

تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک بیضی گون با ترکیب فیلتر کالمن توسعه یافته‌ی هیبریدی (HEKF) و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

محمد راسخ (کارشناس ارشد)

میراعلم مهدی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۳-۳۶، شماره‌ی ۱، ص. ۱۰۸-۹۹

در پژوهش حاضر، که بر اساس ترکیب رؤیت‌گر غیرخطی فیلتر کالمن هیبریدی (HEKF) و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است، تمامی ضرایب هیدرودینامیکی یک بیضی گون در صفحه‌ی افقی تخمین زده می‌شود. برای این کار، ابتدا یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس CFX و با بهره‌گیری از الگوریتم تجدید شبکه در روش شبکه‌ی متحرک توسعه داده شده است. با استفاده از این شبیه‌سازی و انجام محاسبات مربوطه، تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمد. سپس با کمک کد شبیه‌سازی شده‌ی فیلتر کالمن هیبریدی در محیط نرم‌افزار متلب و اعمال معادلات حرکتی حاکم بر یک جسم بیضی گون، ضمن به کارگیری از اطلاعات مکانی و سرعتی به دست آمده از مانور بیضی گون در محیط CFX، دیگر ضرایب هیدرودینامیکی مجهول تخمین زده شد. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی حاکی از تطابق خوب ضرایب جرم افزوده‌ی تخمینی از مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر تحلیلی موجود است.

واژگان کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، فیلتر کالمن، دینامیک سیالات محاسباتی، بیضی گون، شبکه‌ی متحرک.

m.rasekh@sru.ac.ir
m.mahdi@sru.ac.ir

۱. مقدمه

می‌توان به مانورهای تجربی مانند سازوکار حرکت صفحه‌ی (PMM) و سازوکار حرکت مخروطی (CMT) اشاره کرد.^[۳] انجام این آزمایش‌ها به صورت تجربی متحمل صرف هزینه و زمان فراوان به خصوص در مراحل اولیه‌ی طراحی است، اما اخیراً با پیشرفت چشمگیر تکنولوژی محاسباتی و باوغ فزاینده‌ی روش‌های عددی، به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان ابزاری قدرتمند و کم‌هزینه در استخراج اغلب ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله‌ی زیرسطحی از طریق شبیه‌سازی روند تجربی میسر شده است.^[۴]

در سال ۲۰۱۱، ضرایب جرم افزوده‌ی یک بیضی گون در جهت هیو^۱ و پیچ^۲، با شبیه‌سازی سازوکار حرکت صفحه‌ی عمودی (VPMM) مدل در محیط CFD و از طریق کد تجاری انسیس CFX و اعتبارسنجی ضرایب استخراجی با موارد مشابه آن در روش تحلیلی تخمین زده شد.^[۵] همچنین در سال ۲۰۱۳، برخی ضرایب استاتیکی، دینامیکی و جرم افزوده‌ی یک زیرسطحی بیضی گون با شبیه‌سازی سازوکار حرکت صفحه‌ی افقی (HPMM) مدل در محیط CFD، با استفاده از شبکه‌ی متحرک و به وسیله‌ی نرم‌افزار تجاری فلوئنت^۴ تخمین زده شد.^[۶]

علاوه بر این در سال ۲۰۱۶، ضرایب دمینگ خطی یک زیردریایی نوع ساب‌آف^۵ از طریق شبیه‌سازی آزمون‌های تجربی بازوی دوار (RA) و PMM در محیط CFD استخراج^[۷] بررسی شد. در سال ۲۰۱۷، ضرایب دمینگ^۶ خطی

شناورهای زیرسطحی هوشمند (AUVs) در انجام کاوش‌های دریایی و نیز در کاربردهای صنعتی و نظامی محبوبیت روزافزونی یافته‌اند. این نوع شناورها با توجه به هزینه‌ی پایین ترشان - به خصوص برای جستجوی زیر دریا و عملیات نظارت - در مقایسه با شناورهای با سرشنین^۱، گزینه‌ی قابل توجه با جذابیت روزافزون‌اند.^[۱] برای برآورده کردن انتظارات در حیطه‌ی این اهداف، باید سرعت، پایداری، مانورپذیری، کنترل و ... شناورهای طراحی شده‌ی جدید نسبت به مدل‌های حال حاضر برتری داشته باشد. درک خصوصیات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی، که به نوبه‌ی خود با یک بررسی دقیق از معادلات دیفرانسیلی حاکم بر حرکت وسیله سروکار دارد، به عنوان یک پیش‌نیاز برای تحلیل طرح‌های جدید محسوب می‌شود.^[۲] در این معادلات، نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی در قالب ضرایب و مشتقات، که به مشتقات استاتیکی، چرخشی و مشتقات شتاب دسته‌بندی می‌شود، ظاهر می‌شوند. مشتقات استاتیکی به دلیل سرعت خطی وسیله، چرخشی به دلیل سرعت زاویه‌ی و مشتقات شتاب به دلیل شتاب خطی و زاویه‌ی هستند. از جمله روش‌های توسعه‌یافته در جهت شناسایی ضرایب هیدرودینامیکی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۷/۲۶، پذیرش ۱۳۹۸/۸/۴

DOI:10.24200/J40.2019.53476.1515

یک بالگرد زیرسطحی هوشمند (AUH) از طریق شبیه‌سازی مانورهای مختلف تجربی در محیط نرم‌افزار انسیس CFX برآورد شد.^[۸] همچنین در سال ۲۰۱۷، عملکرد هیدرودینامیکی بدنه‌ی یک AUV متقارن با ابزار CFD در محیط استار CCM+ بررسی^[۹] و با روابط نیمه‌تحلیلی مقایسه شد. نتایج آنها حاکی از دقت بالاتر CFD در به دست آوردن نیروهای وارد بر شناور به خصوص در زوایای حمله‌ی بالاتر در مقایسه با روابط نیمه‌تحلیلی است. سپس در سال ۲۰۱۸ برخی ضرایب هیدرودینامیکی یک نوع کشتی با استفاده از CFD و شبیه‌سازی حرکت PMM در نرم‌افزار این‌فوم^۷ استخراج شد.^[۱۰] مقایسه‌ی ضرایب به دست آمده با نتایج تجربی موجود حاکی از دقت قابل قبول این نرم‌افزار در شبیه‌سازی مانور مربوطه است. اخیراً نیز در سال ۲۰۱۹ محققین نیروهای وارد بر یک کشتی در حال مانور در زوایای مختلف بالک را با کمک ابزار CFD محاسبه کرده‌اند^[۱۱] که نتایج آنها با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد.

در پژوهش‌های ذکر شده در بالا که به منظور استخراج ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی‌ها و کشتی‌ها استفاده شده است، اگرچه مشکل هزینه و کاهش دقت روش‌های تجربی حل شده، هنوز هم استفاده از روش‌های CFD به تنهایی تا حدودی زمان‌بر است و استخراج ضرایب مختلف نیازمند مانورهای متنوعی است. در کنار این مشکلات تاکنون پژوهش‌های موجود در این زمینه بیشتر بر مانورهای استاتیکی متمرکز است و تلاش قابل توجهی در جهت شبیه‌سازی مانورهای دینامیکی و ناپایا شده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که همچنان روش‌های CFD در استخراج تمام ضرایب هیدرودینامیکی ناتوان‌اند.

