیابی و پیش‌بینی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

اما فیلتر کالمن به تنهایی، در سیستم‌های خطی به کار می‌رود و چنانچه یکی از مدل‌های دینامیکی یا اندازه‌گیری، غیرخطی باشند این فیلتر دیگر کارایی نخواهد داشت در این مواقع از نوع غیر خطی فیلتر به نام فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده می شود در این فیلتر مدل های دینامیکی و اندازه گیری در صورت غیر خطی بودن طبق جمله اول سری تیلور(مرتبه اول سری تیلور) حول مسیر تخمینی جاری خطی سازی می‌شوند فیلتر کالمن توسعه یافته همانند فیلتر کالمن از دو مرحله تشکیل شده است مرحله پیش‌بینی و مرحله به روزرسانی، با این تفاوت که مدل های خطی شده در فرآیند آن لحاظ می شوند [۳].

در سال ۲۰۲۲ جیان ژنگ مقاله ای با عنوان یک رویکرد شناسایی آنلاین مدل حرکت غیرخطی کشتی با استفاده از فیلتر کالمن غیرمقایسه‌ای و آزمون خودهدایت را منتشر کردند.

این مقاله روشی برای شناسایی پارامترهای آنلاین سیستم‌های حرکت غیرخطی کشتی‌ها پیشنهاد می‌دهد. در ابتدا، سیستم حرکت یک کشتی غیرخطی است و در طول سفر، پارامترهای حرکت کشتی با تغییر وضعیت حرکت کشتی و محیط دریایی تغییر می‌کند. برای دستیابی به شناسایی در زمان واقعی، از روش شناسایی آنلاین با افق عقب رونده استفاده شده است [۴].

در سال ۲۰۲۲ تور فوسن مقاله ای با عنوان کنترل پیروی از مسیر خط دید با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته برای تخمین سرعت و مسیر روی زمین از موقعیت‌هایGNSS را به چاپ رساندند.

این مقاله طراحی اتوپایلوت مسیر برای پیروی از مسیر و فیلتر کالمن توسعه‌یافته پنج‌متغیره (EKF) را برای تخمین مؤثرCOG و SOG ارائه می‌دهد. با اینکه الگوریتم‌های متعددی برای محاسبه COGو SOG وجود دارد، طراحی EKF مزیت‌هایی دارد زیرا یک تخمین‌گر حالت می‌تواند برای گنجاندن سایر سیستم‌های حسگری مانند DVL(دستگاه سرعت داپلر)، رادار، حسگرهای نرخ وضعیت، سیستم‌های بینایی کامپیوتری و غیره گسترش یابد. این در تضاد با سیستم‌های اختصاصی است که به کاربر اجازه تغییر نرم‌افزار را نمی‌دهند.

همگرایی و دقت EKF با استفاده از مدل‌های ردیابی هدف در ترکیب با معادلات سینماتیکی به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. در مطالعه موردی پیروی از مسیر، از یک مدل دقیق از کشتی باربری کلاس MARINER استفاده شده است. از مطالعه شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که EKF به‌طور موفقیت‌آمیزی COG و SOGرا از اندازه‌گیری‌های GNSS در حین پیروی از مسیر تخمین می‌زند. این راه‌حل بسیار مقاوم و دقیق است و هنگامی که با اتوپایلوت مسیر ترکیب شود، نیاز به قطب‌نما در حین پیروی از مسیر حذف می‌شود [۵].

در سال ۲۰۲۳ یاووز هاکان اوزدمیر مقاله ای با عنوان تخمین میرایی رول کشتی و فرکانس طبیعی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته بر اساس خروجیURANS را منتشر کرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

این مقاله روشی جایگزین برای ارزیابی ضریب میرایی رول و فرکانس طبیعی یک جسم شناور را مورد بحث قرار می‌دهد. فرآیند هم‌جوشی داده‌ها به مقادیر تجربی نیاز دارد. در این مطالعه، به جای انجام آزمایش واقعی، مقادیر شبه‌آزمایشی از طریق دینامیک سیالات محاسباتی[1] به دست آمد. تکنیک فیلتر کالمن توسعه‌یافته همراه با CFD برای تخمین ضریب میرایی خطی معادل و فرکانس طبیعی حرکت کاهش رول آزاد تعیین شد[۶].

در سال ۲۰۲۴ فردی چاکیجی و همکاران ، مقاله بهبود عملکرد حرکت نوسانی کشتی با ترکیب تخمین پارامتر EKF و کنترل MPCرا منتشر کردند این مقاله یک مدل دینامیکی غیرخطی برای حرکت نوسانی یک کشتی مدل گولت مجهز به باله‌های فعال ارائه می‌دهد. برای تخمین دقیق پارامترهای مدل از آزمایشات تجربی نوسان که در آزمایشگاه تحقیقات هیدرودینامیک دانشگاه فنی ییلدیز انجام شده است، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته[2] استفاده کرده شده است. در ادامه، یک کنترل‌کننده پیش‌بین مدل[3] مبتنی بر حذف اغتشاش به‌طور فعال باله‌ها را هدایت می‌کند تا حرکت نوسانی را به حداقل برساند و به‌طور صریح اشباع‌های واقعی دامنه و نرخ را در نظر می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی موفقیت روش تخمین پارامتر ما و پتانسیل امیدوارکننده استراتژی MPC برای کاهش نوسان را نشان می‌دهد[۷].

در سال ۲۰۲۴ هوی هئو مقاله ای با عنوان مدل فیلتر کالمن برای بهینه‌سازی دقت ناوبری کشتی را با هدف بهبود دقت ناوبری کشتی‌ها، یک الگوریتم فیلتر کالمن مبتنی بر بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی ناوبری پیشنهاد داد. بر اساس مطالعه دانش موقعیت‌یابی مرده[4] ، معادله دینامیکی ابعادی سیستم ناوبری یکپارچه کشتی تنظیم می‌شود. سپس فیلتر کالمن توسعه‌یافته با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی منطق فازی[5] تنظیم شده و برای همجوشی اطلاعات GPS/INS به کار گرفته می‌شود تا توانایی تطبیق با اختلالات محیطی را داشته باشد. در نهایت، این روش برای شبیه‌سازی سیستم ناوبری یکپارچه GPS/INS روی پلتفرم نرم افزار متلب استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل بهبودیافته می‌تواند به‌طور مؤثر بخشی از داده‌های سیستم را برای به‌روزرسانی و تکرار استفاده کند و پایداری و قابلیت اطمینان فیلتر را افزایش دهد، بنابراین، این مدل برای ناوبری کشتی و ردیابی اهداف نیز مناسب‌تر است [۸].

در سال ۲۰۲۴ بینگ هان و همکاران، مقاله ای با عنوان یک روش کنترل مسیر کشتی با استفاده از قانون هدایت خط دید یکپارچه مبتنی بر کنترل فازی را ارائه دادند. در این مقاله یک روش بهبود کنترل فازی با استفاده از اصل هدایت خط دید یکپارچه[6] برای پاسخگویی به نیازهای ناوبری خودکار و کنترل با دقت بالای مسیر کشتی‌ها پیشنهاد شده است.

