

تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات هوشمند زیرآبی در محیط دینامیک سیالات محاسباتی

احمد حاجیوند^۱، مهدی حسنی^۲، مهدی بابایی^۳، محسن صادقیان^۴

۱- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۴- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه امیرکبیر

چکیده

ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیرآبی با شبیه سازی آزمایش های مانور در محیط دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده اند. شبیه سازی ها برای ربات زیرآبی با نسبت طول به قطرهای مختلف با استفاده از نرم افزار قدرتمند STAR-CCM+ انجام شده است. همچنین تاثیر اضافه نمودن هیدروپلن بر مانور پذیری ربات زیرآبی مورد بررسی قرار گرفته است. نیروها و ممان هیدرودینامیکی برای زوایای حمله مختلف محاسبه و با استفاده از برازش منحنی مناسب بر نتایج، ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش نسبت طول به قطر ضرایب هیدرودینامیکی افزایش پیدا می کند. مقایسه نتایج با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که محاسبات از دقت کافی برخوردار است.

واژگان کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی، نیروی عرضی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۱۱/۰۹

۱- مقدمه

و شرایط عملیاتی بستگی دارد و معمولاً برای محاسبه ضرایب خطی می‌باشند. روش شناسایی سیستم زمانی کاربرد دارد که داده‌های آزمایشگاهی کافی برای ارائه مدل ریاضی مناسب وجود داشته باشد. ضرایب هیدرودینامیکی مانور را می‌توان در آزمایشگاه هیدرودینامیک و با انجام آزمایش‌های حرکت اجباری بر روی مدل^۱ مورد نظر بدست آورد. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های کشش در زوایای دریافت مختلف^۲، آزمایش‌های بازوی چرخان^۳ و آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای^۴ هستند. آزمایش‌های کشش در زوایای دریافت مختلف و مکانیزم حرکت صفحه‌ای در داخل حوضچه کشش^۵ و آزمایش‌های بازوی چرخان در حوضچه مانور^۶ انجام می‌شود. با انجام آزمایش‌های کشش در زوایای دریافت مختلف، ضرایب دمپینگ وابسته به سرعت‌های جابجایی، با انجام آزمایش‌های بازوی چرخان ضرایب دمپینگ وابسته به سرعت‌های چرخشی و با انجام آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای کلیه ضرایب دمپینگ و جرم اضافی را می‌توان بدست آورد. انجام این آزمایش‌ها به امکانات وسیع آزمایشگاهی و صرف هزینه و وقت زیاد نیاز دارد. با پیشرفت کامپیوترها، کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در صنایع دریایی عملی شده است و امروزه از اهمیت زیادی در مراحل طراحی برخوردار است. روش‌های عددی دارای آن‌چنان دقتی هستند که امروزه به صورت عملی در محاسبات مقاومت و رانش کاربرد دارند. در چند سال اخیر علاوه بر محاسبه مقاومت و طراحی سیستم رانش از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه برخی از اصلی‌ترین ضرایب هیدرودینامیکی که در پیش‌بینی مانورپذیری کاربرد دارند، استفاده می‌شود. تیاگی^۷ و همکاران [۱] در ۲۰۰۶ ضرایب هیدرودینامیکی عرضی یک ربات زیردریایی را با نرم افزار تجاری محاسبه کردند. در ۲۰۱۰ ژانگ^۸ و همکاران [۲] و نظیر^۹ و همکاران [۳] ترتیب از نرم افزار فلونت برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیردریایی و یک فین سه عدی استفاده کردند. برای شناورهای سطحی، سیمسون^{۱۰} و همکاران [۴] آزمایش کشش مورب را در نرم افزار STAR-CCM+ شبیه‌سای نموده‌اند. حاجیوند و موسوی زادگان [۵]

کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در مهندسی دریا، با توجه به پیشرفت‌های صنعت رایانه رو به افزایش است. این ابزار امکان شبیه‌سازی رفتار سیال در اطراف بدنه متحرک‌های دریایی را با صرف هزینه و وقت کمتر فراهم کرده است. علاوه بر این با استفاده از این ابزار امکان طراحی بدنه متحرک‌های دریایی با کنترل‌پذیری و مانورپذیری بهینه فراهم می‌شود. ربات هوشمند زیرآبی، ماشین خودکار و هوشمندی است که قادر به پیمودن یک مسیر معین و انجام عملیات‌هایی مانند نقشه‌برداری، شناسایی، مین‌یابی و... در محدوده‌ای وسیع بدون استفاده از کابل می‌باشد. این شناورها بایستی بتوانند در مواجهه با شرایط مختلف به سرعت عکس‌العمل نشان دهند. لذا مانورپذیری و کنترل‌پذیری در این شناورها از اهمیت زیادی برخوردار است. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در جهت پیشرفت این شناورها انجام شده است. برای طراحی یک ربات هوشمند زیرآبی، مانورپذیری و کنترل‌پذیری آن بایستی به صورت دقیق و بر اساس مدل‌های ریاضی بررسی شود. مدل‌های ریاضی موجود، شامل نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی می‌باشند که به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. بنابراین، برای شبیه‌سازی عملکرد یک ربات هوشمند زیرآبی تعیین دقیق این ضرایب از اهمیت بالایی برخوردار است.

ضرایب هیدرودینامیکی شامل ضرایب دمپینگ و ضرایب جرم‌اضافی هستند. ضرایب دمپینگ در اثر ویسکوزیته سیال و تشکیل موج بر روی سطح آزاد ایجاد شده و متناسب با سرعت‌های جسم نسبت به سیال هستند. این ضرایب وابسته به نوع تناسب به سرعت‌های جابجایی و یا چرخشی به ضرایب دمپینگ خطی و غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند. ضرایب جرم اضافی متناسب با شتاب جسم نسبت به سیال اطراف ایجاد شده و معمولاً بر مبنای قانون دوم نیوتن در فرم خطی یعنی متناسب با شتاب جسم مدل می‌شوند. این ضرایب معمولاً با استفاده از آزمایش، شناسایی سیستم یا فرمول‌های تجربی محاسبه می‌شوند. روابط تجربی دارای محدودیت بوده و معمولاً دقت این روابط به شرایط گوناگونی مانند هندسه بدنه

⁶ Maneuvering Basin

⁷ Tyagi

⁸ Zhang

⁹ Nazir

¹⁰ Simonsen

¹ Captive Model Tests

² Oblique Towing Tests (OTT)

³ Rotating Arm Tests (TAT)

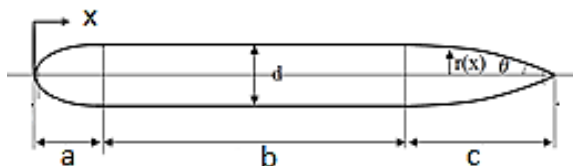
⁴ Planar Motion Mechanism (PMM) tests

⁵ Towing Tank

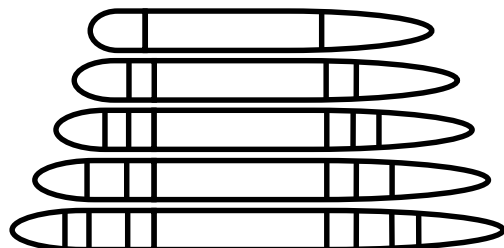
شبهه‌سازی شده‌است. در شکل (۳) مدل اولیه مجهز به هیدروپلن NACA0018 نشان داده شده‌است. در جدول (۱) ابعاد و مشخصات مدل و هیدروپلن آن آورده شده است.

۳- معادلات حاکم بر جریان سیال

جریان غیر یکنواخت ویسکوز اطراف بدنه یک شناور دریایی توسط معادلات ناویراستوکس مدل می‌شود.



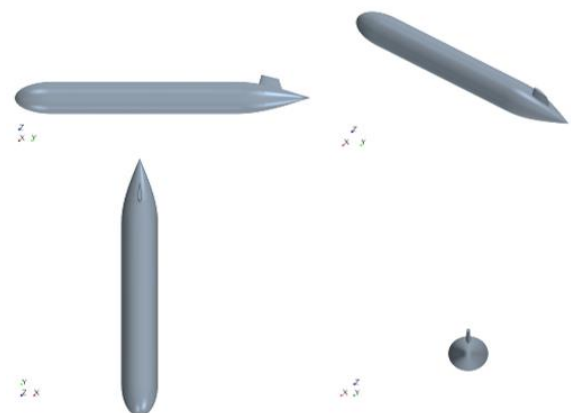
شکل (۱) نمای شماتیک بدنه مایرینگ.