سیستم‌های دینامیکی عموماً نیاز به اطلاعات دقیقی برای کنترل‌پذیری موفق آنها دارند. بنابراین، موفقیت در یک روش کنترلی به طرز چشمگیری به دقت پارامترهای مدل ریاضی استفاده شده برای توصیف سیستم دینامیکی وابسته است. یکی از روش‌های مقابله با نمایش ضعیف مدل ریاضی، استفاده از کنترل مقاوم است که از پرکاربردترین آنها که پیش از این بر کنترل شناورهای زیرسطحی نیز اعمال شده است می‌توان به H_{∞} ، H_2 ، LQG/LTR، H_{∞} ، سنتز میو^۸، LMI و ... اشاره کرد.^[۱۲-۱۴] همچنین، این واقعیت که خصوصیات عملکردی و پایداری یک سیستم کنترل شده با دقتی تر شدن مدل‌ها بهبود می‌یابد، به خوبی مشاهده شده است. اگرچه ابزار ریاضی و قوانین فیزیکی معمولاً به خلق یک مدل ریاضی مناسب کمک می‌کند، اما برای شناورهای زیرسطحی اغلب پارامترها به وسیله‌ی یک تحلیل هیدرودینامیکی معتبر قابل دسترس نیستند و آزمایشات تجربی و ارتباط آنها با روش‌های تخمین پارامتر مورد نیاز است.^[۱۵، ۱۶]

از جمله مطالعات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به تخمین برخی ضرایب استاتیکی و دینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند نوع NPS AUV II به وسیله‌ی دو نوع از تخمین‌گرهای غیرخطی EKF^[۱۷] و SMO^[۱۸] و نیز استفاده از تخمین‌گرهای EKF و UKF در به دست آوردن تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند نوع ریموس^[۱۹] اشاره کرد. در هر دو پژوهش ذکر شده، اعتبار نتایج به دست آمده از تخمین‌گرها با نتایج تجربی موجود سنجیده و تأیید شده است. از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به تخمین برخی ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی‌های نوع ISIMI و NPS AUV II با بهره‌گیری از مدل نوین آرما^{۱۰} در تخمین‌گر^[۱۹] EKF و استفاده از داده‌های تجربی موجود برای مقادیر اندازه‌گیری تخمین‌گر اشاره کرد. ضرایب تخمینی به دست آمده از پژوهش آنها، در مقایسه با مقادیر تحلیلی و تجربی موجود، از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است. در سال ۲۰۱۷، در پژوهشی بر AUV نوع MT-۲۰۱۰ و MT-۲۰۱۲

و استفاده از نرم‌افزار هیدرودینامیک مجازی^{۱۱} برای اندازه‌گیری‌های بردار حالت^[۲۰] محققین توانستند برخی خواص هیدرودینامیکی شناور مذکور را با کمک روش شناسایی سیستم به دست آورند. در همین سال، با استفاده از روش شناسایی سیستم، برخی ضرایب هیدرودینامیکی یک کشتی کانتینربر^{۱۲} در سه درجه آزادی محاسبه شد.^[۲۱] نتایج حاصله که از داده‌های آزمایش تجربی کشتی مذکور نیز بهره می‌برد حاکی از دقت بسیار خوب مسیر تخمینی با مسیر واقعی است. اخیراً نیز در سال ۲۰۱۸، محققین تعداد ۲۲ ضریب هیدرودینامیکی یک نوع AUV را با استفاده از تخمین‌گرهای EKF، CKF و TUKF استخراج کرده‌اند^[۲۲]؛ این ضرایب که با کمک اندازه‌گیری‌های تجربی به دست آمده و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نشان داد که هر سه تخمین‌گر از دقت بسیار خوبی در تخمین ضرایب برخوردارند. در سال ۲۰۱۹، پارامترهای مانور یک UMV با کمک تخمین‌گر EKF و با استفاده از معادلات غیرخطی حاکم بر شناور مربوطه محاسبه شد.^[۲۳] نتایج آنها به عنوان مرجعی برای طراحی الگوریتم کنترل حرکت UMV مذکور در نظر گرفته شد.

در سال ۲۰۱۹، برخی مشتقات هیدرودینامیکی یک کشتی حامل فله^{۱۳} در سه درجه آزادی با استفاده از تکنیک شناسایی سیستم EKF تخمین زده شد^[۲۴] که با استفاده از کدنویسی در محیط فورترن^{۱۴} و ضمن استفاده از داده‌های مانور تجربی صورت گرفته، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی خطایی کم‌تر از ۱۳ درصد نشان می‌دهد.

پژوهش‌های یاد شده به منظور تخمین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی‌ها و کشتی‌ها با روش‌های شناسایی سیستم و استفاده از تخمین‌گرها با وجود دقت و سرعت بسیار خوب، هنوز منجر به استخراج برخی ضرایب از جمله جرم افزوده نشده است. همچنین در این پژوهش‌ها از داده‌های اندازه‌گیری تجربی برای اعمال در تخمین‌گرها استفاده می‌شود که نیازمند صرف هزینه‌های گزاف و به ناچار وارد کردن خطاهای حسگر در مسئله است.

با وجود دقت و سرعت نسبتاً بالای تخمین‌گرها در به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی، اما به دلیل وابستگی تخمین‌گرها به داده‌های سرعت و مکان که باید از نتایج آزمون تجربی استخراج شود و همچنین با توجه به محدودیت آنها در به دست آوردن تعداد محدودی از ضرایب هیدرودینامیکی، این روش به تنهایی نمی‌تواند منجر به استخراج معادلات حرکتی یک شناور زیرسطحی با ضرایب مجهول شود. از طرف دیگر، روش CFD نیز هنوز قادر به استخراج تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی نبوده و استخراج تمام ضرایب قابل حصول نیز نیازمند شبیه‌سازی مانورهای متعدد و صرف زمان زیاد است.

در پژوهش حاضر، استفاده از داده‌های CFD حاصل از شبیه‌سازی مانور مورد نظر که دقت نسبتاً بالایی دارد، به جای استفاده از داده‌های تجربی در روابط تخمین‌گرها پیشنهاد شده است. همچنین برای استخراج تمام ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی در صفحه‌ی افقی استفاده‌ی ترکیبی از تخمین‌گر و CFD ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل گسسته بودن مقادیر اندازه‌گیری CFD و غیرخطی و پیوسته بودن معادلات حرکتی شناور، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته‌ی هیبریدی^[۲۵] (HEKF) در مطالعه‌ی پیش رو استفاده شده است. در این پژوهش، ابتدا به وسیله‌ی منحنی‌های ضرایب درگ (C_D)، لیفت (C_L) و مومنتم (C_M)، که از CFD و با شبیه‌سازی استاتیکی شناور در نرم‌افزار CFX به دست می‌آید و نیز استفاده از تقارن هندسه، برخی ضرایب هیدرودینامیکی استخراج می‌شوند. سپس با شبیه‌سازی حرکت مستقیم‌الخط در CFX و استفاده از داده‌های سرعت، شتاب و نیروی درگ، ضریب جرم افزوده‌ی

از ساده سازی در روابط ۲، با توجه به تقارن هندسه، داریم:

$$Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}}; \quad X_{rrr} = -Y_{\dot{r}}; \quad X_{vrr} = -Y_{\dot{v}}; \quad Y_{ur} = X_{\dot{u}}; \\ N_{uva} = -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}); \quad N_{ur} = Y_{\dot{r}}; \quad (4)$$

همچنین با استناد به مطالعات موجود^[۲۷] می توان نوشت:

$$X_{uu} = -\frac{1}{\rho} (\rho A_f) c; \quad X_{uv} = -\left(\frac{1}{\rho} \rho A_f\right) b; \\ X_{vv} = -\left(\frac{1}{\rho} \rho A_f\right) \left(a + \frac{c}{\rho}\right); \quad Y_{vv} = \left(\frac{1}{\rho} \rho A_f\right) b; \\ Y_{uvd} = \left(\frac{1}{\rho} \rho A_f\right) c; \quad Y_{uvl} = \frac{1}{\rho} \rho A_f C_{L\alpha}; \\ N_{uvl} = \frac{1}{\rho} \rho A_f C_{M\alpha}; \quad (5)$$

که در آن چگالی سیال و A_f سطح مقطع جلویی زیرسطحی است. همچنین $C_{M\alpha} = \frac{\partial C_M}{\partial \alpha}$ و $C_{L\alpha} = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ و ضرایب a ، b و c از رابطه ی سهموی ضریب درگ (C_D) برحسب زاویه ی حمله α به دست می آید:

$$C_D = a\alpha^2 + b\alpha + c \quad (6)$$

ضمن این که ضرایب C_D ، C_M و C_L به صورت نمودارهایی بر حسب α از CFD قابل استخراج است که در بخش بعد به آن خواهیم پرداخت.