ابتدا یک مدل حرکت سه درجه آزادی برای کشتی ایجاد شد که بر اساس کشتی کانتینری با نیروی باتری که توسط گروه حمل‌ونقل COSCOساخته شده است، طراحی گردید.

سپس، یک کنترل‌کننده مسیر حرکت کشتی مبتنی بر الگوریتم ILOSطراحی شد. برای پاسخگویی به نیاز متغیر زمانی در پارامترهای فاصله پیش‌نگر در طول فرآیند دنبال کردن مسیر، به ویژه تحت شرایط ناوبری مختلف، کنترل‌کننده‌های منطق فازی برای شرایط مختلف طراحی شدند تا به‌طور خودکار پارامترهای فاصله پیش‌نگر را تنظیم کنند[۹].

در سال ۲۰۲۴ چینگ هاو لی و همکاران، مقاله ای با عنوان شناسایی پارامتری مدل پاسخ حرکت مانور کشتی مبتنی بر فیلتر کالمن مکعبی با ریشه دوم را منتشر کردند در این مقاله الگوریتم شناسایی سیستم مبتنی بر فیلتر کالمن مکعبی با ریشه دوم (SRCKF)برای رفع مسائلی نظیر دقت پایین، پایداری ضعیف و ضعف در قابلیت تعمیم که در شناسایی پارامترهای مدل‌های حرکتی کشتی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) رخ می‌دهد، پیشنهاد شده است. این الگوریتم در چارچوب فیلتر کالمن مکعبی (CKF) طراحی شده است و ماتریس کوواریانس اصلی را با ریشه دوم آن جایگزین می‌کند و از تجزیه مثلثی برای پیش‌بینی و به‌روزرسانی استفاده می‌کند تا پایداری شناسایی را افزایش دهد.

در این پژوهش، EKF به عنوان الگوریتم مقایسه‌ای برای شناسایی پارامترهای مدل پاسخ غیرخطی مرتبه دوم کشتی به‌کار گرفته شده است. ورودی‌های زاویه سکان با تغییرات سیستم سرووی سکان تطبیق داده می‌شوند و داده‌های شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم محاسبه می‌شوند. مدل شناسایی‌شده سپس تحت یک آزمایش اعتبارسنجی قابلیت تعمیم قرار می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم SRCKF از نظر دقت شناسایی، پایداری و قابلیت تعمیم عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم EKF دارد [۱۰].

با توجه به اهمیت مانور پذیری شناور واقعی به خصوص شناورهای تندرو از کلاس جستجو و نجات و عدم بررسی سه مانور دور زدن، زیگزاگ و شتاب گیری در دفترچه های مربوطه این شناورها در مقیاس واقعی، و اعتبار این تست ها در سازمان بین المللی دریانوردی(IMO)، در این مقاله سعی شده است با استفاده از

[1] CFD
[2] EKF
[3] MPC
[4] Dead Reckoning
[5] FLAC
[6] ILOS

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

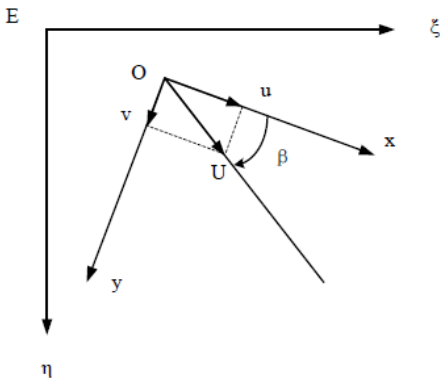
روش فیلتر کالمن توسعه یافته، به ارزیابی سه مانور زیگزاگ، دور زدن و شتاب گیری شناور جستجو و نجات ناجی ۷ بپردازیم. محل انجام تست ها در کانال خور موسی بندر امام خمینی(ره) می باشد.
از جمله نوآوری هایی که می توان در این مقاله به آن اشاره کرد یکپارچه سازی طراحی سیستم کنترل براساس مدل دینامیکی برای یک شناور تندرو در مقیاس واقعی است، چرا که کار بر روی شناور تندرو در مقیاس واقعس با استفاده از روش شناسایی سیستم بسیار محدود است. علت استفاده از روش فیلتر کالمن توسعه یافته این است که این روش قادر است چندین مجهول را در یک سیستم غیرخطی تنها با داشتن ورودی های اندازه گیری شده از تست مدل تخمین بزند.
از دیگر نوآوری های این مقاله، مدل سازی سیستم رانش واترجت این شناو تندرو است. تا کنون مدل سازی های دینامیکی عموما همراه با مدل سازی سیستم رانش شفت و پروانه بوده است.

۲ - معادلات اساسی حاکم

یکی از مهم ترین موضوعات در سیستم های دینامیکی بحث تخمین متغیرهای حالت غیرقابل مشاهده با استفاده از مدل دینامیکی سیستم، معادله و داده های مشاهده می باشد. مسئله ردیابی و تعقیب مسیر مشخصی از اهداف، نمونه هایی از مسئله فیلترینگ است. در این مسئله هدف، ردیابی شناور جستجو و نجات به عنوان سیستم دینامیکی مطرح است. در مسئله ردیابی هدف، تخمین بردار حالت سیستم از روی داده های مشاهده با استفاده از معادلات دینامیکی انجام می شود. از روش های تعقیب اهداف، توسط سونارهای غیرفعال که طی سال های گذشته و توسط افراد مختلف ارائه شده است، می توان به تعقیب اهداف با استفاده از روش ، LS روش های دیگری مانند تعقیب اهداف با استفاده PF تعقیب اهداف با استفاده از روش EKF تعقیب اهداف با گونه های مختلفی از روش UKF اشاره کرد .در این مقاله به تعقیب مسیر مشخصی از مانور شناور با استفاده از EKF می پردازیم.

۲-۱- تعیین مختصات حرکت افقی کشتی در روش EKF

دو مختصات برای توصیف حرکت افقی کشتی تنظیم شده است، همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. $E\xi\eta$ مختصات فضایی است و صفحه $E\xi\eta$ روی صفحه آب قرار دارد. Oxy مختصات کشتی است.صفحه Oxy موازی با Exi است. مبدأ مختصات، O، به مرکز ثقل کشتی متصل است. جهت گیری آن به گونه ای است که Ox با خط جلو و عقب کشتی با جهت مثبت رو به جلو و Oy به عنوان جهت مثبت و با سمت راست به عنوان جهت مثبت در نظر گرفته شده است. U سرعت کشتی و β زاویه رانش می باشد.