شکل (۲) نمای شماتیک از ۵ مدل مورد استفاده در شبهه سازی [۷].

جدول (۱) مشخصات ابعاد ربات اولیه.

واحد	مقدار	کمیت
متر	۱/۷۲۴	طول
متر	۰/۲۰۴	حداکثر قطر
متر	۰/۱۰	ارتفاع باله ها از سطح بدنه



شکل (۳) هندسه بدنه AUV با افزودن هیدروپلن.

و [۶] به بررسی و شبهه‌سازی مانور شناور سطحی در حضور سطح آزاد، پرداخته‌اند.

با بهره‌گیری از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی قدرتمند STAR CCM+، آزمایش کشش در زوایای دریافت مختلف جهت تعیین ضرایب خطی و غیرخطی وابسته به سرعت‌های طولی و عرضی شبهه‌سازی شده است. این مدل محاسباتی بسیار مناسب، کم هزینه و انعطاف‌پذیر است.

۲- مدل هندسی ربات زیرآبی

شبهه‌سازی برای ۵ فرم بدنه مایرینگ^۱ با نسبت طول به قطرهای مختلف انجام شده است. مدل مایرینگ برای یک سطح خیس یکسان نسبت به مدل‌های ربات زیردریایی کمترین مقدار مقاومت را تولید می‌کند. این مدل در سه صفحه مختصات دارای تقارن بوده و فرم بدنه سینه و پاشنه آن به ترتیب با استفاده از معادلات ریاضی (۱) و (۲) تعریف می‌شود. پارامترهای موجود در این روابط در شکل (۱) معرفی شده‌اند.

$$r(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left[\left(\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan\theta}{c} \right) \right] (x - (a+b))^2 + \left[\left(\frac{d}{c^3} - \frac{\tan\theta}{c^2} \right) \right] (x - (a+b))^3 \quad (2)$$

در این مقاله از مدل مایرینگ که در سال ۲۰۰۵ توسط شرکت مشاور اقیانوسی^۲ در کانادا طراحی و ساخته شد و در حوضچه کشش NRC-IOT با طول ۹۰ متر و عرض ۱۲ متر مورد آزمایش قرار گرفت [۷]، استفاده خواهد شد. از روی این مدل که نسبت طول به قطر آن برابر ۸/۵ است، مدل‌های دیگر با همان قطر و طول‌های متفاوت جهت بهبود کاربری ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نمای شماتیک این مدل‌ها در شکل (۲) مشاهده می‌شوند.

هیدروپلن‌ها از جمله ملحقات متحرک‌های زیرآبی هستند که به منظور بهبود پایداری و مانورپذیری بر روی بدنه آن‌ها نصب می‌شوند. برای بررسی تاثیر این ملحقات بر مشخصات مانورپذیری، چهار نوع هیدروپلن با شکل مقطع NACA0012، NACA0015، NACA0018 و NACA0020 بر روی مدل اولیه با نسبت طول به قطر ۸/۵، تعبیه و آزمایش کشش در زوایای دریافت مختلف بر روی آنها

² Oceanic Consulting Corporation(OCC)

¹ Myring

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{21} P_k - C_{22} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

که در آن داریم:

$$P_k = \mu_t \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) = -\frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{U} [3\mu_t \nabla \cdot \bar{U} + \rho k] \quad (8)$$

۲-۳ شرایط مرزی

برای رسیدن به جواب یکتا از حل معادلات متوسط زمانی ناوراستوکس، شرایط مرزی روی دیواره‌های محدوده، بدنه مدل، ورودی و خروجی محدوده باید به صورت دقیق تعیین شوند. با توجه به شکل (۴) شرایط مرزی به صورت زیر اعمال شده است:

۱- ورودی جریان (مرز سمت راست): جریان با سرعت یکنواخت مشخص وارد می‌شود.

