

Extraction of Hydrodynamic Coefficients of the Remus Underwater Vehicle Robot by Coupling the CFX Software Simulator and Kalman Filter Estimator Code.

Malekpoor, A. H.

Mahdi, M. A.

Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

(Received: 2022/05/20, Revised: 2022/07/11, Accepted: 2022/07/23, Published: 2022/08/23)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.5.7>

ABSTRACT

Estimation of the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle is the purpose of this paper. The Kalman filter method has been used for estimating the AUV hydrodynamic coefficients. To estimate hydrodynamic coefficients without knowing their initial values, spatial and temporal information of the AUV are needed. This information can be collected through different methods including experimental methods which gather the required information by the sensors installed on the AUV. In this paper, outputs related to the time and location information are collected using robot maneuver simulation in CFX software, with a movable grid being used to simulate the robot maneuver. In movable grid method, when the mesh quality has been reduced by a certain level, the meshing around the robot is summoned to the WB environment and after performing the new meshing, it is returned to the CFX environment to continue the simulation. To derive the hydrodynamic coefficients of the autonomous underwater vehicle, a sinusoidal maneuver at three degrees of freedom is selected for simulation in CFX software. The collected results from the sine maneuver simulation are applied as input to the Kalman filter estimator code. The hydrodynamic coefficients whose extraction is desired, are defined as unknown parameters in the robot control equations. In this maneuver the hydrodynamic coefficients have been extracted with good accuracy. Also to improve the Matlab code and increase the accuracy of extracting hydrodynamic coefficients, the control equation are written in the matrix form. Thus, the number of extracted coefficients are decreased but the coefficients are extracted with higher accuracy.

Keywords: Hydrodynamic Coefficients, Underwater Vehicle, Kalman Filter

استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ربات زیرسطحی ریموس با کپل کردن شبیه‌سازی نرم‌افزار CFX و کد تخمین‌گر فیلتر کالمن

میراعلم مهدی^۲

محمد ملک‌پور^۱

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

چکیده

در این تحقیق به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ربات ریموس پرداخته می‌شود. جهت استخراج ضرایب از کد تخمین‌گر فیلتر کالمن استفاده می‌شود. برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی بدون اطلاع داشتن از مقادیر اولیه آن‌ها نیاز به اطلاعات زمانی و مکانی مانور مورد نظر می‌باشد. این اطلاعات به چند طریق قابل دسترسی است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های تجربی که اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین ضرایب را از سنسورهای نصب شده بر روی ربات جمع‌آوری می‌کنند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی مانور ربات در نرم‌افزار CFX خروجی‌های مربوط به اطلاعات مکان و زمان جمع‌آوری می‌شود. لازم به ذکر است از شبکه‌بندی متحرک برای شبیه‌سازی ربات استفاده شده است. در روش شبکه‌بندی متحرک در صورت کاهش کیفیت شبکه از یک میزان مشخص، شبکه‌بندی اطراف ربات به محیط WB فراخوانی می‌شود و پس از انجام شبکه‌بندی جدید برای ادامه شبیه‌سازی به محیط CFX بازگردانده می‌شود. مانور سینوسی در صفحه افقی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار CFX انتخاب شده است. نتایج جمع‌آوری شده از شبیه‌سازی مانور سینوسی به عنوان ورودی به کد تخمین‌گر فیلتر کالمن اعمال شده است. ضرایب هیدرودینامیکی مورد نظر جهت استخراج به عنوان مجهول در معادلات کنترلی ربات تعریف شده است. ضرایب هیدرودینامیکی در این مانور با دقت خوبی استخراج شده‌اند. همچنین جهت بهبود کد متلب برای افزایش دقت استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، معادلات کنترلی به صورت ماتریس نوشته شده است. با این روش تعداد ضرایب استخراج‌شده کاهش یافته اما ضرایب با دقت بالاتر، استخراج شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، ربات زیرسطحی، فیلتر کالمن

۱- مقدمه

به محاسبه ضرایب جرم افزوده یک بیضی‌گون پرداخته است.

کن^۷ [۵] در سال ۲۰۱۴ تکنیک شبیه‌سازی CFD را برای ربات زیرسطحی اتوساب و دارپا به روش‌های بازوی چرخان و مکانیزم حرکت صفحه‌ای توسعه داده است. ری^۸ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر عدد رینولدز و زاویه حمله بر ضرایب هیدرودینامیکی پرداخته است. با افزایش زاویه حمله و کاهش عدد رینولدز ضرایب هیدرودینامیکی افزایش می‌یابند. لی [۷] در سال ۲۰۱۶ به بررسی ربات زیرسطحی ریموس پرداخته است. در این پروژه لی جهت پایداری حرکت از محرک‌های داخلی به جای سطوح کنترل استفاده کرده است. عدنیان و مهدی [۸] در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی تأثیر دامنه و بسامد نوسان AUV^۹ نوع اتوساب بر روی ضرایب هیدرودینامیکی در حرکت هیو خالص پرداخته‌اند. کیم^{۱۰} و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه روی یک ربات زیرسطحی نوع BB2 پرداخته‌اند. در این شبیه‌سازی جریان از نوع لزج و غیر آرام است که در پژوهش‌های دیگر محدود در نظر گرفته می‌شود. این شبیه‌سازی شامل دیسک محرک و صفحات کنترلی می‌باشد که نتایج خوبی به دست آمده است. نوری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۸ با شبیه‌سازی جداگانه برای باله و بدنه ربات زیرسطحی HydroLab 500 به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج تجربی مقایسه شدند که دقت خوبی را داشتند و رفتار ربات زیرسطحی در مکانیزم حرکت صفحه-ای به شرایط عملکردی نزدیک است. دو^{۱۱} و ژنگ^{۱۲} [۱۱] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر یک زیردریایی بر AUV به هنگام نزدیک شدن ربات زیرسطحی با زاویه‌های حمله و جانبی مختلف به زیردریایی پرداخته‌اند که نتایج خوبی در شناسایی عملکرد ربات زیرسطحی در شرایط مختلف داشته است. جهت‌گیری AUV به سمت زیردریایی در دو مسیر با زاویه حمله و زاویه لبه جانبی و رینولدزهای مختلف انجام شده است. یک جهت‌گیری به سمت مرکز زیردریایی و