شکل ۱- مختصات حرکت افقی کشتی

۲-۲- تخمین حالت های سیستم و معادلات آن

سیستم دینامیکی غیرخطی در فضای زمان-پیوسته در مدل فضای حالت به صورت دو دسته معادلاتی که به ترتیب معادلات دینامیکی سیستم و معادلات اندازه گیری نامیده می شوند قابل بیان است . این معادلات که معادلات حرکت کشتی بر روی سطح آب هستند را می توان به صورت معادله (۱) نوشت:

(۱)

$$\dot{x}(t) = f(x(t).s(t).t) + w(t)$$
$$y(t) = Hx(t) + e(t)$$

که x بردار دینامیکی سیستم و y بردار اندازه گیری سیستم است. wو e به ترتیب نویز سیستم و نویز اندازه گیری هستند.s(t) بردار ورودی سیستم، و H ماتریس جاکوبی سیستم می باشد.
طوری که:

$$x(t) = [u(t) \quad v(t) \quad r(t)]^T$$
$$s(t) = [\delta(t) \quad n(t)]^T$$
$$H = I_{3\times3}$$
$$f = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T$$

u سرعت طولی کشتی، v، سرعت جانبی، r، سرعت چرخش مسیر کشتی، δ، زاویه سکان و n، دور پروانه را مشخص می کند.
بر اساس حالت استاندارد حرکت مستقیم کشتی با سرعت ثابت در امتداد محور x، توابع f در معادله (۲) را می توان به سری تیلور بسط داد. با درنظر گرفتن دقت حالت‌ها و پیچیدگی محاسبات شناسایی پارامتر، فقط سری‌های مرتبه دوم و پایین‌تر حفظ می‌شوند. مفروضات بیشتری وجود دارد که کشتی با محور x متقارن و با محور y تقریباً متقارن است، و مبدا مختصات حرکت کشتی در مرکز ثقل کشتی است. با این مفروضات، برخی از حذف‌کننده‌های جزئی در سری تیلور صفر خواهند بود و معادلات را می‌توان ساده‌تر کرد. از آن جایی که مقاومت طولی با u^2 متناسب است، مرتبه صفر، مرتبه اول و مرتبه دوم از u را می توان ترکیب کرد و به صورت $a_1u(t)^2$ نشان داد[۱۱].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

(۲)

$$f_1 = a_1u(t)^2 + a_2v(t)^2 + a_3r(t)^2 + a_4\delta(t)^2 + a_5v(t)r(t) + a_6v(t)\delta(t) + a_7r(t)\delta(t) + a_8u(t)n(t) + a_9n(t)^2$$
$$f_2 = b_1v(t) + b_2r(t) + b_3\delta(t) + b_4u(t)r(t)$$
$$f_3 = c_1v(t) + c_2r(t) + c_3\delta(t)$$

طوری که:

$$a_i(i = 1.2. \dots 9)\ \ b_i(i = 1.2.3.4)\ \ \ c_i(i = 1.2.3)$$

پارامترهای مدل هستند. وظیفه شناسایی سیستم تعیین این پارامترها است. f ها توابع برداری غیرخطی هستند.

۳-۲- محاسبه پارامترهای مدل با استفاده از EKF

به منظور شناسایی پارامترهای a_i، b_i و c_i مدل مانور کشتی، از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده شده است. پارامترهای مدل نیز به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته می شوند و سپس فضای حالت شامل پارامترهای مدل و همچنین متغیرهای حالت اصلی به آن اضافه می گردد. از این رو، معادله حالت می تواند ایجاد شود. الگوریتم شناسایی پارامترها، بر اساس روش EKF و معادله حالت است.

پارامترهای a_i، b_i و c_i را در معادله (۲) به عنوان متغیرهای حالت در نظر می گیریم و معادله (۱) را گسترش می دهیم، سپس معادله حالت افزوده و معادله مشاهده به صورت زیر ایجاد می شود.

(۳)

$$x^a(t) = f^a\left(x^a(t)، s(t)، t\right) + w(t)$$
$$y(t) = Hx^a(t) + e(t)$$

طوری که:

$$x^a(t) = [u(t)\ \ v(t)\ \ r(t)\ \ a_i(t)\ \ b_i(t)\ \ c_i(t)]^T_{1\times19}$$
$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{3\times19}$$

معادله (۳) را می توان گسسته کرد و به تابع حالت غیرخطی گسسته معادله (۴) تبدیل کرد. در این معادله k بهره تخمین کالمن نامیده می شود و به جای زمان، آن را در معادلات استفاده می کنیم. رابطه زیر یک رابطه بازگشتی است که با استفاده از حالت قبل حالت فعلی را تخمین می زند.

(۴)

$$x^a(k+1) = f^a\left(x^a(k)، s_m(k)، k\right) + \omega(k)$$
$$y(k) = Hx^a(k) + e(k)$$

جایی که $S_m(k)$ مقدار میانگین مقادیر نمونه ورودی را در T(k) و T(k+1) را نشان می دهد. T پریود نمونه است. $\omega(k)$ و e(k) سری های نویز سفید با واریانس Q و R بازگشتی است.

$$f^a = [f_1^a \quad f_2^a \quad f_3^a]^T$$

طوری که:

$$f_1^a = u(k) + Ta_1(K)u(k)^2 + Ta_2(K)v(k)^2 + Ta_3(K)r(k)^2 + Ta_4(K)\delta_m(k)^2 + Ta_5\,(k)v(k)r(k) + Ta_6(k)v(k)\delta_m(k) + Ta_7(k)r(k)\delta_m(k) + Ta_8(k)u(k)n_m(k) + Ta_9(k)r(k)n_m(k)^2$$
$$f_2^a = v(k) + Tb_1(K)v(k) + Tb_2(K)r(k) + Tb_3(K)\delta_m(k) + Tb_4(K)u(k)r(k)$$
$$f_3^a = r(k) + Tc_1(K)v(k) + Tc_2(K)r(k) + Tc_3(K)\delta_m(k)$$
$$f_4^a = a_1(k)$$
$$\vdots$$
$$f_{19}^a = c_3(k)$$

با معادله (۴) ، معادلات بازگشتی EKF زیر را داریم:

(۵)

$$x^a(k+1|k) = f^a(x^a(k).s_m(k).k)$$
$$P(k+1|k) = \emptyset P(k)\emptyset^T + Q$$
$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T[HP(k+1|k)H^T + R]^{-1}$$
$$P(k+1) = [I - K(k+1)H]P(k+1|k)$$
$$x^a(k+1) = x^a(k+1|k) + K(k+1)\left[y(k+1) - Hx^a(k+1\,|\,k)\right]$$

طوری که

$$\emptyset = \frac{\partial f^a}{\partial x^a}\Big|_{x^a = \dot{x}^a(k)}$$

با معادله بازگشتی (۵) ، بردار فیلتر شده، $x^a(k)$ معادله حالت تقویت شده را می توان محاسبه کرد. بدین ترتیب پارامترهای مدل برآورد شده، a_i، b_i و c_iتعیین می‌شوند. و از این رو می توان مدل مانور کشتی را ایجاد کرد.