۲- خروجی جریان (مرز سمت چپ): جریان با توزیع فشار یکنواخت خارج می‌شود.

۳- تقارن (مرزهای باقیمانده محدوده): جهت جلوگیری از اثرات دیواره‌ها و ایجاد شرایط آب نامحدود این مرزها با شرط تقارن تعریف شده‌اند.

۴- دیوار (سطح بدنه): سطوح بدنه مدل به عنوان دیوار نفوذناپذیر تعریف شده‌اند.

۴- تولید شبکه

روش حجم محدود متداول‌ترین روش برای حل معادلات متوسط زمانی ناوراستوکس در محدوده محاسباتی است. برای این منظور، محدوده محاسباتی مناسب به گونه‌ای که اثرات ناشی از جریان برگشتی در خروجی و اثرات دیواره‌ها در مرزهای جانبی وجود نداشته باشد، انتخاب می‌شود. محدوده محاسباتی شبکه‌بندی شده برای شبیه‌سازی تست مقاومت در شکل (۴) و محدوده محاسباتی شبکه‌بندی شده تست کشش در زوایای دریافت مختلف در شکل (۵) مشاهده می‌شود. فاصله مرزهای ورودی، خروجی، مرزهای جانبی افقی و عمودی از مرکز بدنه مدل در شکل (۴) به ترتیب ۱، ۲، ۰/۵ و ۰/۵ برابر طول مدل و در شکل (۵) این فاصله‌ها از مرکز بدنه به ترتیب برابر ۱، ۲، ۲ و ۰/۵ برابر این طول در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که محدوده محاسباتی برای شرایط بدنه برهنه و بدنه مجهز به

معادلات ناوراستوکس هم برای جریان آرام و هم جریان مغشوش کاربرد دارد اما برای در نظر گرفتن تمام اثرات جریان مغشوش و حل دقیق این معادلات، به شبکه‌بندی بسیار ریزی نیاز است. برای حل جریان مغشوش از معادلات متوسط زمانی ناوراستوکس استفاده می‌شود. این معادلات بر مبنای ابزار آماری به نام تجزیه رینولدز به دست می‌آیند، به این صورت که برای یک جریان مغشوش، میدان سرعت و میدان فشار را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: مقدار متوسط فشار و سرعت \bar{u}_i, \bar{P}_i و مقدار مغشوش فشار و سرعت u'_i, P'_i بنابراین، میدان سرعت و فشار حاصل جمع این دو مولفه خواهد بود. اگر سیال غیر قابل تراکم فرض شود، معادلات مقدار متوسط زمانی ناوراستوکس به شرح زیر است [۸]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + g_i + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

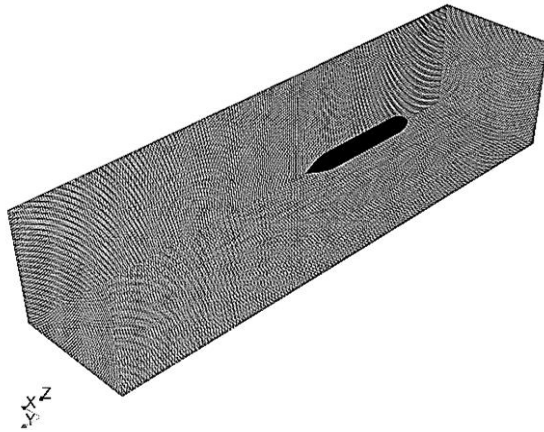
که g_i مولفه‌های شتاب گرانش در راستای محورهای مختصات اینرسی است. ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال و $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j}$ مولفه‌های تانسور تنش رینولدز است. مقدار مولفه‌های این تانسور با استفاده از مدل‌های آشفتگی به دست می‌آید.