۲.۲. معادلات تخمین گر HEKF

از آنجاکه نیروها و ممان های خارجی اعمال شده به زیرسطحی تابع ضرایب هیدرودینامیکی هستند، این ضرایب دینامیک شناور را مشخص می کنند. روش شناسایی بر اساس تعداد محدودی از اندازه گیری های زمان گسسته ی بردار خروجی سیستم $\{y(t_k)\}_{k=1}^N$ و بردار معلوم ورودی سیستم $\{u(t_k)\}_{k=1}^N$ است. به دلیل نبود ارتباط بین ابعاد ورودی ها و خروجی ها و ابعاد ضرایب هیدرودینامیکی مجهول، این ضرایب مستقیماً قابل ارزیابی نیستند.^[۲۸] مسایل تخمین معمولاً در قالب خطای تخمین ظاهر می شوند. محققین کوشیده اند تا تابع احتمال بردار پارامترهای نامعلوم به بیشترین مقدار خود برسد^[۲۹] که این عمل در واقع همان کمینه کردن تابع هزینه است:

$$J(\theta) = \det \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon(t_k) \cdot \varepsilon(t_k)^T \quad (7)$$

که در آن، $\varepsilon(t_k)$ بردار خطای تخمین در زمان t_k و معادل اختلاف بین بردار اندازه گیری $y(t_k)$ و بردار تخمین اندازه گیری $\hat{y}(t_k)$ در هر محله است:

$$\varepsilon(t_k) = y(t_k) - \hat{y}(t_k) \quad (8)$$

برای مسایل فیلترینگ غیرخطی، EKF یکی از کارآمدترین ابزار است.^[۳۰] این فیلتر بر اساس خطی سازی مدل و اندازه گیری ها با استفاده از توسعه ی سری تیلور عمل می کند. با استفاده از EKF می توان با اضافه کردن پارامترهای نامعلوم به عنوان متغیرهای حالت، آنها را تخمین زد.^[۲۵] در واقع بسیاری از سیستم های مهندسی به وسیله ی دینامیک زمان پیوسته اداره می شوند در حالی که اندازه گیری ها در زمان های لحظه ای گسسته فراهم می شوند. به همین دلیل نمی توان از فرم گسسته یا پیوسته ی EKF برای این مسایل استفاده کرد. در این بخش معادلات هیبریدی EKF یا همان HEKF

حرکت خطی در جهت طولی^{۱۵} به دست می آید. سپس با اعمال معادلات حرکتی بیضی گون در روابط تخمین گر HEKF و استفاده از داده های مکان و سرعت شناور مربوطه، مستخرج شده از CFD از طریق شبیه سازی دینامیکی و شش درجه آزادی شناور در نرم افزار CFX، سایر ضرایب مجهول بیضی گون حاصل می شود. لازم به ذکر است که برای شبیه سازی دینامیکی شناور از ابزارهای شبکه ی متحرک و تجدید شبکه استفاده شده است. نهایتاً، برای اعتبارسنجی، ضرایب جرم افزوده ی به دست آمده از این روش نوین با نتایج تحلیلی موجود مقایسه می شود.

۲. معادلات حاکم

۱.۲. معادلات حرکتی زیرسطحی

مدل سازی یک زیرسطحی، به دلیل ماهیت نیروهای هیدرودینامیکی، با گشتاورها^{۱۶} و عبارات غیرخطی در مدل های مختلف سروکار دارد. با در نظر گرفتن معادله ی فضای حالت غیرخطی ۱ داریم:

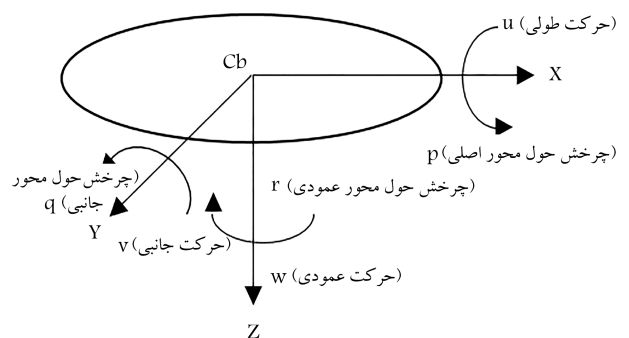
$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

که در آن، x و u به ترتیب نمایانگر بردارهای حالت و سرعت است. با استفاده از سیستم مختصات جسم ثابت، که در شکل ۱ نشان داده شده و همچنین معادلات نیوتن - اولر، معادلات حرکتی یک زیرسطحی بیضی گون در صفحه ی افقی چنین نمایش داده می شود:^[۲۶]

$$m(\dot{u} - vr) = -(W - B) \sin \theta + X_{uu}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} \\ + X_{vrv}vr + X_{rrr}rr + X_{prop} \\ m(\dot{v} + ur) = -(W - B) \cos \theta \sin \varphi + Y_{vv}v|v| \\ + Y_{rrr}r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv \\ I_{zz}\dot{r} = N_{vv}v|v| + N_{rrr}r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur} \\ + N_{uv}uv \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، ضرایب N_{uv} و Y_{uv} تجزیه می شوند:

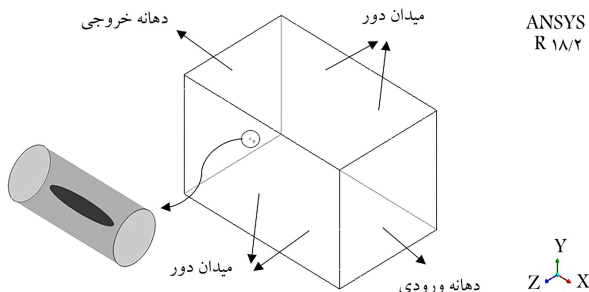
$$Y_{uv} = Y_{uvd} + Y_{uvl}; \quad N_{uv} = N_{uva} + N_{uvl}; \quad (3)$$



شکل ۱. سیستم مختصات جسم ثابت.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیال و شناور.

۵۰	جرم شناور (kg)
۳٫۷	مان اینرسی بیضی گون حول y ($kg.m^2$)
۱٫۲	طول شناور (m)
۱۰۲۵	چگالی سیال kg/m^3
۰٫۰۰۰۹	لزجت دینامیکی ($N.s/m^2$)



شکل ۲. دامنه‌ی سیال محاسباتی حول بیضی گون در شبیه سازی CFD.

۳. شبیه سازی به روش CFD

در این مطالعه به شبیه سازی حرکت یک بیضی گون با نسبت ۶:۱ در آب دریا با خواص نیوتنی پرداخته شده است. شبیه سازی به وسیله‌ی نرم افزار انسیس CFX نسخه‌ی ۲۰۱۸ که یک کد CFD تجاری است، انجام گرفته است. در این تحلیل، معادلات ناور - استوکس به روش میان گیری رینولدز (RANS) با کمک مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کالامگا (ω -SSTk) با بهره گیری از رویکرد حالت پایا و ناپایا برای حل به کار گرفته شده است. در حالت گذرا گام زمانی ۰.۰۱ ثانیه و تعداد تکرار برای هر گام زمانی ۱۰ لحاظ شده است. مشخصات کامل سیال و شناور مورد بررسی در جدول ۱ آمده است.

شکل ۲ محدوده‌ی سیال محاسباتی را در یک مرجع قاب ثابت که مرکز آن بر مرکز شناوری زیرسطحی قرار گرفته، نشان می دهد. مرزهای دامنه‌ی دور در فاصله‌ی شش برابری طول جسم قرار گرفته اند تا از نداشتن تأثیر مرزها بر جریان حول زیرسطحی مطمئن شده و دنباله‌ی زیرسطحی نیز به حد کافی در دامنه برطرف شود. جریان در ورودی به نحوی تعیین شده است که با سرعت مطلوب زیرسطحی تطابق داشته باشد، درحالی که مرز خروجی به صورت دهانه‌یی با فشار نسبی صفر انتخاب شده است. سطوح شناور به صورت دیواره‌هایی با شرط عدم لغزش تعیین شده و سایر مرزها به صورت دیواره‌هایی با شرط لغزش آزاد مقرر شده است. بیضی گون در فاصله دارد و در این حالات هیچ گونه تأثیری از طرف مرزها از جمله ورودی و خروجی نمی پذیرد. میدان جریان به دو بخش تقسیم شده است: یک زیر دامنه برای نواحی اطراف زیرسطحی و یک دامنه‌ی خارجی برای سایر نواحی. تقسیم دامنه، به هر بخش امکان شبکه بندی و بهبود آن را به صورت جدا گانه می دهد. برای اطمینان از پیوستگی تمام قلمرو، بخش های مجزا به وسیله‌ی رابط شبکه‌ی عمومی (GGI)، که یک عملکرد در انسیس CFX است و از اندازه‌های مشابه شبکه در سطوح اتصال‌ی استفاده می کند، به هم پیوند شده اند.^[۳۲]