۴-۲- فرمول بندی EKF

مدل سازی ریاضی سیستم های مجهول از نظر موضوع به دو بخش می‌توان تقسیم بندی کرد اول فرض بر آن است که روابط حاکم بر مسئله مشخص می باشند، اما پارامترهای موجود در این روابط و یا حداقل تعدادی از آنها مجهول اند این موضوع، به مبحث تخمین پارامترها مرسوم است. در بخش دیگری گام را فراتر نهاده اند و فرض بر این است که هیچ اطلاعی از ساختار روابط حاکم بر سیستم در دست نیست و به اصطلاح با یک جعبه سیاه روبرو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

هستیم. بدین ترتیب با حدس ساختاری فرضی مسئله به حالت اول برگشته و با تعیین پارامترهای ساختار فرضی اگر به جواب مطلوب نرسیدیم این حلقه را آنقدر تکرار می کنیم تا به ساختاری دست یابیم که با تعیین پارامترهای آن، رفتار مدل ریاضی حاصله و سیستم واقعی همسان گردد. آنچه بیشتر مورد توجه ما خواهد بود روش های مطرح در بخش اول یعنی تخمین پارامترها می باشد و یکی از دلایلی که در این مقاله به روش شناسایی سیستم پرداخته شده است همین تخمین پارامترها (تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مانور) می باشد.

همان طور که گفته شد فیلتر کالمن خطی، به منظور تخمین حالت بهینه در سیستم‌هایی با دینامیک خطی کاربرد دارد. اما برای سیستم‌های غیرخطی با اعمال اصلاح کوچکی می‌توان از همان فیلترهای کالمن خطی استفاده کرد. کافی است در هر مرحله از تخمین حالت‌های سیستم، از روی داده‌هایی که تخمین زده شده‌اند، دینامیک سیستم غیرخطی با استفاده از سری تیلور خطی‌سازی شود. در واقع الگوریتم فیلتر کالمن خطی تا حدی تطبیقی می‌شود تا بتواند حالت‌های سیستم‌های غیرخطی را نیز تخمین بزند. باید توجه کرد که اغلب فیلترهای کالمن به صورت گسسته پیاده‌سازی می‌شوند. بنابراین، دینامیک سیستم غیرخطی به صورت معادله (۶) فرض می‌شود.

(۶)

$$X_k = f(X_{k-1}.U_{k-1}) + W_{k-1}$$
$$y_k = H(X_k) + V_k$$

- x بردار دینامیکی سیستم
- y بردار اندازه گیری سیستم
- W نویز سیستم
- V نویز اندازه گیری
- U , X(t) بردار ورودی سیستم
- H ماتریس جاکوبی سیستم

به صورت جمع بندی، نام گذاری متغییر های دینامیکی سیستم غیرخطی در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱ - نام گذاری متغییر های دینامیکی سیستم غیرخطی

متغیر	تعریف
k	شماره زمان
X_k	بردار متغیرهای حالت در زمانK
W_{k-1}	نویز پروسه یا نویز سیستم در زمانK
V_k	نویز اندازه‌گیری یا نویز سنسورها در زمانK
y_k	خروجی پروسه در زمانK
f	دینامیک متغیرهای حالت
H	تابع اندازه‌گیری سیستم
U_{k-1}	سیگنال ورودی سیستم در زمانK

نویز پروسه یا نویز سیستم ناشی از عدم قطعیت در مدل سازی ریاضی سیستم است. واضح است که تابع f با مدل واقعی و عملی سیستم اختلاف دارد. این اختلاف در نویز پروسه مدل سازی خواهد شد.

نویز اندازه‌گیری همان نویز سنسورها است که برخی از متغیرهای حالت و یا تابعی از آن ها را اندازه‌گیری می‌کند.

نویز اندازه‌گیری و پروسه اغلب به صورت فرآیندهای گاوسی مدل سازی می‌شوند و ماتریس کواریانس آن‌ها را نیز به ترتیب با R_k و Q_K مشخص می‌کنند.

با انجام تحلیل‌های آماری بر روی سنسورها می‌توان ماتریس کواریانس اندازه‌گیری را مشخص کرد ولی به دلیل تنوع و پیچیدگی سیستم‌های غیرخطی، الگوریتم مشخصی برای تعیین ماتریس کواریانس نویز پروسه وجود ندارد و در عمل اغلب به صورت سعی و خطا، تنظیم می‌شود.

الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته در دو فاز انجام خواهد شد. فرض می شود تمام اطلاعات سیستم تا زمان k-1 در دسترس باشد. در این صورت بر اساس مدل ریاضی سیستم و سیگنال‌های موجود تا زمان k-1، یک تخمین اولیه از متغیرهای حالت در نمونه k محاسبه می‌شود. این گام از فیلتر کالمن ، فرآیند پیش‌بینی گفته می شود. حال طبیعتا در زمان k یک اندازه‌گیری جدید توسط سنسورها انجام می‌شود یعنی y_k در دسترس قرار می‌گیرد. در گام دوم فیلتر کالمن که فاز به‌روزرسانی نام دارد، پیش‌بینی انجام شده در گام اول بر اساس داده‌ی جدیدی که در دسترس قرار گرفته است، بهبود داده می‌شود تا حالت‌های تخمینی نهایی در نمونهk ام بدست آید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

۲-۴-۱- روش فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) – فاز پیش بینی و به روز رسانی

فاز پیش‌بینی توسط دو معادله زیر انجام خواهد شد:

(۵)

$$X_{k|k-1} = f(X_{k-1}.U_{k-1})$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{k-1}F_{k-1}^T + Q_{K-1}$$

در روابط بالا

x_{k-1} بردار حالت‌های تخمینی در زمان k-1

P_{k-1} ماتریس کواریانس در زمان k-1

$x_{k/k-1}$پیش‌بینی متغیر حالت در نمونه k بر اساس اطلاعات سیستم تا زمان k-1

$P_{K/k-1}$ نیز پیش‌بینی ماتریس کواریانس در نمونه k بر اساس اطلاعات سیستم تا زمان k-1 است.

ماتریس F_k دینامیک حالت خطی شده است که از طریق خطی‌سازی تیلور به صورت معادله (۵) به‌دست می‌آید.

(۵)

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{X_{k-1}}$$

فاز به‌روزرسانی فیلتر کالمن توسعه یافته، با استفاده از فرمول های معادله (۶) انجام خواهد شد.

(۶)

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T(H_kP_{k|k-1}H_k^T + R_k)^{-1}$$
$$X_k = X_{k|k-1} + K_k\,(Z_k - h\left(x_{k|k-1}\right)$$
$$P_k = (1 - K_kH_k)P_{k|k-1}$$

در فرمول های معادله (۶) Z_k همان خروجی اندازه‌گیری شده توسط سنسورها است. بنابراین، در قدم اول بهره کالمن (K_k) محاسبه می‌شود و سپس تخمین نهایی متغیرهای حالت (X_k) و ماتریس کواریانس (P_k) در نمونه k محاسبه خواهد شد. اگر به عبارت به‌روزرسانی حالت‌ها دقت شود، متوجه خواهد شد که در فاز به‌روزرسانی، به حالت پیش‌بینی شده در گام اول یک ترم جدید اضافه شده است که متناسب با خطای پیش‌بینی است. عبارت $z_k - h(x_{k/k-1})$ دقیقا بیانگر اختلاف بین خروجی واقعی اندازه‌گیری‌شده توسط سنسورها و خروجی به‌دست آمده در فاز پیش‌بینی است.