۱-۳ مدل آشفتگی

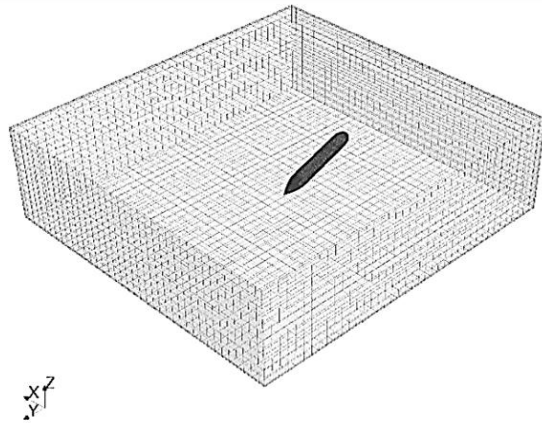
مدل ریاضی جامعی برای شبیه‌سازی آشفتگی برای همه انواع جریان‌ها وجود ندارد. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف بدنه ربات هوشمند زیرآبی از مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ که یکی از پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی برای مسائل آیرودینامیک و هیدرودینامیک است، استفاده شده است. در این مدل تنش رینولدز به صورت ویسکوزیته گردابی اضافی در نظر گرفته می‌شود، که بر خلاف ویسکوزیته دینامیکی که مشخصه سیال بوده، این ویسکوزیته تابع رژیم جریان است.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

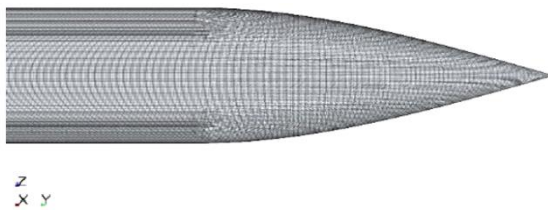
که در این رابطه k انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم، ε نرخ میرایی انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم است. C_μ ثابت بی بعد با مقدار متوسط ۰/۰۹ است. پارامترهای k و ε از معادلات انتقال (۶) و (۷) به دست می‌آیند [۹].



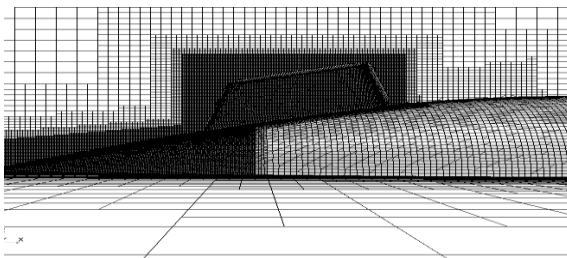
شکل (۴) توزیع شبکه در محدوده شبیه سازی و اطراف مدل برای تست مقاومت.



شکل (۵) توزیع شبکه در محدوده شبیه سازی و اطراف مدل برای تست کشش در زوایای دریافت مختلف.



شکل (۶) شبکه در انتهای بدنه مدل.



شکل (۷) توزیع شبکه در اطراف هیدروپلن نصب شده روی بدنه.

هیدروپلن به صورت یکسان در نظر گرفته شده است. روش های شبکه بندی گوناگونی برای تقسیم بندی محدوده محاسباتی وجود دارد.

برای شبکه بندی محدوده محاسباتی از روش ساختار یافته Trimmer استفاده شده است. این روش، روشی بهینه و قدرتمند در تولید شبکه های ساختار یافته با حداقل تقارن^۱ است. در نزدیک سطح بدنه سلول های شش وجهی منظم با دقت بالا، به گونه ای ایجاد می شوند که مرزهای بدنه به صورت دقیق مدل سازی شوند. برای افزایش دقت در بخش هایی از سطح بدنه که تغییرات شدیدتری وجود دارد مانند اطراف هیدروپلن و انتهای بدنه اصلی از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. نمونه ای از شبکه تولید شده در محدوده محاسباتی، اطراف انتهای بدنه برهنه و بدنه مجهر به هیدروپلن در شکل های (۴) تا (۷) مشاهده می شود.