ضرایب هیدرودینامیکی در تعیین مسیر و انجام مانورهای تعیین‌شده برای ربات زیرسطحی، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در این مقاله به تخمین ضرایب هیدرودینامیکی ربات زیرسطحی ریموس در مانور سینوسی پرداخته می‌شود. برای شناسایی مسیر و انجام مانور سینوسی از شبیه‌سازی مانور در نرم‌افزار انسیس CFX استفاده شده است و برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ربات، از کد متلب مربوط به تخمین گر فیلتر کالمن استفاده شده است. در شبیه‌سازی مانور ربات از روش شبکه متحرک برای شبکه‌بندی اطراف ربات استفاده شده است. برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی موردنظر در مانور سینوسی، این ضرایب به‌عنوان متغیر جدید به متغیرهای معادلات کنترلی افزوده می‌شود. سپس تخمین گر فیلتر کالمن با استفاده از اطلاعات مربوط به متغیرهای مربوط به مکان و سرعت ربات زیرسطحی که از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی قابل‌دسترس هستند، استفاده می‌کند و در گام-های زمانی قبلی و فعلی به تخمین ضرایب هیدرودینامیکی مجهول می‌پردازد؛ همچنین لازم به ذکر است که مانور سینوسی در صفحه افقی $x-y$ و در سه درجه آزادی انجام می‌شود. معادلات سه درجه آزادی، به‌صورت معادلات کنترلی ماتریسی به کد اعمال شده است. در معادلات کنترلی ماتریسی تنها سه ضریب قابل‌استخراج است.

لین^۱ و لیاو^۲ [۱] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش المان مرزی به محاسبه ضرایب جرم افزوده یک ربات زیرسطحی پرداخته‌اند. قاسمی و یاری [۲] نیز در سال ۲۰۱۱ برای محاسبه جرم افزوده یک ربات زیرسطحی از روش المان مرزی استفاده کرده است جاگادیش^۳ و همکاران [۳] به بررسی تأثیر زاویه حمله و عدد رینولدز بر ضرایب مومنوم پیچ خالص، درگ^۴ و لیفت^۵ یک ربات زیرسطحی پرداخته است. با افزایش عدد رینولدز و زاویه حمله، ضرایب درگ، لیفت و مومنوم نیز افزایش یافته‌اند. لی^۶ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از مکانیزم حرکت صفحه‌ای

⁷ Can

⁸ Ray

⁹ autonomous under water vehicle

¹⁰ Kim

¹¹ Du

¹² Zheng

¹ Lin

² Liao

³ Jagadeesh

⁴ Drag

⁵ Lift

⁶ Lee

در نهایت این نتیجه حاصل شد که دقت و سرعت استخراج ضرایب در روش UKF بهتر است. ثابت و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۸ به بهبود تخمین‌گر بازگشتی فیلتر کالمن پرداخته و مشکل مربوط به ربات‌های زیرسطحی با ابعاد بزرگ را با استفاده از قضیه بیز و ارائه روش TUKF برطرف کرده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد روش TUKF دقت بالاتری نسبت به روش EKF دارد. سجادی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۹ با اعمال دو پارامتر محدودکننده به تخمین‌گر کالمن فیلتر و ارائه روش REKF که حد بالایی را برای خطا مشخص می‌کند، ضرایب هیدرودینامیکی را استخراج کرده است. نتایج به دست آمده دقت خیلی خوبی دارند و به شرایط عملکردی نزدیک هستند.

در روش کالمن فیلتر به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی که در معادلات کنترلی مربوط به ربات قرار دارند، پرداخته می‌شود. جهت بهبودسازی روش کالمن فیلتر ابتدا به شبیه‌سازی یک مانور مشخص که با تکیه بر ضرایب هیدرودینامیکی با مقادیر اسمی معلوم، انجام می‌شود. سپس همان ضرایب هیدرودینامیکی معلوم به‌عنوان متغیر جدید و مجهول در معادلات تعریف می‌شود. در نهایت، با استفاده از خروجی‌های مانور انجام شده (که با تکیه بر ضرایب معلوم شبیه‌سازی شده است) به تخمین ضرایب موردنظر پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است در تمامی مانورها زوایای بالک رادر و استرن در یک مقدار مشخص ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. در این مقاله، بدون اطلاع از مقادیر اسمی دو ضریب N_r و N_f تخمین زده شده است. از ابتدا دو ضریب به‌عنوان متغیرهای جدید و مجهول به در معادلات مربوط به ربات تعریف شده است. استفاده از شبیه‌سازی مانور در نرم‌افزار سبب کاهش هزینه نسبت به انجام مانور در محیط آزمایشگاهی شده است. همچنین مانور موردنظر در این مقاله مانور سینوسی می‌باشد و زوایای بالک‌ها در طول مسیر تغییر می‌کند که نسبت به کارهای قبلی مانور پیچیده‌تر و در نتیجه استخراج ضرایب دشوارتر می‌باشد. لازم به ذکر است که این مانور به شرایط عملیاتی نزدیک می‌باشد. تغییر زوایای بالک در حین مانور و شبیه‌سازی آن از جمله کارهای انجام شده در این مقاله می‌باشد. ضرایب تخمین‌شده با نتایج مقاله پرستو [۱۹] که از جمله منابع معتبر در زمینه ضرایب

دیگری به سمت کناره زیردریایی که نتایج قابل قبولی به دست آمده است. در روش دینامیک سیالات محاسباتی امکان استخراج تمام ضرایب وجود ندارد و برای استخراج هر ضریب نیاز به انجام مانور جداگانه می‌باشد. به همین دلایل استفاده از روش‌های شناسایی سیستم در حال گسترش هستند. در این روش‌ها امکان استخراج هم‌زمان چند ضریب با انجام یک مانور امکان‌پذیر است.