H_k نیز دینامیک اندازه‌گیری خطی شده است که در فاز به‌روزرسانی استفاده می‌شود. این ماتریس نیز به صورت معادله (۷) محاسبه می‌شود.

(۷)

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x}\Big|_{X_k|k-1}$$

۳- مشخصات سیستم

شناور مورد مطالعه در این پژوهش شناور ناجی ۷ بوده که یک شناور استراتژیک جستجو و نجات دریایی در کانال خور موسی بندرامام خمینی است. در شکل ۲، شناور طرح، نمایش داده شده است.

شکل۲- شناور مورد بررسی

در جدول شماره ۲ به بررسی مشخصات مدل می پردازیم. در این جدول طول، عرض، آبخور و سایر مشخصات اصلی شناور مدل ذکر شده اند.

جدول ۲ -مشخصات شناور طرح

ردیف	مشخصات شناور		
۱	طول کلی	۱۹/۶	متر
۲	عرض	۴/۶	متر
۳	آبخور	۱/۰۱	متر
۴	وزن خالص	۳۵	تن
۵	تعداد موتور اصلی	۲	عدد
۶	مجموع قدرت موتورهای اصلی	۲*۱۰۰۶/۶۹۵	کیلو وات
۷	ماکزیمم سرعت	۴۴	نات
۸	تناژ نا خالص	۲۷	تن

۴- نتایج میدانی ثبت داده ها بر روی شناور ناجی ۷

در شکل های ۳ و ۴ نتایج تست تجربی مانور دور زدن و زیگزاگ به نمایش در آمده است. با استفاده از این تست ها و ثبت داده ها به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

وسیله GPS طول و عرض جغرافیایی و سرعت شناور و زاویه نازل ثبت می شود و نتایج به روش فیلتر کالمن توسعه یافته داده می شود، مدل دینامیکی به دست می آید و مجددا با تست در دریای شناور مدل دینامیکی تخمینی اعتبارسنجی می گردد.

شکل۳- تست زیگزاگ با سرعت ۱۸ گره دریایی

شکل۴- تست دور زدن با سرعت ۱۸ گره دریایی

۴- ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمده از روش فیلتر کالمن توسعه یافته و استخراج مانور زیگزاگ و دور زدن با استفاده از روش شناسایی سیستم

پس از اعمال معادلات مربوط به روش شناسایی سیستم بر روی سیستم مورد مطالعه ما یعنی شناور ناجی ۷، ضرایب هیدرودینامیکی اقتباس می گردد و پس از آن با استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی، موقعیت مانور شناور تخمین زده می شود. ضرایب هیدرودینامیکی، ضرایبی در مدل ریاضی هستند که نیروها و ممان های وارد بر شناور (که تابعی از موقعیت و حرکت می باشد) را مشخص می کنند. در واقع حداقل دو دسته ضرایب هیدرودینامیکی در تحقیقات شناورها استفاده می شوند. یک دسته که از ضرایب لیفت، درگ و گشتاور پیچ که نیروها و گشتاورها را به سرعت نسبی سیال و زاویه حمله شناور مرتبط می کند و دسته دیگر مشتقات نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی هستند. این نیروها تابعیتی از حرکت خطی و زاویه ای شناور، در دستگاه مختصات متصل به شناور را دارند. انواع روش هایی که می توان ضرایب هیدرودینامیکی شناور را به دست آورد در چهار دسته قرار می گیرند که عبارتند از:

- تحلیلی – نیمه تجربی
- اندازه گیری تجربی
- شناسایی سیستم
- دینامیک سیالات محاسباتی

همان طور که گفته شد با استفاده از کد نویسی و به کار بردن روش فیلتر کالمن توسعه یافته، ورودی ها که عبارتند از سرعت در سه راستای سرج و سوی و یاو و زاویه نازل [1] ۲۰ درجه و دور موتور که 2000 rpm است به کد مربوطه در متلب داده می شود و سرعت ها با تقریب خوبی نزدیک به سرعت های ورودی از روش فیلتر کالمن توسعه یافته، به دست می آید. پس از آن از سرعت ها انتگرال گرفته می شود و موقعیت های مانور زیگزاگ و دور زدن استخراج می گردد.

۵- نتایج به دست آمده از شناسایی سیستم برای ضرایب مانور

جداول ۳و ۴ و ۵ به ترتیب ضرایب هیدرودینامیکی سری a و سری b و سری c را نشان می دهد. همان طور که گفته شده روش شناسایی سیستم وظیفه تعیین پارامترهای مربوط به ضرایب هیدرودینامیکی شناور را دارد. این روش قادر است چندین مجهول را در یک سیستم غیرخطی تنها با داشتن ورودی های اندازه گیری شده از تست مدل تخمین بزند. ضرایب هیدرودینامیکی سری a، نه ضریب، ضرایب هیدرودینامیکی سری b، چهار ضریب و ضرایب هیدرودینامیکی سری c، ۳ ضریب هستند که جهت اختصار از هر کدام از ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به یک سری، یک نمودار بیان شده است. اما مقادیری که هر یک از این ضرایب در نمودارها در ثانیه ۵۰۰ ام همگرا شده اند به صورت جدول در جداول ۳، ۴ و ۵ عنوان شده است.

به عبارتی دیگر، در آزمایش ها، پارامترها پس از ۵۰۰ مرحله بازگشتی به خوبی همگرا شدند. وضعیت همگرایی برخی از پارامترها در شکل های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است.

[1] سیستم رانش شناور ناجی ۷ از نوع واترجت می باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

است ضرایب در ثانیه ۵۰۰ ام همگرا می شوند. این ضرایب در معادلات مربوطه ۳ ضریب هستند.

همان طور که گفته شد، از بیان سایر نمودارهای همگرا شده جهت اختصار صرف نظر می شود و تنها به عبارت های همگرا شده نمودار اکتفا می شود و مقادیر هر یک از ضرایب هیدرودینامکی مربوط به نمودارها، در جداول ۳، ۴ و ۵ عنوان می شود.

جدول ۳- ضرایب هیدرودینامیکی سری a

ضریب هیدرودینامیکی	مقدار	ضریب هیدرودینامیکی	مقدار
a_1	0.6856	a_6	0.1778
a_2	0.2568	a_7	0.4111
a_3	0.2456	a_8	0.2569
a_4	0.5862	a_9	0.1212
a_5	0.2123		

ضرایب سری a، ضرایب مربوط به حرکت سرج شناور هستند که در جدول شماره ۳ به نمایش درآمده اند.