برای افزایش دقت پیش بینی لایه مرزی اطراف بدنه از تکنیک لایه های منشوری استفاده شده است. این لایه ها که ضخامت مجموع آنها برابر ضخامت لایه مرزی است، به صورت دقیق مرزهای بدنه را دنبال کرده و دقت مدل سازی جریان آشفته در این ناحیه را افزایش می دهند. علاوه بر شبکه بندی دقیق در ناحیه لایه مرزی، نیاز است که در زیرلایه های داخلی این ناحیه برای جلوگیری از افزایش بیش از حد المان های محاسباتی از توابع دیواره استفاده کرد. مبنای این توابع نتایج تجربی است. معیار مهمی که در بررسی کیفیت مدل سازی لایه مرزی مورد استفاده قرار می گیرد، پارامتر بدون بعد y^+ است که به فاصله بی بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح اطلاق می شود. مقدار تقریبی این پارامتر از رابطه (۹) به دست می آید:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau \Delta y}{\mu} \quad (9)$$

که در این رابطه Δy فاصله بین دیوار و اولین گره شبکه u_τ سرعت اصطکاکی می باشد. بر اساس روابط تجربی مقدار مطلوب y^+ برای جریان در اطراف بدنه ربات زیر دریایی با سرعت ۱ تا ۴ متر بر ثانیه بین ۳۰ تا ۱۰۰ می باشد. در شکل (۸) نمونه ای از توزیع مقدار y^+ روی بدنه برهنه ربات برای سرعت ۲ متر بر ثانیه بر آورده شده است که مشاهده می شود مقدار متوسط این پارامتر حدود ۴۰ می باشد.

¹ Skewness

در نتیجه سه حالت همگرایی وجود دارد:

$$R > 1 \text{ واگرایی}$$

$$R < 0 \text{ همگرایی نوسانی}$$

$$0 < R < 1 \text{ همگرایی}$$

اگر همگرایی رخ دهد، از برون‌یابی ریچاردسون^۱ برای تخمین نرخ همگرایی استفاده می‌شود. برای این منظور مرتبه گسسته‌سازی به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$R = \frac{\log\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)}{\log(r)} \quad (11)$$

که در آن $e_{ij} = \frac{(S_j - S_i)}{S_i}$ می‌باشد. پس از آن اندیس همگرایی شبکه به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$GCI_{ij} = F_S \frac{|e_{ij}|}{r^p - 1} \quad (12)$$

در این رابطه F_S فاکتور ایمنی است که روچ^۲ [۱۰] توصیه کرده است در شرایطی که در مطالعه شبکه از سه شبکه استفاده می‌شود مقدار آن برابر ۱/۲۵ در نظر گرفته شود. اندیس همگرایی شبکه نشان‌دهنده تغییرات حل مساله به تغییرات ابعاد شبکه است.

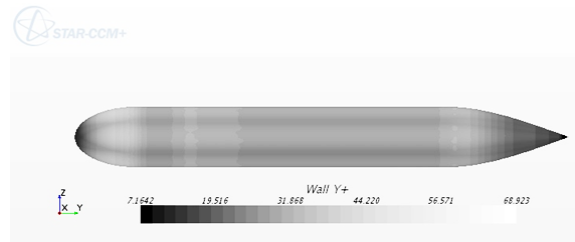
نتایج مربوط به محاسبه نسبت همگرایی، مرتبه گسسته‌سازی و اندیس همگرایی شبکه در جدول (۳) مشاهده می‌شود. مقدار تئوری که برای مرتبه همگرایی به دست آمده است برابر ۲ است که اختلاف موجود ناشی از تعامد شبکه، اثرات غیر خطی مساله، مدل توربولانسی مورد استفاده و... می‌باشد.

اختلاف بین نتایج شبکه متوسط و ریز برای نیروی طولی، عرضی و ممان یاو به ترتیب برابر ۳، ۴ و ۴ درصد می‌باشد.

جدول (۲) نیروها و ممان بی بعد برای شبکه های مختلف.

شماره	تراکم شبکه	تعداد المان	نیروی طولی	نیروی عرضی	ممان یاو
۱	کم	۱۴۰۰۰۰	-۰/۰۲۱۵	۰/۰۳۸۱	۰/۰۲۱۱
۲	متوسط	۲۵۰۰۰۰	-۰/۰۱۸۶	۰/۰۳۵۸	۰/۰۱۹۲
۳	زیاد	۴۰۰۰۰۰	-۰/۰۱۷۷	۰/۰۳۴۴	۰/۰۱۸۱

نسبت این اختلاف به تفاوت حجم محاسباتی مورد نیاز برای شبکه متوسط و ریز قابل صرف نظر است. در حقیقت برای رسیدن به یک جواب مناسب با حجم محاسباتی کم شبکه متوسط انتخاب می‌شود و تمام شبیه‌سازی‌ها برای این شبکه انجام خواهد شد.