برای گسسته سازی دامنه‌ی سیال از روش شبکه‌ی پیوندی استفاده شده است. بدین صورت که کنار دیواره، شبکه‌ی لایه‌ی مرزی استفاده شده و دور از بدنه، شبکه بندی به صورت بی سازمان انجام شده است. شبکه‌ی بی سازمان به دلیل توانایی آن در

که سیستم‌ها را با دینامیک زمان پیوسته و اندازه گیری‌ها را به صورت زمان گسسته در نظر می گیرد، استخراج می شوند. با در نظر گرفتن یک سیستم غیرخطی زمان پیوسته حاوی پارامترهای نامعلوم با اندازه گیری‌های زمان گسسته:

$$\dot{x}(t) = f(x, u, \beta, t) + w(t) \quad (9)$$

$$y_k = h(x_k, \beta_k, k) + v_k \quad (10)$$

که در آن، $x \in R^n$ بردار حالت، $y \in R^m$ بردار اندازه گیری، $\beta \in R^p$ بردار پارامترهای نامعلوم، u بردار ورودی سیستم، w نویز فرایند^{۱۷} و v نویز حسگر^{۱۸} هستند. برای تخمین پارامترهای نامعلوم، این پارامترها به بردار حالت x افزوده شده و بردار حالت تکمیلی x^* تعریف می شود. بنابراین، معادلات ۹ و ۱۰ سیستم تبدیل می شوند به:

$$\dot{x}^*(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, u, \beta, t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$y_k = h(x_k^*, k) + v_k \quad (12)$$

که در آن $w \in R^n$ ، $\eta \in R^p$ و $v \in R^m$ نویز سفید گوسی^{۱۹} و $x^* \in R^{n+p}$ بردار حالت تکمیلی است. گام فیلتر کالمن توسعه یافته‌ی هیبریدی برای سیستم بالا، با استفاده از زمان نمونه برداری یکنواخت $T = t_k - t_{k-1}$ ، چنین بیان می شود:^[۳۱]

به روزرسانی زمانی:

$$\hat{x}_{k+1}^*(-) = f(\hat{x}_k^*(+), k) \quad (13)$$

$$\dot{P} = A^* P A^{*T} + L Q L^T \quad (14)$$

به روزرسانی اندازه گیری:

$$K_k = P_k(-) H_k^{*T} [H_k^* P_k(-) H_k^{*T} + M_k R_k M_k^T]^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_k^*(+) = \hat{x}_k^*(-) + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_k^*(-), k)] \quad (16)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k^*] P_k(-) [I - K_k H_k^*]^T + K_k M_k R_k M_k^T K_k^T \quad (17)$$

که در آن،

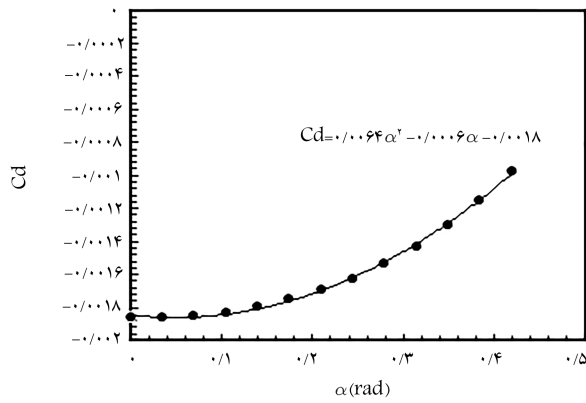
$$A_k^* = \left. \frac{\partial f(x^*, k)}{\partial x^*} \right|_{x^* = \hat{x}_k^*(+)} ; \quad L = \left. \frac{\partial f(x^*, k)}{\partial w} \right|_{x^* = \hat{x}_k^*(+)} \quad (18)$$

$$H_k^* = \left. \frac{\partial h(x^*, k)}{\partial x^*} \right|_{x^* = \hat{x}_k^*(-)} ; \quad M = \left. \frac{\partial h(x^*, k)}{\partial v} \right|_{x^* = \hat{x}_k^*(-)} \quad (19)$$

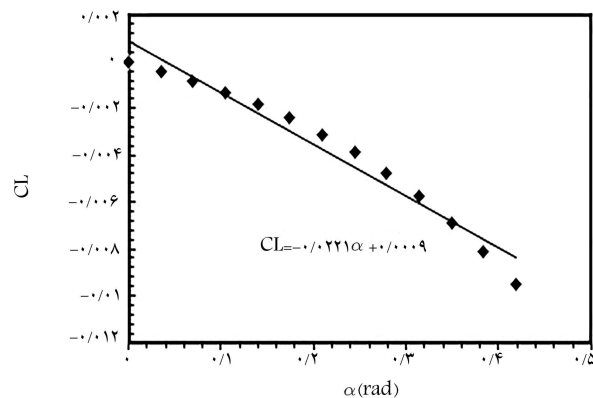
$E(v(t)v(t)^T) = R$ ، $E(w(t)) = 0$ ، $E(w(t)w(t)^T) = Q$ و $E(v(t)) = 0$ ، P کواریانس خطای تخمین و Q کواریانس نویز فرایند هستند. ماتریس بهره K از معادله‌ی ریکاتی و کواریانس خطای اندازه گیری R از معادله‌ی لیاپونوف قابل تعیین است. به روزرسانی اندازه گیری روابط ۱۸ تا ۲۰ منعکس کننده‌ی روند اندازه گیری از طریق ماتریس بهره K است.^[۳۲] هنگامی که ضرایب هیدروپدینامیکی به بردار حالت افزوده می شوند، بعد بردار حالت تکمیلی افزایش یافته و بنابراین پیچیدگی‌های محاسباتی مانند یکتایی^{۲۰} ماتریس ژاکوبین در EKF پدیدار خواهد شد.^[۳۳]

برقرار شده که در صورت پایین آمدن کیفیت شبکه از یک مقدار مشخص، شبکه اصلاح و دوباره به حلگر منتقل می‌شود. به عبارتی یک رفت و برگشت شبکه بین نرم‌افزار CFX و نرم‌افزار تولید شبکه انجام می‌شود.

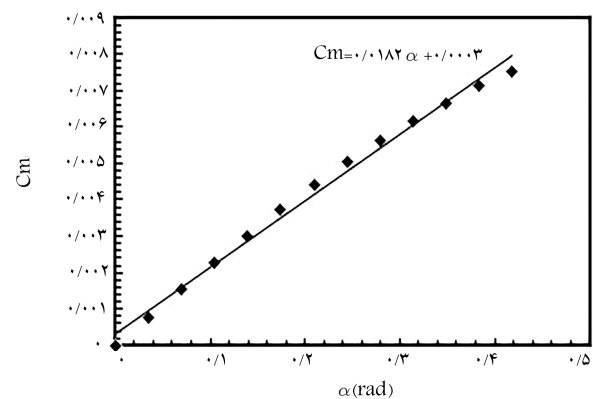
منحنی‌های C_D ، C_L و C_M که از طریق شبیه‌سازی استاتیکی در زوایای حمله‌ی مختلف در محیط نرم‌افزار CFX به دست آمده، در شکل‌های ۴ تا ۶ آمده است. با توجه به نمودار سهموی نشان داده شده در شکل ۴ می‌توان رابطه‌ی ۶ را



شکل ۴. ضریب پسا بیضی‌گون (C_D) بر حسب زاویه‌ی حمله (α) در سرعت ۳ متر بر ثانیه.



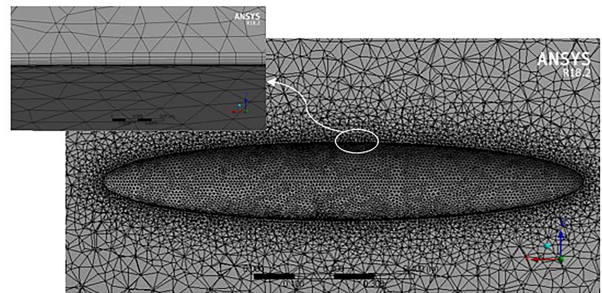
شکل ۵. ضریب لیفت بیضی‌گون (C_L) بر حسب زاویه‌ی حمله (α) در سرعت ۳ متر بر ثانیه.



شکل ۶. ضریب مومنتم بیضی‌گون (C_M) بر حسب زاویه‌ی حمله (α) در سرعت ۳ متر بر ثانیه.