جدول ۴ ضرایب هیدرودینامیکی سری b

ضریب هیدرودینامیکی	مقدار	ضریب هیدرودینامیکی	مقدار
b_1	0.1578	b_3	0.0457
b_2	0.2356	b_4	-0.1234

ضرایب سری b ، ضرایب مربوط به حرکت سوی شناور هستند که در جدول شماره ۴ به نمایش درآمده اند.

جدول ۵ ضرایب هیدرودینامیکی سری c

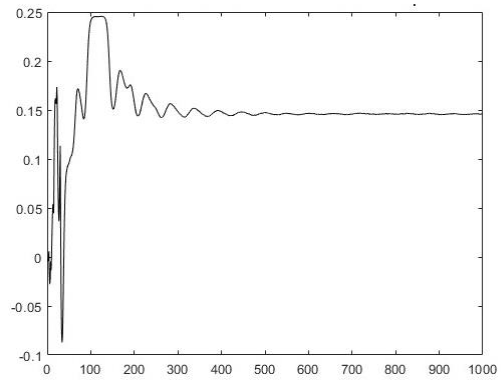
ضریب هیدرودینامیکی	مقدار	ضریب هیدرودینامیکی	مقدار
c_1	0.1356	c_3	-0.3478
c_2	-0.1111		

ضرایب سری c ، ضرایب مربوط به حرکت یاو شناور هستند که در جدول شماره ۳ به نمایش درآمده اند.

تمام این ضرایب در معادلات مربوطه جایگزین می شوند و موقعیت مانور شناور تخمین زده می شود.

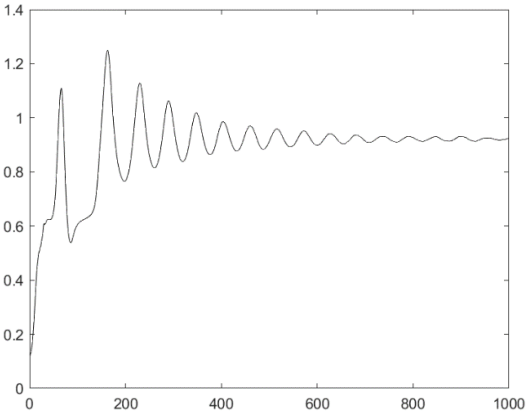
۶- نتایج به دست آمده از شناسایی سیستم برای به دست آوردن موقعیت مانور شناور

همان طور که گفته شد عموما مدل سیستم در دو دسته قرار می گیرد مدل دینامیکی حاکم بر شناور یا مدلی براساس داده های ورودی و خروجی است. مدل فیزیکی از ویژگی های فیزیکی، معادلات ریاضی و قوانین فیزیکی برای توصیف رفتار سیستم استفاده می کند در صورتی که در دسته دیگر، مدل از داده های



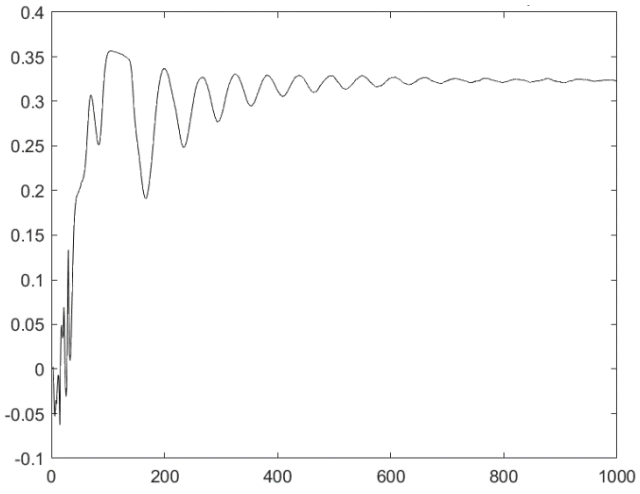
شکل ۵- نمودار همگرا شده ضریب هیدرودینامکی پارامتر a_1

در شکل ۵، ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت سرج شناور تخمین زده شده است. همان طور که از شکل مشخص است ضرایب در ثانیه ۵۰۰ ام همگرا می شوند.



شکل ۶- نمودار همگرا شده ضریب هیدرودینامیکی پارامتر b_2

در شکل ۶، ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت سوی شناور تخمین زده شده است. ضرایب در این شکل نیز در ثانیه ۵۰۰ ام ۵۰۰ ام همگرا می شوند. این ضرایب در معادلات مربوطه ۴ ضریب هستند.



شکل ۷- نمودار همگرا شده ضریب هیدرودینامیکی پارامتر c_1

در شکل ۷، ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت یاو شناور تخمین زده شده است. همان طور که از این شکل نیز مشخص

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

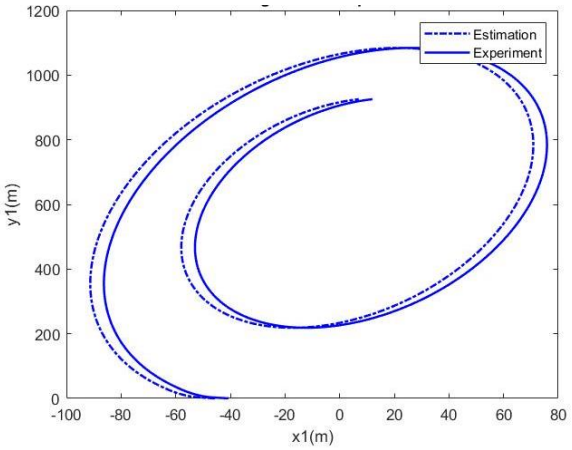
جمع آوری شده از سیستم به دست می آید. روش های شناسایی سیستم متعددی وجود دارد که در تعیین مدل شناور مورد استفاده قرار می گیرد. روش های ماکزیمم احتمال وقوع، حداقل مربعات، فیلتر کالمن، مشاهده گرها، شبکه عصبی، منطق فازی، رگرسیون از جمله روش هایی هستند که در شناسایی مدل شناورها استفاده شده اند. در این روش ها، داده های ورودی و خروجی از آزمایشات تجربی و یا شبیه سازی(داده های سرعت، شتاب، موقعیت و نیروهای کنترلی) در اختیار است و با اعمال این روش های شناسایی، مدل سازی دینامیکی برای شناور انجام می گیرد.

در ادامه نمونه نتایج حاصل از شناسایی سیستم به همراه اعتبارسنجی برای مانور دور زدن شناور ناجی ۷ ارائه شده است.

تست دور زدن یا تست چرخش دایره ای، در شرایطی که شناور با سرعت ثابت در مسیر مستقیم حرکت می کند آغاز می گردد. سکان با بیشینه سرعت با زاویه دلخواه که معمولا بیشینه زاویه سکان است چرخانده می شود و در این زاویه تا زمانی که شناور، حداقل تا زاویه ای معادل ۵۴۰ درجه مسیری نسبت به جهت اولیه را طی کند باقی می ماند. این تست با زاویه سکان در دو سمت راست و چپ کشتی انجام می گیرد. [۳]

همان طور که از شکل ۸ مشخص است با ورودی زاویه نازل ۲۰ درجه و دور موتور 2000 rpm، نسبت قطر دایره چرخش به طول کشتی ۱۰۰ بر ۲۰ متر می باشد که تقریبا ۵ برابر طول کشتی است.