روش شناسایی سیستم استفاده از اطلاعات زمانی و مکانی که هم از طریق آزمایش و هم از طریق ثبت اطلاعات حس‌گرهای نصب‌شده بر روی ربات‌های زیرسطحی قابل جمع‌آوری است، می‌باشد. در سال ۱۹۹۸ الساندری^۱ و همکاران [۱۲] با استفاده از تخمین‌گرهای فیلتر کالمن و حداقل مربعات به شبیه‌سازی و مانور ربات‌های زیرسطحی پرداختند. کیم و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از تخمین‌گر بازگشتی فیلتر کالمن ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV را استخراج کرده‌اند. در این پژوهش از دو روش EKF I و EKF II برای تخمین ضرایب استفاده شده است. معادلات مربوط به EKF^۲ به‌صورت کامل در قسمت ۲-۱ توضیح داده شده است. EKF I برای استخراج ضرایب در حرکت بدون شتاب است و EKF II برای استخراج ضرایب در حرکت شتاب‌دار است. با وجود اینکه دقت روش اول بیشتر است ولی روش دوم به شرایط عملکردی نزدیک است. ضرایب استخراج‌شده از روش دوم برای اعمال در معادلات حرکت ربات زیرسطحی استفاده شده است. لوکو^۳ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۱ به تخمین ضرایب یک AUV نوع پیراجوبا، با استفاده از روش فیلتر کالمن پرداخته‌اند. هدف این تحقیق کنترل قوی در نوسانات و انحراف با فرض عدم قطعیت، اغتشاشات و خطاها می‌باشد. آراکی^۴ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ ضرایب هیدرودینامیکی یک کشتی در چهار درجه آزادی توسط تخمین‌گر EKF و CLS استخراج کرده است. در سال ۲۰۱۴ ثابت و همکاران [۱۶] تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیرسطحی نوع ریموس را با استفاده از تخمین‌گرهای EKF^۵ و UKF استخراج کردند که

¹ Alessandri

² Extended Kalman Filte

³ Luque

⁴ Araki

⁵ Unscented Kalman Filter

با فرض اینکه مبدأ مختصات بدنی بر روی مرکز بویانسی قرار گرفته است، معادلات حرکتی در راستای محور x در قالب مرجع مختصات بدنی به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$m. [\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X \quad (۷)$$

$$I_x \cdot \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m. [y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \quad (۸)$$

که در آن u, v, w سرعت‌های خطی، $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ شتاب‌های خطی، p, q, r سرعت‌های زاویه‌ای، $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ شتاب‌های زاویه‌ای و I_x, I_y, I_z ممان اینرسی ربات زیرسطحی می‌باشند.

معادلات مربوط به دو راستای دیگر نیز به همین صورت نوشته می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای v, w, r و \dot{r} که به ترتیب مکان خطی، سرعت خطی، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای در راستای y می‌باشند، از شبیه‌سازی مانور سینوسی اندازه‌گیری می‌شوند و به‌عنوان ورودی به معادلات تخمین‌گر داده می‌شوند. سپس با استفاده از این ورودی‌ها دو ضریب هیدرودینامیکی N_r و $N_{\dot{r}}$ استخراج می‌شوند.

۲-۱- تخمین‌گر کالمن فیلتر

این الگوریتم 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 به دست آید، تخمین قبلی با میانگین وزن‌دار به‌روزرسانی می‌شود. به‌این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند، بیشتر خواهد بود. الگوریتم بازگشتی می‌باشد و با استفاده از ورودی‌های جدید و حالات محاسبه‌شده قبلی به‌صورت بی‌درنگ اجرا می‌شود.

برای اینکه وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند، بیشتر باشد از ضریب بهره کالمن استفاده می‌شود. بهره کالمن به‌گونه‌ای تعریف شده است که اگر نویز فرایند (کواریانس فرایند) خیلی کمتر از نویز حس‌گرها (کواریانس اندازه‌گیری) باشد آن‌گاه حالت نهایی پیش‌بینی‌شده برابر با حالت پیش‌بینی‌شده در گام اول است و اگر نویز فرایند خیلی بیشتر از نویز حس‌گرها باشد، آن‌گاه حالت پیش‌بینی‌شده نهایی برابر با اطلاعات خروجی از حس‌گرها (اندازه

هیدرودینامیکی شناورها به حساب می‌آید مقایسه شده است که از دقت خوبی برخوردار است.

۲- معادلات حاکم

برای تحلیل رفتار سیال اطراف ربات زیرسطحی از معادلات ناویر-استوکس که در شبیه‌سازی با نرم‌افزار CFX، مانور ربات بر اساس همین معادلات ناویر-استوکس در قالب معادلات بقای جرم و مومنتوم صورت می‌پذیرد که به‌صورت زیر نشان داده شده است؛ همچنین از مدل آشفتگی SST-k ω استفاده شده است. پایستگی جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho(u_j - u_{mj})}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

پایستگی اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_i(u_j - u_{mj})}{\partial x_j} = F_s + F_b \quad (۲)$$

در این معادلات u_j سرعت سیال و u_{mj} سرعت شبکه در جهت j و ρ چگالی سیال می‌باشد؛ همچنین نیروهای پایداری وارد بر جسم F_s و بدنی آشکار F_b به ترتیب برابر است با:

$$F_s = \frac{\partial p_f}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad (۳)$$

$$F_b = -\rho \frac{d_0^2 R_b}{dt^2} \quad (۴)$$

که در آن p_f فشار و R_b بردار موقعیت می‌باشند. برای به حساب آوردن تغییر شکل شبکه، معادلات آشفتگی نیز به ALE^۱ در می‌آیند.

$$\frac{\partial \rho k_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho k_f}{\partial t} = P_k - \beta'_f \rho k_f \omega_f + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\partial k_f} \right) \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \right] \quad (۵)$$

$$\frac{\partial \rho \omega_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega_f (u_j - u_{mj})}{\partial x_j} = \alpha_f \frac{\omega_f}{k_f} P_k - \beta_f \rho k_f \omega_f^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma \omega_f} \right) \frac{\partial \omega_f}{\partial x_j} \right] \quad (۶)$$

که در این دو رابطه k_f انرژی جنبشی آشفتگی، ω_f فرکانس آشفتگی، μ_t ویسکوزیته آشفتگی و $\beta_f, \beta'_f, \alpha_f$ ثابت‌های مدل آشفتگی می‌باشند.

^۱ Arbitrary Lagrangian-Eulerian

قبلی، P_K^- ماتریس کواریانس پیش‌بینی‌شده در گام زمانی فعلی، P_K ماتریس کواریانس آپدیت‌شده در گام زمانی فعلی، H_K ماتریس اندازه‌گیری و Z_K بردار خروجی حاصل از اندازه‌گیری می‌باشد.

۳- استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ربات زیرسطحی ریموس

جهت محاسبه ضرایب شناور، ابتدا باید مشخصات هندسی وسیله، جرم آن، بویانسی و نهایتاً پارامترهای موردنیاز سطوح کنترلی مشخص شود. بر اساس معادلات هندسی بدنه مایرینگ [۲۰] شکل دماغه ریموس را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

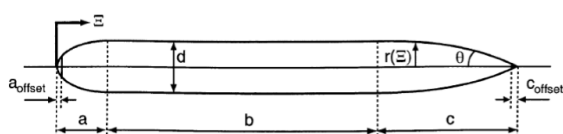
$$r(\varepsilon) = \frac{1}{2} d_r - \left[1 - \left(\frac{\varepsilon + a_{offset} - a_r}{a_r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

که در آن r شعاع شناور، ε موقعیت محوری شناور، d_r بیشترین قطر بدنه، a_r طول کل دماغه و a_{offset} انحراف دماغه می‌باشند.