تطبیق آسان تغییر شکل شبکه و جایگزینی شبکه به صورت خودکار انتخاب شده است. یک شبکه‌ی بی‌سازمان سنجیده، اگرچه نیازمند تراکم بیشتر شبکه است، اما در مقایسه با شبکه‌ی سازمان یافته همان درجه از دقت را ارائه می‌دهد.^[۳۵] شبکه‌ی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مطالعه را می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد. برای شبکه‌بندی، اولین گره نزدیک به دیواره طوری انتخاب شده که فاصله‌ی بی‌بعد (y^+) مربوط به اولین لایه‌ی شبکه‌ی حول بیضی‌گون برای شبیه‌سازی‌های مختلف کوچک‌تر از مقدار ۱ حفظ شود تا لایه‌ی لزج به حد کافی حل شده و نیروها و ممان‌های وارد بر شناور با استفاده از شبیه‌سازی $k-\omega$ SST به دقت پیش‌بینی شود. تنظیمات حل‌گر انسیس CFX برای شبیه‌سازی مربوطه چنین است: در قسمت کنترل حل‌گر، طرح پیشنهادی و مرتبه‌ی عددی آشفتگی از نوع کیفیت بالا، کنترل همگرایی به صورت بیشترین تکرار با مقدار 10^8 ، معیار همگرایی از نوع باقی‌مانده‌ی RMS با مقدار 10^{-7} و کنترل زمان‌بندی سیال روی حالت اتوماتیک با ضریب ۱ انتخاب شده است. از نوع جهت مطالعه‌ی استقلال شبکه، اندازه‌ی شبکه‌ی سطحی روی شناور به عنوان متغیر اصلاحی انتخاب شد. در جدول ۲ می‌توان نتایج مربوط به استقلال شبکه را در چهار نوع شبکه‌ی انتخابی در پیش‌بینی ضرایب نیرویی شناور مشاهده کرد. این نتایج در زاویه‌ی حمله‌ی ۶ درجه و سرعت ۳ متر بر ثانیه صورت گرفته است.

روند شبیه‌سازی عددی به این صورت بوده که ابتدا ضرایب استاتیکی به صورت پایا انجام شده است. در این حالت هندسه و میدان جریان ثابت بوده و با تغییر شرایط مرزی برای شرایط مختلف، ضرایب استاتیکی C_D ، C_L و C_M به دست آمده است. در حالت دینامیکی، شبیه‌سازی به صورت گذرا انجام شده است. نیروهای وارد بر مدل و شرایط اولیه موجب حرکت آن در میدان جریان می‌شود. به دلیل شبکه‌ی خیلی ریزکنار مدل، میدان جریان کوچکی اطراف آن ایجاد شده تا شبکه‌ی موجود در این میدان همراه مدل حرکت کرده و شبکه‌ی آن بدون تغییر می‌ماند. با جابه‌جایی مدل همراه با میدان جریان اطراف آن درون میدان جریان بیرونی، تغییرات در شبکه ایجاد می‌شود و با گذشت زمان کیفیت شبکه پایین می‌آید. با توسعه‌ی یک برنامه، ارتباطی بین حلگر نرم‌افزار CFX و نرم‌افزار تولید شبکه در محیط Workbench



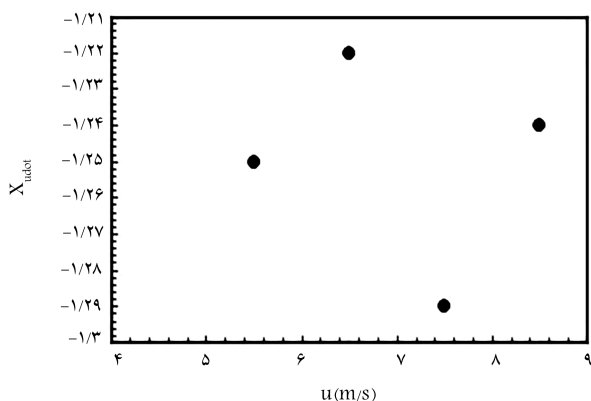
شکل ۳. شبکه‌ی انتخابی در شبیه‌سازی CFD.

جدول ۲. نتایج مربوط به استقلال شبکه در زاویه‌ی حمله ۶ درجه و سرعت ۳ متر بر ثانیه.

C_M	C_L	C_D	تعداد سلول
۰٫۰۰۱۹۸	-۰٫۰۰۱۲۶	-۰٫۰۰۱۶۲	درشت (۴۸۹۵۳۲)
۰٫۰۰۱۹۳	-۰٫۰۰۱۲۸	-۰٫۰۰۱۷۱	متوسط (۶۷۴۲۳۶)
۰٫۰۰۲۱	-۰٫۰۰۱۳	-۰٫۰۰۱۸۵	ریز (۸۹۳۵۴۲)
۰٫۰۰۲۱۸	-۰٫۰۰۱۳۱۵	-۰٫۰۰۱۸۵۴	خیلی ریز (۹۸۵۷۴۳)

جدول ۳. ضرایب استخراج شده از شبیه سازی استاتیکی CFD.

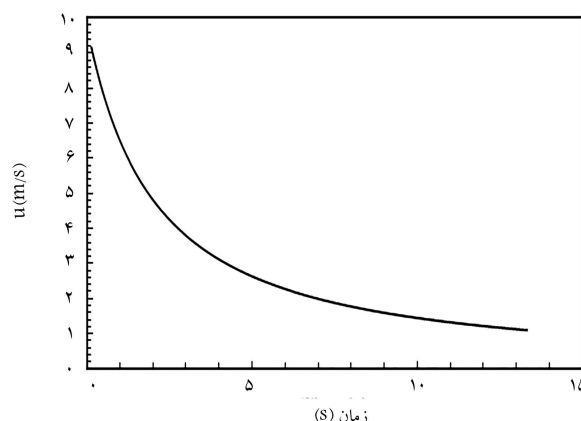
مقدار	ضریب
-۱/۳۳	X_{uu}
۰/۴۴	X_{uv}
-۵/۳۸	X_{vv}
-۰/۴۴	Y_{vv}
۱/۳۲۸	Y_{uvd}
-۱۶/۳۱	Y_{uvl}
۱۳/۴۳	N_{uvl}



شکل ۸. ضریب جرم افزوده در جهت طولی (X_{ii}) در سرعت های مختلف (u).

سرعت و شتاب های مختلف به دست آورد. با توجه به نمودار حاصله در شکل ۸ مشاهده می شود که میانگین ضریب X_{ii} در سرعت های مختلف تقریباً برابر ۱/۲۵- است. این مقدار حاکی از خطای زیر ۳ درصد با مقدار تحلیلی این ضریب^[۲۶] است.

در ادامه، برای شبیه سازی ۳ درجه آزادی بیضی گون در محیط CFX با توجه به دامنه ای انتخابی در شکل ۲ و شبکه ای هیبریدی شکل ۳ از ابزارهای شبکه ای متحرک و تجدید شبکه استفاده می شود. برای این کار سرعت های اولیه ی ۳ و ۱ متر بر ثانیه به ترتیب برای راستای طولی و عرضی شناور انتخاب شده است. همچنین نیروی پیشران ثابت و برابر ۲۲ نیوتن در نظر گرفته شده است. این شبیه سازی که در ۲۰ ثانیه صورت گرفته، به عنوان ورودی برای تخمین گر HEKF مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۹ می توان وضعیت بیضی گون را در زمان های مختلف مشاهده کرد.



شکل ۷. تغییرات سرعت طولی بیضی گون برحسب زمان در حرکت طولی.

نوشت:

$$C_D = 0.70146\alpha^2 - 0.70009\alpha + 0.70019 \quad (20)$$

همچنین $C_{M\alpha}$ و $C_{L\alpha}$ که به ترتیب شیب نمودارهای C_M و C_L بر حسب α است، به ترتیب از طریق شکل های ۵ و ۶ حاصل می شود. این مقادیر به ترتیب برابر با ۰/۲۲۱- و ۰/۱۸۲ خواهد بود.