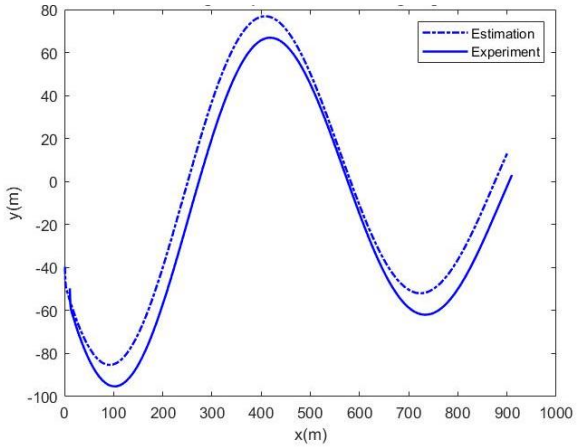
در بحث های مانور کشتی می دانیم برای شناورهایی که لاغر هستند یعنی نسبت طول به عرض کشتی آن ها بزرگتر از ۰,۵ می باشد باید نسبت قطر دایره چرخش آن ها به طول کشتی بین ۲ تا ۷ باشند و در این جا این نسبت ۵ می باشد پس نتایج با دقت قابل قبولی نتایج حاصل از مدل دینامیکی ما را تعقیب می کند.



شکل ۸- مقایسه نتایج شبیه سازی با تئوری فیلتر کالمن توسعه یافته و نتایج تجربی اندازه گیری شده

در ادامه، شبیه سازی مانور زیگزاگ شناور ناجی ۷ با زاویه نازل ۲۰ درجه در مانور زیگزاگ نمایش داده می شود. شکل ۹ نمونه نتایج حاصل از این تست را نمایش می دهد.

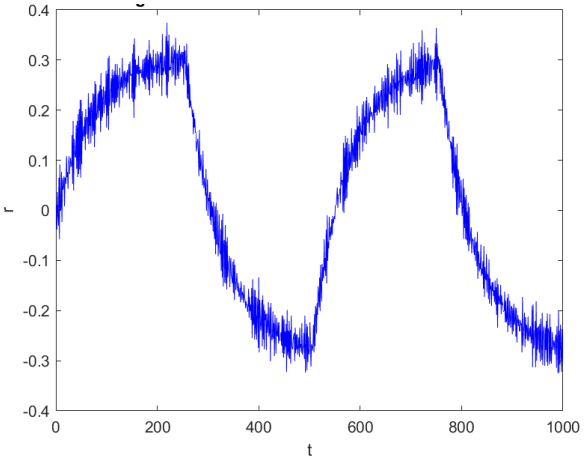
در این تست شناور در سرعت متوسط ۱۷ نات مورد تست جهت مانور زیگزاگ قرار می گیرد. در این مانور سکان شناور به صورت تناوبی بین یک مقدار بیشینه جابجا می گردد. در ابتدا مسیر شناور مستقیم بوده، سپس سکان به یک مقدار بیشینه در سمت راست رسیده و آن قدر در این موقعیت نگه داشته می شود که زاویه سرکشتی نسبت به مسیر اولیه حاصل گردد. سپس سکان با بیشینه سرعت چرخش به مقدار بیشینه در سمت چپ برگردانده شده و با اعمال این سکان، شناور با مقداری زاویه یاوینگ به مسیر اولیه خود باز می گردد که در اصطلاح به آن فرارفت گویند. در طی این فرآیند سرعت گردش سرشناور تا حد قابل توجهی افت می کند، پس از بازگشت به مسیر اولیه شناور به سمت چپ گردش خواهد کرد. زمانی که زاویه سرکشتی نسبت به مسیر اولیه در سمت چپ برسد این فاز از مانور نیز به اتمام خواهد رسید. مجددا سکان بیشینه، در سمت راست اعمال می گردد، این فرآیند معمولا تا کامل شدن پنج فرمان سکان تکرار می گردد. معمولا در تست میدانی شناورها در تست زیگزاگ از مقدار زاویه سرکشتی برابر ۱۰ یا ۲۰ درجه نسبت به مسیر اولیه استفاده می گردد. به عبارتی سکان آن قدر در موقعیت خود ثابت می ماند تا این زاویه سر کشتی ثابت شود. از نتایج این تست می توان زمان گردش اولیه، زمان چک یاوینگ و مقدار زاویه فرارفت را اندازه گیری نمود. [۳] با انجام این مانور و بررسی زمان گردش اولیه، زمان چک یاوینگ و مقدار زاویه فرارفت و مطابقت آن با استانداردهای مربوط به IMO می‌توان دریافت که خروجی مدل به خوبی با کشتی مورد نظر مطابقت دارد. آزمایش‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل مانور کشتی که توسط رویکرد ما که روش شناسایی سیستم به روش فیلتر کالمن توسعه یافته ایجاد شده است، می‌تواند مانور کشتی را با دقت معقولی نشان دهد.



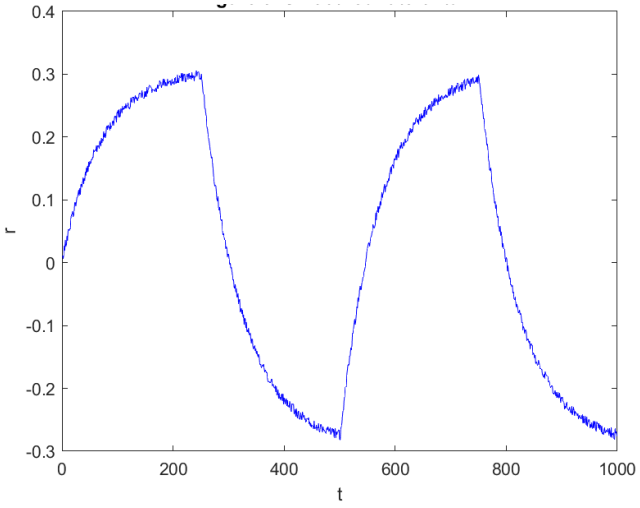
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

شکل ۹- مقایسه نتایج شبیه سازی با تئوری فیلتر کالمن توسعه یافته و نتایج تجربی اندازه گیری شده

در ادامه جهت بررسی صحت بررسی مانور پذیری شناور به روش فیلتر کالمن توسعه یافته مانور زیگزاگ شناور را بدون اعمال فیلتر و با اعمال فیلتر با هم مقایسه می کنیم. شکل ۱۰ نمایش مانور زیگزاگ بدون اعمال فیلترینگ روش فیلتر کالمن توسعه یافته و با نویز سیستم می باشد.