علاوه بر این، شکل دم شناور با توجه به اطلاعات موجود به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$r(\varepsilon) = \frac{1}{2} d_r - \left[\frac{3d_r}{2c_r^2} - \frac{\tan\theta_r}{c_r} \right] (\varepsilon - l_r)^2 + \left[\frac{d_r}{c_r^3} - \frac{\tan\theta_r}{c_r^2} \right] (\varepsilon - l_r)^3 \quad (13)$$

که در آن θ_r زاویه دم، c_r طول دم و l_r طول کل شناور می‌باشد. در شکل ۱ شکل کلی از هندسه شناور موردنظر و در جدول ۱ پارامترهای شناور قابل‌مشاهده می‌باشد. همچنین جدول‌های ۲ و ۳ و به ترتیب مربوط به پارامترهای سطوح کنترلی و پارامترهای وزن و بویانسی است.



شکل (۱). شکل هندسی بدنه مایرینگ

گیری) می‌باشد. نحوه عملکرد بهره کالمن به صورت زیر است:

(الف) اگر نویز اندازه‌گیری بسیار ناچیز باشد:

$$\begin{aligned} \lim_{R \rightarrow 0} K_K &= \lim_{R \rightarrow 0} \frac{P_K^- H_K^T}{H_K P_K^- H_K^T + R} \\ &= \lim_{R \rightarrow 0} \frac{P_K^- H_K^T}{H_K P_K^- H_K^T + 0} = H^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_K &= X_K^- + K_K (Z_K - H_K X_K^-) \\ &= X_K^- + H^{-1} (Z_K - H_K X_K^-) \end{aligned}$$

$$X_K = Z_K \quad (9)$$

(ب) اگر نویز فرایند بسیار ناچیز باشد:

$$\begin{aligned} \lim_{P_K^- \rightarrow 0} K_K &= \lim_{R \rightarrow 0} \frac{P_K^- H_K^T}{H_K P_K^- H_K^T + R} = \lim_{P_K^- \rightarrow 0} \frac{0}{0 + R} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_K &= X_K^- + K_K (Z_K - H_K X_K^-) \\ &= X_K^- + 0 (Z_K - H_K X_K^-) \end{aligned}$$

$$X_K = X_K^- \quad (10)$$

معادلات مربوط به کد تخمین‌گر کالمن فیلتر به صورت زیر است.

$$X_K^- = F_K X_{K-1} + B_K u_K + w_K$$

$$P_K^- = F_K P_{K-1} F_K^T + Q_K$$

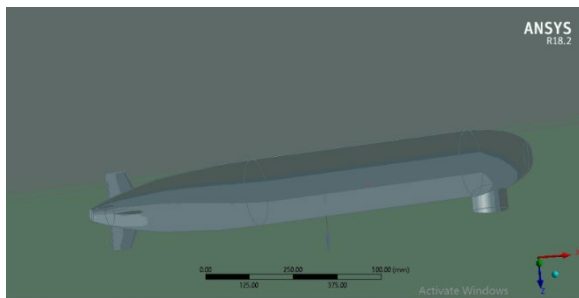
$$Z_K = H_K X_K + v_K$$

$$K_K = P_K^- H_K^T (H_K P_K^- H_K^T + R_K)$$

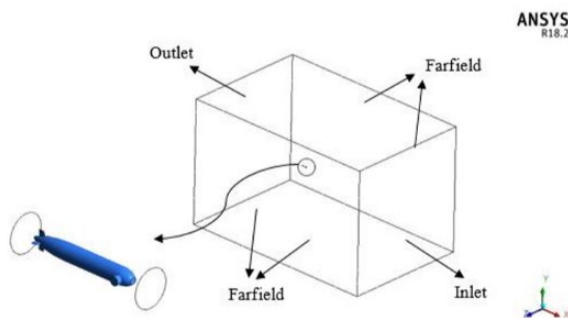
$$X_K = X_K^- + K_K (Z_K - H_K X_K^-)$$

$$P_K = (I - K_K H_K) P_K^- \quad (11)$$

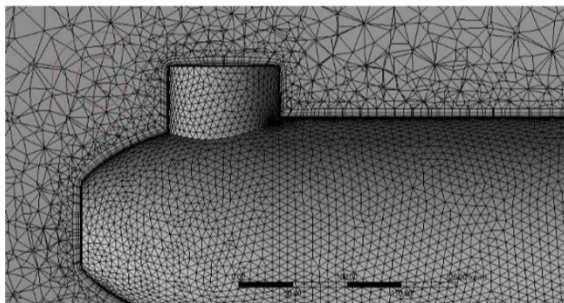
که در آن F_K ماتریس انتقال حالات سیستم، u_K بردار مربوط به ورودی‌های سیستم، B_K ماتریس کنترل ورودی-های سیستم، w_K نویز فرایند با توزیع نرمال، Q_K میانگین صفر و واریانس نویز حس‌گر با توزیع نرمال، R_K میانگین صفر و واریانس بردار حالت سیستم در گام زمانی قبلی، X_K^- بردار آپدیت‌شده سیستم در گام زمانی فعلی، P_{K-1} ماتریس کواریانس در گام زمانی



شکل (۲). هندسه ربات زیرسطحی ریموس



شکل (۳). سیال محاسباتی برای ربات زیرسطحی ریموس



شکل (۴). شبکه‌بندی میدان اطراف ربات زیرسطحی ریموس

جدول (۲). نتایج مربوط به استقلال شبکه زیرسطحی ریموس

نوع شبکه	تعداد سلول (میلیون)	C_D	C_L	C_M
درشت	۰/۵۹۴	-۰/۱۸۴۴	-۰/۱۶۹۲	-۰/۳۳۰۹
متوسط	۰/۸۲۵	-۰/۱۹۵	-۰/۱۷۶۴	-۰/۳۲۷۴
ریز	۱/۱	-۰/۲۱۲	-۰/۱۸	-۰/۳۵۲
خیلی ریز	۱/۴	-۰/۲۱۲۳	-۰/۱۸۱	-۰/۳۵۲۴

جدول (۱). پارامترهای مایرینگ برای شناور ریموس

ردیف	پارامتر	مقدار (m)
۱	a_r	۰/۱۹۱
۲	a_{offset}	۰/۰۱۶۵
۳	b_r	۰/۶۵۴
۴	c_r	۰/۵۴۱
۵	c_{offset}	۰/۰۳۶۸
۶	θ_r	۰/۴۳۶
۷	d_r	۰/۱۹۱
۸	l_r	۱/۳۳

وزن شناور ریموس برابر ۳۰۶ (N) و بویانسی آن ۲۹۹ (N) می‌باشد، ولی در برخی موارد به دلایل افزودن یا کاستن باتری‌های موردنیاز برای ربات این نیروها دچار تغییرات می‌شوند. در این تحقیق نیروی شناوری و وزن برابر در نظر گرفته شده است. سایر اطلاعات جزئی‌تر در مورد ربات ریموس در مقاله پرستو [۱۹] موجود می‌باشد.