با مشخص شدن مقادیر a ، b و c از رابطه ی ۷ و نیز $C_{M\alpha}$ و $C_{L\alpha}$ از نمودارهای شکل ۵ و ۶، ضرایب موجود در روابط ۵ به صورت جدول ۳ استخراج می شود. حال با استفاده از حرکت یک بعدی شتاب دار طولی، ضریب جرم افزوده در جهت طولی (X_{ii}) به دست می آید. برای این کار ابتدا معادله ی ساده شده ی شناور در جهت x که تنها درجه ی آزادی آن در این حرکت است استخراج می شود:

$$m\ddot{u} = X_{uu}u|u| + X_{ii}\dot{u} \quad (21)$$

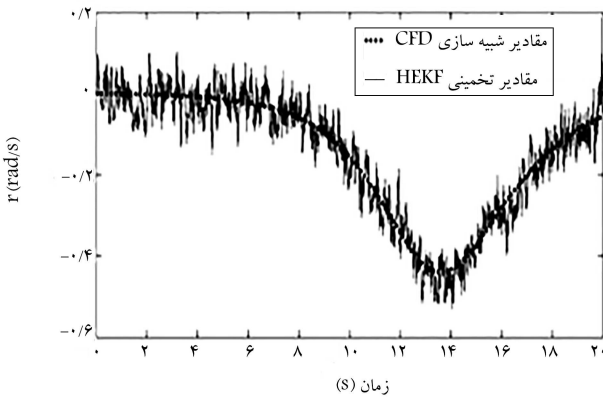
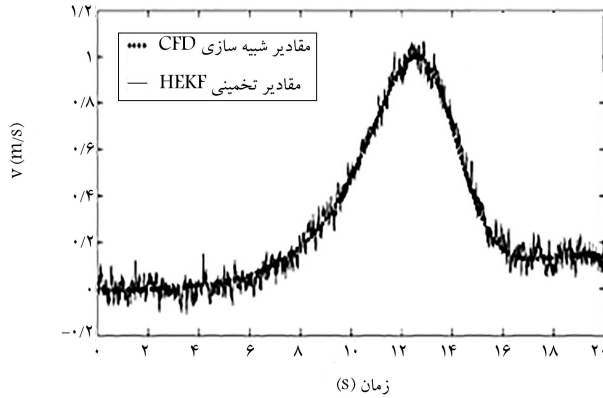
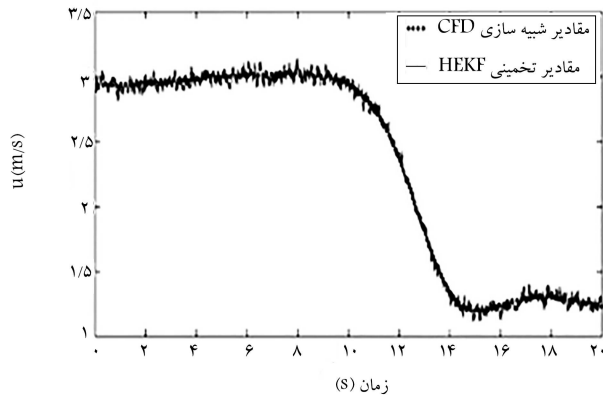
برای به دست آوردن مقدار X_{ii} با استفاده از معادله ی ۲۱، ضریب نیروی پسا در جهت طولی (X_{uu}) با استفاده از رابطه ی ۵ حاصل می شود. همچنین رابطه ی ۵ برای سرعت های مختلف، ضریب c از طریق آزمون استاتیکی در محیط CFX و با توجه به رابطه ی ۶ به دست می آید. شایان ذکر است که سرعت های انتخابی با توجه به سرعت های موجود در حرکت کشش طولی مربوطه شکل ۷، که در ادامه در باره آن توضیح داده خواهد شد، مورد آزمایش قرار گرفته است. در حرکت ۱ درجه آزادی، شتاب دار در جهت x در محیط CFX سرعت و شتاب جسم در هر لحظه مشخص می شود که با توجه به حاصل شدن ضریب X_{uu} در محدوده ی سرعت موجود از طریق آزمون استاتیکی، می توان ضریب X_{ii} را از طریق رابطه ی ۹ در

۴. تحلیل HEKF

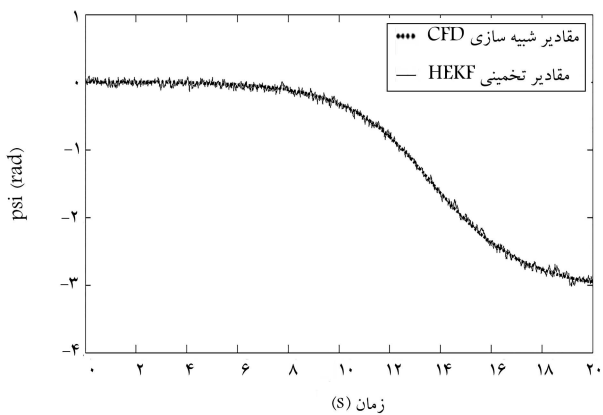
در این قسمت، روند تخمین الگوریتم HEKF برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی باقی مانده در شناور مورد نظر و همچنین تخمین حالات شناور، با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته توسط CFD در نرم افزار CFX نشان داده می شود. در این شبیه سازی کواریانس نویز فرایند (Q) و نویز اندازه گیری (R) به صورت ماتریس های قطری با مقادیر به ترتیب 10^{-4} و 10^{-6} برای قطر اصلی در نظر گرفته شده اند. کواریانس خطای تخمین (P) نیز به صورت ماتریس قطری با مقادیر اولیه ی قطر اصلی صفر برای حالات اندازه گیری شده در CFD و مقدار 10^0 برای ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم لحاظ شده است. گفتنی است با توجه به مشخص بودن مقدار اولیه ی حالات اندازه گیری و نامشخص بودن ضرایب هیدرودینامیکی افزوده شده به بردار حالت، مقادیر مذکور به عنوان مقدار اولیه ی کواریانس خطای تخمین در نظر گرفته شده است. بردار حالت تکمیلی در این تخمین تبدیل می شود به:

$$x^* = [u, v, r, x, y, \psi, \beta] \quad (22)$$

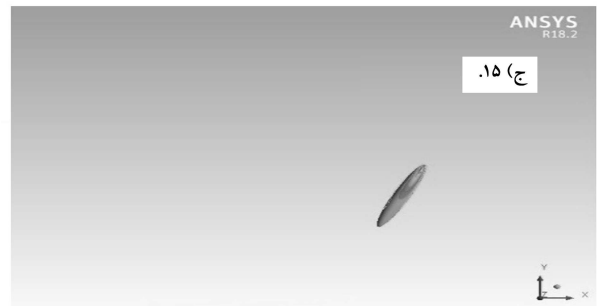
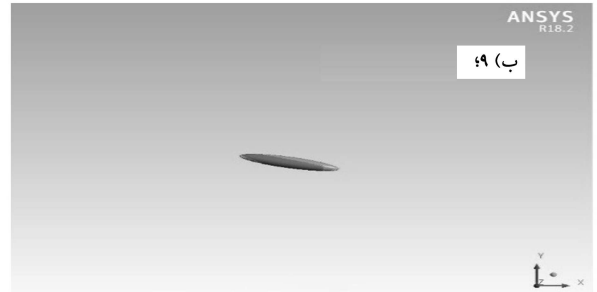
که در آن u ، v و r سرعت های شناور با مقادیر اولیه ی به ترتیب ۳، ۱ و ۰، x و y موقعیت های مکانی شناور با مقادیر اولیه ی صفر و ψ موقعیت زاویه یی آن با مقدار اولیه ی صفر است. همچنین β ضرایب هیدرودینامیکی نامعلوم شناور است شامل $[Y_v, Y_r, N_r, N_{vv}, N_{rr}, Y_{rr}]$ با مقادیر اولیه ی صفر در نظر گرفته شده است. بردار اندازه گیری شامل داده های سرعت و مکان به صورت $[u, v, r, x, y, \Psi]$ در



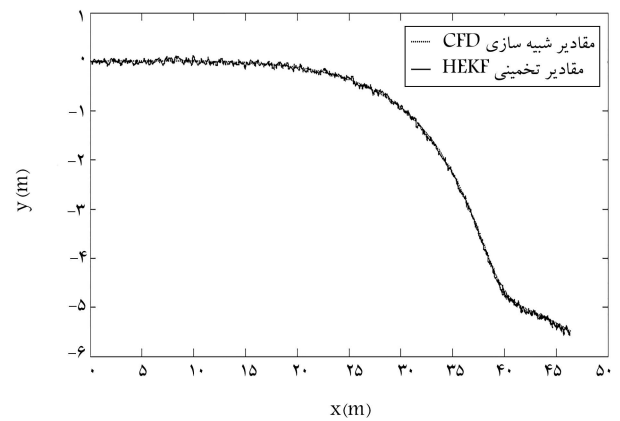
شکل ۱۱. مقایسه‌ی سرعت‌های خطی و زاویه‌ی شبیه‌سازی شده در CFD با تخمینی آن در HEKF.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی موقعیت زاویه‌ی (Psi) شناور در CFD و HEKF.