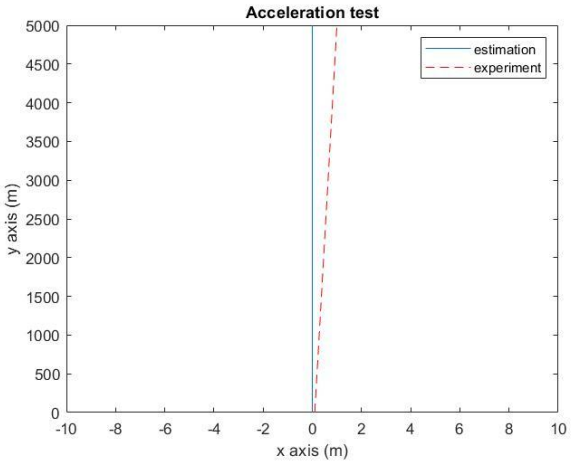
شکل ۱۰- مانور زیگزاگ بدون اعمال فیلترینگ



شکل ۱۱- مانور زیگزاگ با اعمال فیلترکالمن توسعه یافته

شکل ۱۱ نشان دهنده تاثیر روش فیلتر کالمن توسعه یافته بر مانور زیگزاگ شناور می باشد که کلیه نویزها و اغتشاشات سیستم را فیلتر کرده است.

حال مانور دیگری، با عنوان مانور شتاب گیری شناور، جهت بررسی مانورپذیری شناور به روش فیلتر کالمن توسعه یافته مدل سازی می شود. شکل ۱۲ مانور شتاب گیری شناور را نمایش می دهد.



شکل ۱۲- مانور شتاب گیری شناور

نتایج این مانور نیز حکایت از انطباق روش تخمینی فیلتر کالمن توسعه یافته با نتایج آزمایشگاهی در دریا دارد.

۷- نتیجه گیری و جمع بندی

در سال های اخیر تعداد شناورهای تندرو به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین طول و ابعاد این شناورها در حال افزایش است. برای این شناورها طراحی مناسب سازه دارای اهمیت بسیاری می باشد. برای این که نوع طراحی تاثیر زیادی بر روی وزن شناور و به دنبال آن هزینه و میزان بار قابل حمل دارد. با توجه به این مسائل، نیاز به ارائه مفاهیم جدید در طراحی این دسته از شناورها بسیار ضروری است.

مدل های ریاضی مورد استفاده برای بررسی مانور شناورها متکی بر ضرایب هیدرودینامیکی، بسیار پیچیده هستند. این ضرایب وابسته به عوامل خطی و غیر خطی بوده و معمولا به دست آوردن آن ها به روش تجربی یا عددی بسیار پیچیده و هزینه بر خواهند بود. بر این اساس روش فیلتر کالمن توسعه یافته می تواند روش قدرتمند و دقیقی برای مدل سازی مانور شناور باشد.

الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته در دو گام اجرا می‌شود. در گام پیش‌بینی، فیلتر کالمن تخمینی از وضعیت فعلی متغیرها را در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌کند. زمانی که نتیجه اندازه‌گیری بعدی به‌دست آید، تخمین قبلی با میانگین وزن‌دار آپدیت می‌شود. به این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند، بیشتر خواهد بود. این الگوریتم، بازگشتی می‌باشد و با استفاده از ورودی‌های جدید و حالات محاسبه شده ی قبلی به‌صورت بی‌درنگ اجرا می‌شود. حال اگر بخواهیم این روش را بر روی مدل ریاضی که از شناور به عنوان پلنت یا سیستم مورد مطالعه بررسی می کنیم به زبان ساده تر توضیح دهیم می توان گفت ابتدا ورودی و خروجی های حاصل از تست اول را اندازه گیری می کنیم. در تعریف ورودی و خروجی ها باید گفت: ورودی، داده های حاصل از دستگاههای کنترل ناوبری GPS و INS شناور است که به شناور ناجی ۷ داده می شود و خروجی ها، موقعیت و سرعت شناور است که ثبت می

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

شود. با استفاده از ورودی و خروجی ها مدل دینامیکی شناور و ضرایب هیدرودینامیکی آن اقتباس می گردد. در نهایت برای صحت سنجی تست دیگری انجام می شود، اما این بار تنها ورودی های جدید، به مدل دینامیکی ارائه می شود. شایان ذکر است، برای تست ثانویه همان نتایجی که برای شناور در حالت تجربی با اختلاف ناچیز (به علت وجود اغتشاشات و نویزهای خارجی سیستم) به دست آمد، به دست می آید و از این اعتبار سنجی، می توان نتیجه گرفت که مدل دینامیکی به دست آمده، مانور کشتی را با دقت قابل قبولی تعقیب می کند. از آن جایی که نتایج تقریبا بر روی یکدیگر هم پوشانی دارند می توان نتیجه گرفت که آزمایش‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل مانور کشتی که توسط رویکرد روش شناسایی سیستم به روش فیلتر کالمن توسعه یافته ایجاد شده است، می‌تواند مانور کشتی را با دقت معقول نشان دهد.

کلید واژگان

SAR (search and rescue vessel)
GPS(Global Positioning System)
INS(Inertia navigation system)
EKF(Extended Kalman Filter)
KF(Kalman Filter)
NMEA (National Marine Electronics Association)
IMO (International Maritime Organization)
UKF(Unscented Kalman Filter)

۸- مراجع

1- Selahshur, Karim.(2019). Theoretical and practical basics system identification book, Oil Industry University, first edition, (In Persian)
2- https://blog.faradars.org/
3- Hajizadeh, Sajjad(2015) Experimental study of the effect of control surfaces on the maneuvering of high-speed vessels in calm water, PhD thesis, Faculty of Mechanics, Sharif University of Technology. (In Persian)
4- Jian Zheng at all(2022), An Unscented Kalman Filter Online Identification Approach for a Nonlinear Ship Motion Model Using a Self-Navigation Test, machines journal
5- Thor I. Fossen1(2022), Line-of-sight path-following control utilizing an extended Kalman filter for estimation of speed and course over ground from GNSS positions, ournal of Marine Science and Technology ,27:806–813
6- Yavuz hakan ozdemir(2023), Estimation of ship roll damping and natural frequency using an extended Kalman filter applied to URANS output, MS received 2 January 2023; revised 22 May 2023; accepted 17 July 2023
7- Ferdi Cakici ,at all, (2024), Improved Ship Roll Motion Performance with Combined EKF, Parameter Estimation and MPC Control, IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), August 21-23, 2024. Newcastle upon Tyne, UK
8- Huwei Huo (2024), A Kalman Filter Model for Ship Navigation Accuracy Optimization, Advances in Transdisciplinary Engineering, Volume 47: Intelligent Computing Technology and Automation
9- Bing Han att all (2024), A Ship Path Tracking Control Method Using a Fuzzy Control Integrated Line-of-Sight Guidance Law, journal of marine science and engineering, J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 586. https://doi.org/10.3390/jmse12040586
10- Qinghao Li at all(2024), Parametric Identification of Ship Maneuvering Motion Response Model Based on Square Root Cubature Kalman Filtering, Journal of System Simulation, Volume 36Issue 8, 8-15
11- Shi.C and at al .(2009). "Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters", International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Volume3,Number1,March

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]