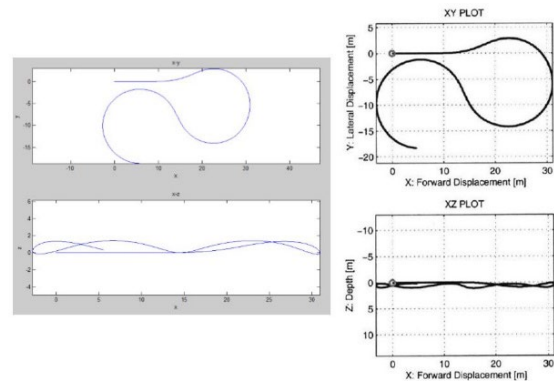
برای شبیه‌سازی مانورهای ربات زیرسطحی ریموس هندسه زیرسطحی با استفاده از پارامترهای مایرینگ مدل-ساز شده است. شکل ۲ هندسه زیرسطحی ریموس طراحی شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳ دامنه سیال اطراف ربات زیرسطحی را که در آن دیوارها به اندازه کافی دور از زیرسطحی در نظر گرفته شده است تا در تحلیل نیروها و ممان‌ها تأثیر نداشته باشند، را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نحوه شبکه‌بندی میدان جریان اطراف ربات زیرسطحی ریموس را نشان می‌دهد. جهت استقلال شبکه از چهار نوع شبکه استفاده شده است، که جزئیات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که این نتایج در زاویه حمله ۶ درجه و سرعت ۳ متر بر ثانیه به دست آمده است. برای استقلال شبکه از حل پایا و استاتیکی جهت انتخاب بهترین نوع شبکه استفاده شده است.

قسمت داخلی و خارجی و تعریف دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم زیرسطحی) خواهیم پرداخت.

در شبیه‌سازی ربات زیرسطحی ریموس از نرم‌افزار انسیس CFX استفاده شده است. معادلات حاکم بر این شبیه‌سازی، معادلات ناویر استوکس به روش میانگیری رینولدز (RANS) می‌باشد. مدل آشفتگی کا - امگا (sst-k ω) با بهره‌گیری از حالت گذرا در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه AUV در حال حرکت است، کیفیت شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی نامناسب می‌شود. بنابراین نیازمند انتقال شبکه‌بندی به نرم‌افزار انسیس WB و ایجاد شبکه‌بندی جدید و بازگردانی دوباره به CFX می‌باشد. لازم به ذکر است که از روش تجدید شبکه‌بندی انسیس (AMP) در CFX بهره برده می‌شود. در این روش شرط کیفیت شبکه باعث توقف شبیه‌سازی و انتقال موقعیت مکانی و زاویه‌ای AUV به محیط انسیس WB برای به‌روزرسانی شبکه می‌شود. لازم به ذکر است که زاویه متعام کمتر از ۱۰ درجه در سلول‌های شبکه، معیار کیفیت شبکه می‌باشد. در شبکه‌بندی AUV برای اینکه لایه لزج به حد کافی حل شود، باید فاصله بی‌بعد y^+ به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شود. با توجه به شرایط گفته‌شده در قبل، کیفیت شبکه‌بندی اطراف ربات زیرسطحی بسیار سریع کم می‌شود و در تعداد گام‌های زمانی خیلی کمی برای ادامه شبیه‌سازی نامناسب می‌شود و نیاز به تجدید شبکه پیدا می‌کند. این انتقال هندسه بین CFX و WB بسیار زمان‌بر خواهد بود و نیازمند صرف هزینه زیادی می‌باشد. برای برطرف کردن این مسئله از روش تقسیم کردن میدان جریان به دو قسمت داخلی و خارجی، استفاده شده است. قسمت داخلی یک استوانه اطراف AUV در نظر گرفته می‌شود. استوانه AUV به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود و شبکه‌بندی داخل استوانه برای ادامه شبیه‌سازی ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. شکل (۶) قسمت داخلی که با استوانه مشخص شده است را نشان می‌دهد. در نتیجه فقط قسمت خارجی استوانه که دارای شبکه‌بندی نامنظم و درشت می‌باشد، نیازمند تجدید شبکه است. و چون کیفیت شبکه‌بندی قسمت خارجی خیلی سریع، کم نمی‌شود در نتیجه عملیات تجدید شبکه خیلی زمان‌بر نخواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که شبکه‌بندی قسمت داخلی استوانه فقط یک بار فراخوانی می‌شود و تا انتهای شبیه‌سازی بدون تغییر باقی می‌ماند. قسمت خارجی استوانه که

جهت اعتبارسنجی کد متلب مربوط به تخمین‌گر کالمن فیلتر مانوری در صفحه افقی با سرعت اولیه ۱،۵۴ متر بر ثانیه در جهت طولی، ۳،۸۶ نیوتن نیروی محرک پروانه و ۰،۵۴۳- نیوتن متر گشتاور آن، در ۷۰ ثانیه انجام شده است. برای زاویه بالک‌ها نیز، ابتدا ۱۰ ثانیه زاویه بالک‌ها صفر قرار داده شده، سپس ۴+ درجه تغییر زاویه بالک عمودی رادر^۱ برای ۳۰ ثانیه و پس از آن تغییر زاویه این بالک به ۴- درجه برای ۳۰ ثانیه انجام شده است. از آنجایی که مانور در صفحه افقی صورت می‌گیرد زاویه بالک افقی استرن^۲ در طول مانور مقدار صفر حفظ شده است. این شبیه‌سازی با نتایج پرستو در شکل ۵ با شرایط ذکرشده مقایسه شده است.