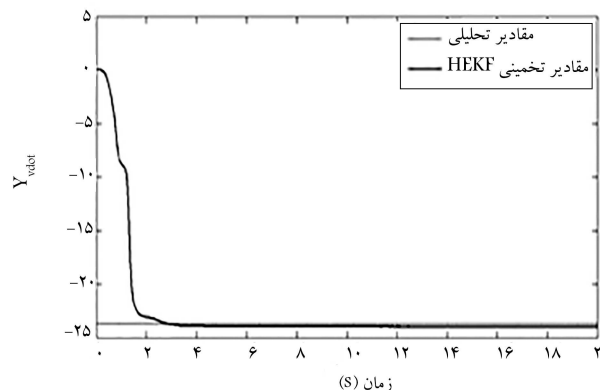
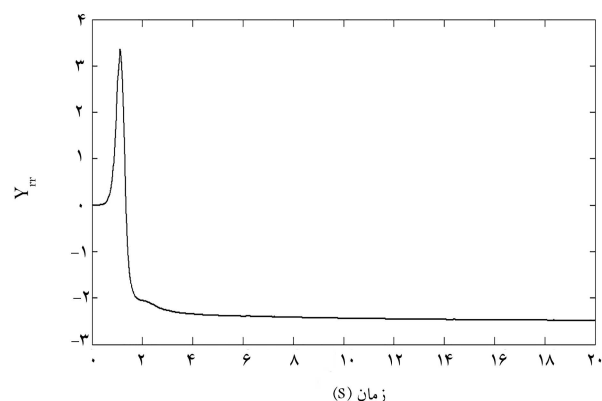
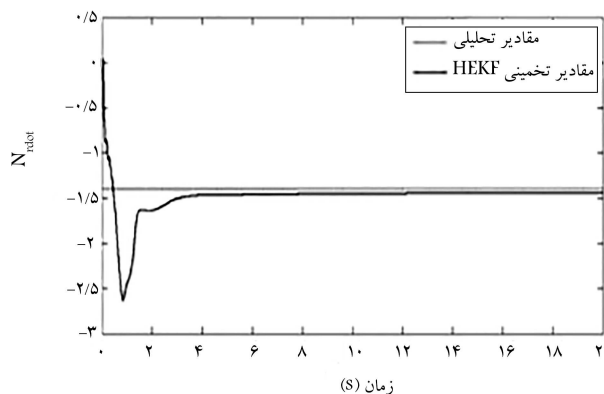
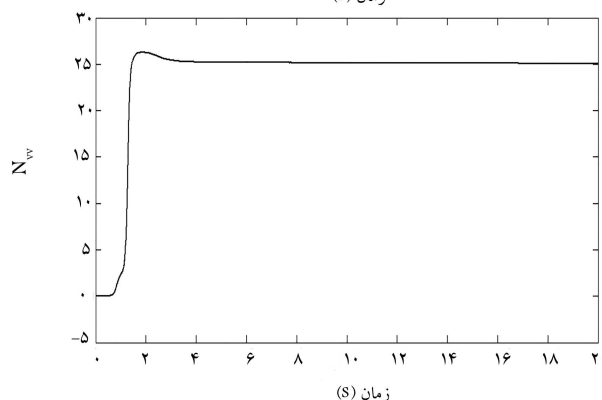
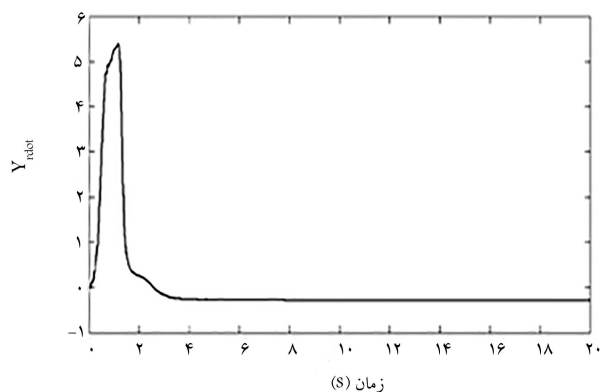
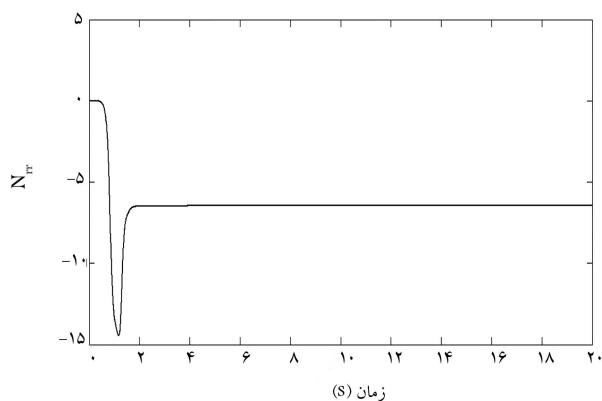
شکل ۹. موقعیت بیضی‌گون شبیه‌سازی شده با استفاده از شبکه‌ی متحرک در ثانیه‌های.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی شبیه‌سازی مسیر حرکت شناور در CFD با تخمین آن توسط HEKF.

نظر گرفته شده و مقادیر آن از شبیه‌سازی CFD توسط CFX در هر گام زمانی جایگزین می‌شود.

مقایسه‌ی مسیر تخمینی شناور با مسیر شبیه‌سازی شده توسط CFD در شکل ۱۰، سرعت‌های تخمینی و شبیه‌سازی شده در شکل ۱۱ و موقعیت زاویه‌ی نیز در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که از شکل‌های مربوط به تخمین



شکل ۱۴. ضرایب هیدرودینامیکی N_{tr} ، N_{wv} و Y_{tr} تخمین زده شده توسط تخمین گر HEKF.

شکل ۱۳. ضرایب هیدرودینامیکی N_{rebot} ، Y_{rebot} و Y_{tr} تخمین زده شده توسط تخمین گر HEKF.

جدول ۴. مقایسه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی بیضی گون در روش تحلیلی با روش ارائه شده.

ضرایب هیدرودینامیکی	مقدار تخمینی	مقدار تحلیلی	درصد خطا
X_{ti}	-۱٫۲۵	-۱٫۲۲	۲٫۴۶
Y_{ti}	-۲۳٫۹۹	-۲۳٫۷	۱٫۲۲
N_{ti}	-۱٫۴۴	-۱٫۴	۱٫۸۶

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضرایب هیدرودینامیکی یک بیضی گون غوطه‌ور در آب به صورت کامل با ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و رویکرد غیرخطی فیلتر کالمن در حالت

موقعیت‌های مکانی و سرعت‌ها قابل رؤیت است، می‌توان دریافت که تخمین‌گر به مقادیر صحیح با دقت مناسب همگرا شده است. علاوه بر این، ضرایب هیدرودینامیکی شناسایی شده توسط تخمین‌گر HEKF برای بیضی گون زیرسطحی، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است. ضرایب N_{tr} و Y_{tr} در شکل ۱۳ با مقدار تحلیلی بر گرفته از رابطه‌ی موجود در مطالعات پیشین^[۲۶] نیز مقایسه شده که نشان از خطای زیر ۳ درصد دارد. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از این روش پیشنهادی برای بیضی گون زیرسطحی، ضرایب هیدرودینامیکی استخراج شده از روش ترکیبی CFD و HEKF با ضرایب استخراج شده از روابط تحلیلی موجود^[۲۶] در جدول ۴ مقایسه شده است.

چنان‌که از جدول ۳ برمی‌آید، ضرایب تخمین زده شده از طریق روش ارائه شده دارای انطباق خوبی با نتایج تحلیلی موجود است.