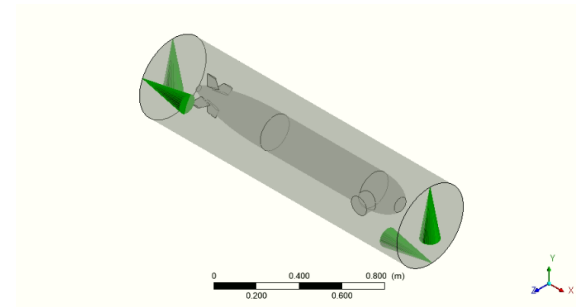
شکل (۵). مقایسه شبیه‌سازی کد متلب مسیر حرکت ربات ریموس با نتایج پرستو

برای گسسته‌سازی دامنه سیال از روش شبکه پیوندی استفاده شده است. به این صورت که در کنار دیواره زیرسطحی از شبکه لایه مرزی سازمان‌یافته و در فاصله دور از بدنه از شبکه بی‌سازمان برای شبکه‌بندی استفاده شده است. شبکه بی‌سازمان به دلیل توانایی آن در تطبیق آسان تغییر شکل شبکه و جایگزینی شبکه به صورت خودکار انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در شبکه‌بندی، کل میدان جریان را به دو قسمت داخلی و خارجی تقسیم شده است. همچنین یک دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم زیرسطحی برای شناسایی موقعیت مکانی و زاویه‌ای در نرم‌افزار انسیس WB تعریف شده است. در قسمت‌های بعدی به توضیح دو مورد قبلی (تقسیم میدان جریان به دو

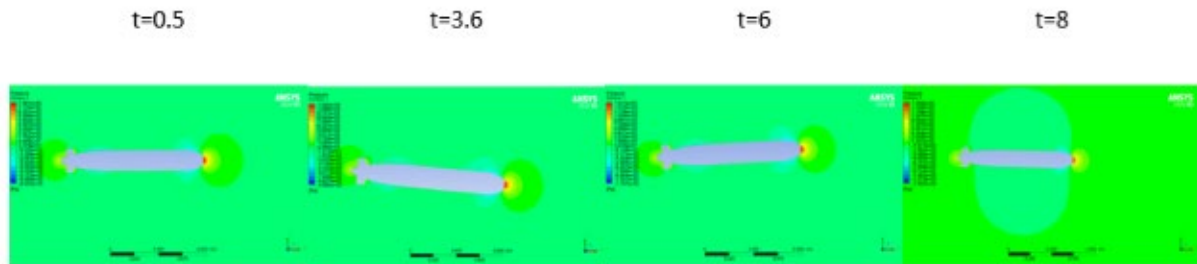
¹ rudder
² stern

همچنین باید توجه داشت که هنگام انتقال هندسه بین دو محیط CFX و ANSYS WB باید مختصات مربوط به موقعیت مکانی و زمانی ربات زیرسطحی ریموس به نرم افزار ANSYS WB ارسال گردد تا در همان موقعیت شبکه بندی جدید انجام شود. برای این منظور دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم AUV را تعریف می کنیم. مانور سینوسی ربات زیرسطحی ریموس در صفحه افقی x-y انجام شده است، که توزیع فشار و سرعت آن در شکل های ۷ و ۸ در ثانیه های ۰/۵، ۳/۶، ۶ و ۸ نشان داده شده است. سرعت های اولیه خطی u ، v و w به ترتیب برابر ۱، ۰ و ۰ می باشند. سرعت های اولیه زاویه ای ϕ ، θ و ψ برابر صفر قرار داده شده اند. برای بالک عمودی رادر در ۰/۸۵ ثانیه اول زاویه ۵+ درجه سپس تا ثانیه ۲/۴ زاویه ۱۵- درجه سپس تا ثانیه ۳/۶ زاویه ۱۵+ درجه و در نهایت تا ثانیه ۸ زاویه ۶- درجه اعمال شده است.

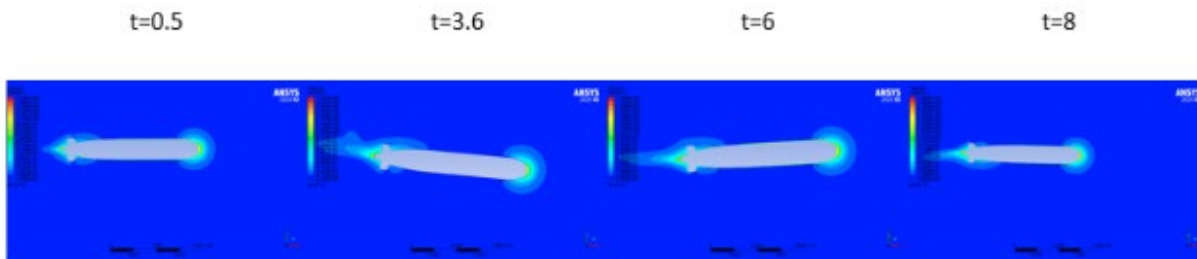
نیازمند تجدید شبکه است از طریق مسیر ذخیره شده ANSYS WB فراخوانی می شود تا در صورت نیاز از طریق همان مسیر به محیط ANSYS WB بازگردد پس از اعمال شبکه بندی جدید به محیط CFX ارسال شود. ملاک کیفیت شبکه برای تجدید شبکه میزان تغییر زوایای هر سلول می باشد که در این شبیه سازی ده درجه در نظر گرفته شده است.



شکل (۶). قسمت داخلی میدان جریان مربوط به ربات زیرسطحی ریموس



شکل (۷). نحوه توزیع فشار و جهت گیری ربات در شبیه سازی مانور سینوسی در ثانیه های ۰/۵، ۳/۶، ۶ و ۸



شکل (۸). نحوه توزیع سرعت و جهت گیری ربات در شبیه سازی مانور سینوسی در ثانیه های ۰/۵، ۳/۶، ۶ و ۸

حضور نویز پرداخته می شود. در این روش نهایتاً ضرایب هیدرودینامیکی تحت بررسی مستقیماً به عنوان خروجی به دست می آیند. البته بایستی بیان نمود هنگامی که در ابتدای طراحی این شناساگر، ضرایب هیدرودینامیکی در بردار متغیرهای حالت اصلی سیستم قرار داده می شوند، ابعاد ماتریس کواریانس خطای حالت، افزایش می یابد. به طوری که

۳-۱- تحلیل روش فیلتر کالمن و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی

در این بخش، با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته به شناسایی مدل غیرخطی سه درجه آزادی یک ربات زیرسطحی با هدف تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در

به بردار حالت، مقادیر مذکور به‌عنوان مقدار اولیه کواریانس خطای تخمین در نظر گرفته شده‌اند. بردار حالت تکمیلی به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$x_f^* = [x, y, u, v, r, \psi, \beta]^T$$

که در آن u ، v و r سرعت‌های شناور با مقادیر اولیه ۱، ۰، ۰ و x و y موقعیت‌های مکانی شناور با مقادیر اولیه ۰ و ۳ و ψ موقعیت زاویه‌ای آن با مقدار اولیه صفر است؛ همچنین β که ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم شناور می‌باشد شامل $\beta = [N_r, N_{\delta r}, N_{\dot{r}}]$ با مقادیر اولیه صفر در نظر گرفته شده‌اند که در آن N_r ضریب گشتاور در راستای z در ازای سرعت زاویه‌ای r ، $N_{\dot{r}}$ ضریب گشتاور در راستای z در ازای شتاب زاویه‌ای \dot{r} و $N_{\delta r}$ ضریب بالک رادر می‌باشند. بردار اندازه‌گیری که شامل داده‌های سرعت و مکان می‌باشد، به‌صورت $[u, v, r, \psi, x, y]$ در نظر گرفته شده و مقادیر آن در هر گام زمانی به داده‌های مربوط به همان زمان جایگزین می‌شود.

معادلات کنترلی در استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، که با کوپل کردن شبیه‌سازی در نرم‌افزار CFX و کد متلب تخمین‌گر فیلتر کالمن، به‌صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_z - N_{\dot{r}}} & \frac{y_G - y_B}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{\delta r} \\ I_z - N_{\dot{r}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

سه ضریب N_r ، $N_{\dot{r}}$ ، $N_{\delta r}$ به‌عنوان ضرایب مجهول در کد تخمین‌گر تعریف شده است. که به ترتیب ضریب گشتاور در راستای z در ازای سرعت زاویه‌ای r ، ضریب گشتاور در راستای z در ازای شتاب زاویه‌ای \dot{r} و ضریب بالک رادر می‌باشند. جهت اعتبارسنجی و مقایسه نتایج از مقادیر اسمی مقاله پرستو استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در تخمین ضرایب و مقایسه آن با مقادیر اسمی در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ مربوط به

اثر منفی بر کارایی تخمین گذاشته و ماتریس ژاکوبین معادله حالت با پیچیدگی مدل نیروهای هیدرودینامیکی پیچیده خواهد شد.

از این‌رو، مشکل بایاس پارامتر در روند شناسایی سیستم که به علت پیچیدگی مدل ریاضی با تعداد فراوان پارامترهای غیرخطی و همچنین اندازه‌گیری آغشته با نویز از متغیرهای حالت، ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن دو عامل مهم و تأثیرگذار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی شناساگر EKF مرتفع گردیده است. عامل اول، مسئله انتخاب صحیح و مناسب مقادیر درایه‌های ماتریس-های کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری می‌باشد، که به‌منظور جلوگیری از واگرایی نتایج EKF، بایستی در انتخاب آن‌ها دقت نمود. در این رابطه بایستی بیان نمود که اگر مقادیر عددی نسبتاً بزرگی برای درایه‌های ماتریس کواریانس نویز انتخاب گردد سبب ایجاد عملکرد نوسانی تخمین حول مقدار واقعی می‌شود، در مقابل انتخاب مقادیر عددی کوچک برای ماتریس کواریانس نویز سبب ایجاد بایاس در تخمین پارامترهای مجهول تحت بررسی می‌گردد. عامل دوم، مسئله انتخاب یک ساختار مناسب برای ماتریس کواریانس نویز فرآیند می‌باشد.

بعد از انجام مانور و گرفتن خروجی‌های مربوط به موقعیت و سرعت ربات، این خروجی‌ها به‌عنوان ورودی به کد تخمین‌گر فیلتر کالمن وارد می‌شود و سپس ضرایب ممکن و قابل‌دستیابی مرتبط با این مانور را استخراج می‌کنیم. کواریانس نویز فرآیند (Q) و نویز اندازه‌گیری (R) به‌صورت فرم قطری که درایه‌های آن متناسب با حالات خروجی اصلی سیستم و حالات مکمل (β) اضافه‌شده به سیستم به دو زیربخش با مقادیر عددی متفاوت به‌صورت $Q_1 \in R^{3 \times 3} \neq Q_2 \in R^{3 \times 3}$ با $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2) \in R^{6 \times 6}$ (عدد ۳ و ۳ به ترتیب بیانگر تعداد حالات خروجی اصلی سیستم و پارامترهای نامعلوم مدل می‌باشد) تقسیم می‌شوند، انتخاب شده است. کواریانس خطای تخمین (p) نیز به‌صورت ماتریس قطری با مقادیر اولیه قطر اصلی صفر برای حالات اندازه‌گیری شده و مقدار ۱۰ و ۱۰۰ برای ضرایب هیدرودینامیکی مجهول لحاظ شده است. قابل‌ذکر است که با توجه به مشخص بودن مقدار اولیه حالات اندازه‌گیری و نامشخص بودن ضرایب هیدرودینامیکی افزوده‌شده

۴- نتیجه گیری

استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ربات زیرسطحی ریموس در مانور سینوسی انجام شده است. در صفحه افقی $x-y$ مانور سینوسی صورت گرفته است که یک ضریب با درصد خطا ۱۶ درصد تخمین زده شد، دو ضریب دیگر با دقت نزدیک به ۱ درصد تخمین زده شده است.

برای استخراج هر ضریب هیدرودینامیکی ربات زیرسطحی می توان مانور خاصی را انجام داد. اما این کار برای استخراج تمام ضرایب هیدرودینامیکی امری زمان بر و طولانی خواهد بود. در استخراج ضرایب هیدرودینامیکی استفاده از مانورهای پیچیده جهت تخمین ضرایب از اهمیت بالایی برخوردار است. مانور انجام شده در این مقاله در سه درجه آزادی صورت گرفته است. لازم به ذکر است می توان از مانورهای با شش درجه آزادی برای تخمین ضرایب بیشتر استفاده کرد. همچنین استفاده از معادلات کنترلی به صورت ماتریسی سبب افزایش دقت استخراج ضرایب به میزان قابل توجهی شده است. که برخی از ضرایب با درصد خطا ۱ درصد تخمین زده شده است.