تحلیلی به عنوان مقادیر صحیح انتخاب شد و با نتایج تخمین زده شده برای تأیید اعتبار روش ارائه شده مقایسه شد. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در CFD از کد تجاری انسیس CFX، با بهره‌گیری از ابزار شبکه‌ی متحرک و تجدید شبکه به صورت سه درجه آزادی جهت شبیه‌سازی دینامیکی و ناپایای شناور بیضی‌گون استفاده شد. و در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از فیلتر کالمن، با کمک بردار حالت تکمیلی، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب تخمین زده شده با استفاده از این روش نوین خطایی کم‌تر از ۳ درصد داشته و همچنین مسیر حرکت شناور در حالت تخمینی توسط HEKF با شبیه‌سازی CFD با دقت بالایی منطبق است. بنابراین، ضرایب شناسایی شده می‌تواند به خوبی برای اهداف کنترلی و روش ارائه شده نیز برای استخراج معادلات دینامیکی شناورهای پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

هیدریدی تخمین زده شد. روش CFD به این دلیل انتخاب شد که روشی دقیق و کم‌هزینه نسبت به روش تجربی است و می‌تواند برای شبیه‌سازی مانور شناورها به کار گرفته شود. از طرف دیگر، تعدد مانورها در CFD برای تخمین بیشتر ضرایب هیدرودینامیکی امری ضروری است که این کار نیازمند زمان طولانی است. با این حال حتی با انجام همه‌ی این مانورها و صرف این زمان در محیط CFD همه‌ی ضرایب استخراج نخواهد شد. EKF که یکی از پرکاربردترین روش‌های شناسایی سیستم است نیز با کمک داده‌های حالت به صورت تجربی قادر است برخی ضرایب نامعلوم سیستم را تخمین بزند اما در استخراج همه‌ی ضرایب هنوز ناتوان است. به همین دلیل در این پژوهش از ترکیب روش CFD با روش شناسایی سیستم برای تخمین همه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی در سه درجه آزادی ضمن حفظ دقت، سرعت و هزینه‌ی پایین استفاده شده است. مقادیر موجود به دست آمده از روش

پانویس‌ها

1. manned
2. heave
3. pitch
4. FLUENT
5. suboff
6. damping
7. open foam
8. μ -synthesis
9. REMUS
10. ARMA
11. virtual hydrodynamics
12. container ship
13. bulk carrier
14. Fortran
15. surge
16. coupling
17. process noise
18. sensor noise
19. white gaussian noise
20. singularity

منابع (References)

1. Alam, K., Ray, T. and Anavatti, S. G. "Design and construction of an autonomous underwater vehicle", *Neuro-computing*, **142**, pp. 16-29 (2014)
2. Feldman, J. "Dtnsrdc revised standard submarine equations of motion, David W Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda MD Ship Performance Dept (1979).
3. Rhee, K., Yoon, H. K., Sung, T. J. and et al. "An experimental study on hydrodynamic coefficients of submerged body using planar motion mechanism and coning motion device", *In International Workshop on Ship Manoeuvrability at the Hamburg Ship Model Basin* (pp. 1-20) (2000, October).
4. Pan, Y. C., Zhang, H. X. and Zhou, Q. D. "Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation", *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, **24**(6), pp. 840-847 (2012).
5. Lee, S.-K., Joung, T.-H., Cheo, S.-J. and et al. "Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test, International", *Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **3** 3, pp. 174-180 (2011).
6. Malik, S. and Guang, P. "Transient numerical simulation for hydrodynamic derivatives predictions of an axisymmetric submersible vehicle", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, **5**21, pp. 5003-5011 (2013).
7. Shadlaghani, A. and Mansoorzadeh, S. "Calculation of linear damping coefficients by numerical simulation of steady state experiments", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **9**(2), pp.653-660.
8. Chen, C. W., Jiang, Y., Huang, H. C. and et al. "Computational fluid dynamics study of the motion stability of an autonomous underwater helicopter", *Ocean Engineering*, **143**, pp. 227-239 (2017).
9. Issac, M. T. Hydrodynamic Analysis of AUV Hulls Using Semi-empirical and CFD Approach", *Universal Journal of Mechanical Engineering*, **5**(5), pp.137-143 (2017).
10. Islam, H. and Soares, C. G. "Estimation of hydrodynamic derivatives of a container ship using PMM simulation in OpenFOAM", *Ocean Engineering*, **164**, pp. 414-425 (2018).
11. Liu, Y., Zou, L. and Zou, Z. J. "Computational fluid dynamics prediction of hydrodynamic forces on a manoeuvring ship including effects of dynamic sinkage and trim", *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part M: journal of engineering for the maritime environment*, **233**(1), pp. 251-266 (2019).
12. Roberts, G. N. and Sutton, R. "Advances in unmanned marine vehicles, *The Institution of Engineering and Technology (IET)*, London, United Kingdom, **69**, (2006).

13. Donha, D. and Luque, J. "Six dof robust control", *In Proceedings of the International Control Conference, University of Strathclyde Glasgow, Scotland*, (2006).
14. Silvestre, C. and Pascoal, A. "Depth control of the INFANTE AUV using gain-scheduled reduced order output feedback", *Control Engineering Practice*, **157**, pp. 883-895 (2007).
15. Gelb, A., *Applied optimal estimation*: MIT press (1974).
16. Coxon, P. J. "System identification of submarine hydrodynamic coefficients from simple full scale trials, PhD Thesis", *Massachusetts Institute of Technology* (1989).
17. Kim, J., Kim, K., Choi, H. S. and et. al "Estimation of hydrodynamic coefficients for an AUV using nonlinear observers", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **274**, pp. 830-840 (2002).
18. Sabet, M. T., Sarhadi, P. and Zarini, M., "Extended and unscented kalman filters for parameter estimation of an autonomous underwater vehicle", *Ocean Engineering*, **91**, pp. 329-339 (2014).
19. Ernani, M. Z., Bozorg, M. and Ebrahimi, S. "Identification of an autonomous underwater vehicle dynamic using extended kalman filter with arma noise model", *International Journal of Robotics*, **4**(1), pp. 22-28 (2015).
20. Kiselev, L. V., Bagnitckii, A. V. and Medvedev, A. V. "Identification of AUV hydrodynamic characteristics using model and experimental data", *Gyroscope and Navigation*, **8**(3), pp. 217-225 (2017).
21. Kim, D., Benedict, K. and Paschen, M. "Estimation of hydrodynamic coefficients from sea trials using a system identification method", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **23**(3), pp. 258-265 (2017).
22. Sabet, M. T., Daniali, H. M., Fathi, A. and et al. "Identification of an autonomous underwater vehicle hydrodynamic model using the extended, cubature, and transformed unscented kalman filter", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **43**(2), pp. 457-467 (2018).
23. Dong, Z., Yang, X., Zheng, M. and et al. "Parameter identification of unmanned marine vehicle manoeuvring model based on extended Kalman filter and support vector machine", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **16**(1), 1729881418825095 (2019).
24. RadhaKrishna, K. R. and Selvam, R. P. "Estimation of hydrodynamic derivatives from sea trial data using system identification technique", *In Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)*, pp. 169-185 Springer, Singapore (2019).
25. Simon, D. *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2006).
26. Fossen, T. I. *Guidance and control of ocean vehicles*: Wiley New York, **199**(4) (1994).
27. Ridley P., Fontan, J. and Corke, P., *Submarine dynamic modelling*, *In Proceedings of the 2003 Australasian Conference on Robotics and Automation* (2003).
28. Yuan, Y., Fu, G. and Zhang, W. "Extended and unscented Kalman filters for parameter estimation of a hydrodynamic model of vessel", *In 2016 35th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 2051-2056). IEEE (2016, July).
29. Ljung, L. "System identification: theory for the user: Prentice-hall" (1987).
30. Wan, E. A. and Van Der Merwe, R. "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation", *In Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)* (pp. 153-158). Ieee (2000).
31. Azimi, V., Munther, D., Fakoorian, S. A. and et al. "Hybrid extended Kalman filtering and noise statistics optimization for produce wash state estimation", *Journal of Food Engineering*, **212**, pp. 136-145 (2017).
32. Chui, C. and Chen, G. "Kalman filtering: with real-time applications, ser", *Springer Series in Information Sciences*, **3**, pp. 17, (1987).
33. Luque, J. C. C., Donha, D. C. and de Barros, E. A. "Auv parameter identification", *IFAC Proceedings Volumes*, **42**(18), 72-77 (2009).
34. Leong, Z. Q., Ranmuthugala, D., Penesis, I. and et al. "Quasi-static analysis of the hydrodynamic interaction effects on an autonomous underwater vehicle operating in proximity to a moving submarine", *Ocean Engineering*, **106**, pp. 175-188 (2015).
35. Duda, B., Menter, F., Hansen, T. and et al. "Scale-adaptive simulation of a hot jet in cross flow", *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, **318**(4), pp.042050 (2011).