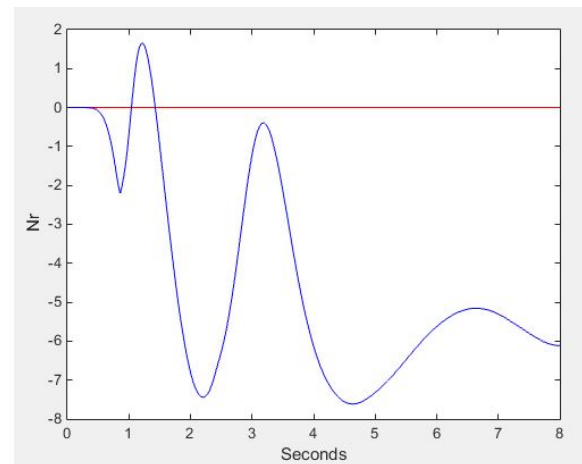
۵- مراجع

1. Lin, Z., and Liao, S. "Calculation of Added Mass Coefficients of 3D Complicated Underwater Bodies by FMBEM", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, PP. 187-194, 2011.
2. Ghassemi, H., and Yari, E. "The Added Mass Coefficient Computation of Sphere", Ellipsoid and Marine Propellers Using Boundary Element Method, Polish Maritime Research, Vol. 18, No. 1, pp. 17-26, 2011.
3. Jagadeesh, P., and Murali, K." Experimental Investigation of Hydrodynamic Force Foefficients over AUV Hull form", Journal Article Published Jan 2009 in Ocean Engineering Volume 36 issue 1 on pages 113 to 118.
4. Lee, S. K., Joung, T. H., Cheo, S. J., Jang, T. S. and Lee, J. H. "Evaluation of the Added Mass for a Spheroid-type Unmanned Underwater Vehicle by Bertical Planar Motion Mechanism Test", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 174-180, 2011.

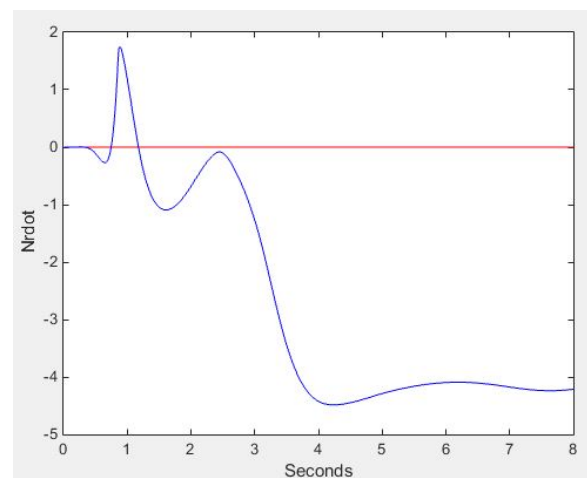
تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در مانور سینوسی شبیه سازی شده در نرم افزار CFX می باشد.

جدول (۳). نتایج حاصل از تخمین سه ضریب هیدرودینامیکی با شبیه سازی در نرم افزار CFX

ضریب	مقدار اسمی	مقدار تخمین زده شده	درصد خطا
N_r	-۶/۸۷	-۶/۱۱	۱۰
$N_{\dot{r}}$	-۴/۸۸	-۴/۲۱	۹



شکل (۹). تخمین ضریب N_r با تخمین گر فیلتر کالمن در شبیه سازی مانور با نرم افزار CFX



شکل (۱۰). تخمین ضریب $N_{\dot{r}}$ با تخمین گر فیلتر کالمن در شبیه سازی مانور در نرم افزار CFX

13. Kim, J., Kim, K., Choi, H. S., Seong, W., and Lee, K.Y. "Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 830-840, 2002.
14. Luque, J. C., and Donha, D.C. "Auv Identification and Robust Control", in Proceeding of.
15. Araki, M., Sadat-Hosseini, H., Sanada, Y., Tanimoto, K., Umeda, N., and Stern, F. "Estimating Maneuvering Coefficients Using System Identification Methods with Experimental, System-Based, and CFD Free-Running Trial data", Ocean Engineering, Vol. 51, pp. 63-84, 2012.
16. Sabet, M. T., Sarhadi, P., and Zarini, M. "Extended and Unscented Kalman Filters for Parameter Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle", Ocean Engineering, Vol. 91, pp. 329-339, 2014.
17. Sabet, M.T., Daniali, H. M., Fathi, A., and Alizadeh, E. "Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Hydrodynamic Model Using the Extended, Cubature, and Transformed Unscented Kalman filter", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 457-467, 2018.
18. Sajedi, y., and Bozorg, M. "Robust Estimation of Hydrodynamic Coefficients of an AUV Using Kalman and H_∞ filters", Journal Article, Ocean Engineering, pp 386 to 394, Jun 2019.
19. Prestero, T. T. J. "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001. -
20. Myring, D. "A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow", The Aeronautical Quarterly, Vol. 27, No. 3, pp. 186-194, 1976.
5. CAN, M. "Numerical Simulation of Hydrodynamic Planar Motion Mechanism Test for Underwater Vehicles", Thesis, Middle East Technical University, 2014
6. Ray, S., and Chatterjee, D. "Unsteady CFD Simulation of 3D AUV Hull at Different Angles of Attack", Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, December, 2016.
7. Li, B. "Dynamics and Control of Autonomous Underwater Vehicles with Internal Actuators", Thesis, Florida Atlantic University, 2016.
8. Arani, H.A., and Mahdi, M. "Numerical Analysis of Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the AUV Hydrodynamic Derivatives in the Pure Heave Motion", Underwater Engineering Journal Vol. 1, pp. 63-73, 2016.
9. Kim, H., Ranmuthugala, D., Leong, Z.Q., and Chin, C. "Six-DOF Simulations of an Underwater Vehicle Undergoing Straight Line and Steady Turning Manoeuvres", Ocean Engineering, Vol. 150, pp. 102-112, 2018.
10. Nouri, N. M., and Mostafapour, K. "CFD Modeling of Wing and Body of an AUV for Estimation of Hydrodynamic Coefficients", Journal Article Published 1 Nov 2016 in Journal of Applied Fluid Mechanics volume 9 issue 6 on pages 2717 to 2729.
11. DU, X., and ZHENG, Z. " Numerical Calculation of Hydrodynamic Interactions of Submarine Flow on AUV", Proceedings Article published May 2018 in 2018. OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO).
12. Alessandri, A., Caccia, M., Indiveri, G., and Veruggio, G. "Application of LS and EKF Techniques to the Identification of Underwater Vehicles", in Proceeding of, 1084-108.