شکل (۸) توزیع Y^+ در اطراف بدنه برهنه مدل برای سرعت دو متر بر ثانیه.

۵- مطالعه شبکه

یکی از مسائل مهم در حل عددی استفاده از شبکه‌ای است که نتایج حاصله از آن، مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها باشد. به عبارت دیگر شبکه‌بندی مدل باید به گونه‌ای انتخاب شود که با ریزتر شدن اندازه‌ی المان‌ها دیگر تغییری در نتایج ایجاد نگردد، از طرفی چون استفاده از شبکه‌ی بسیار ریز باعث افزایش مدت زمان انجام محاسبات می‌شود؛ اندازه المان‌ها تا حد نیاز باید کوچک شوند تا زمان محاسبات بیش از حد طولانی نشود. به همین منظور سه شبکه محاسباتی متفاوت با نسبت اصلاح ثابت $\tau = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_2} = 1/8$ شده و شبیه‌سازی برای بدنه برهنه در زاویه دررفت ۶ درجه انجام شد. نیروها و ممان به دست آمده در این شرایط برای شبکه‌های مختلف در جدول (۲) آورده شده است. نسبت همگرایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (10)$$

که $\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$ اختلاف بین حل شبکه متوسط و ریز و $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$ اختلاف بین حل شبکه درشت و متوسط

جدول (۳) نتایج تخمین نسبت همگرایی، مرتبه گسسته‌سازی و اندیس همگرایی شبکه

	N'	Y'	X'
R	۰/۵۷۸	۰/۶۰۸	۰/۳۱۰
P	۱/۶۲۴	۱/۴۷۵	۱/۹۹۰
GCI_{fine}	۰/۰۵۹	۰/۰۳۶	۰/۰۲۸

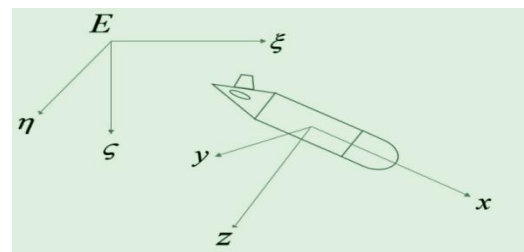
² Roache

¹ Richardson

۶- شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی

برای تشریح حرکت مدل در حوضچه مجازی و همچنین مانور مدل، دو سیستم مختصات همانند شکل (۹) تعریف می‌شود که عبارتند از سیستم مختصات اینرسی $\xi\eta\zeta$ و سیستم مختصات متصل به بدنه مدل XYZ . جابجایی‌های خطی نسبت به سیستم مختصات اینرسی تعریف می‌شوند و نیروهای هیدرودینامیکی وارد به بدنه در دستگاه مختصات متصل به بدنه تعریف می‌شوند.

در ابتدا، شبیه‌سازی‌ها روی ۵ بدنه متقارن با نسبت طول به قطرهای مختلف و بدون ملحقات انجام می‌شود. بدنه برهنه اولیه ربات زیرآبی، دارای نسبت طول به قطر ۸/۵ می‌باشد. برای شرایطی که به فضای بیشتری برای تجهیزات یا افزایش ظرفیت باتری نیاز باشد مدل‌های دیگری نیز با قطر ثابت و نسبت طول به قطرهای ۹/۵، ۱۰/۵، ۱۱/۵ و ۱۲/۵ طراحی شده‌است. بنابراین، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها برای این مدل‌ها در سرعت‌های مختلف انجام شده‌است. این شبیه‌سازی‌ها شامل شبیه‌سازی تست مقاومت برای محاسبه ضریب مقاومت در سرعت‌های مختلف و تست کشش در زوایای دریافت مختلف برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک دمپینگ خطی و غیرخطی است.



شکل (۹) دستگاه‌های مختصات اینرسی و متصل به بدنه.

در ادامه با افزودن چهار هیدروپلن با مقاطع NACA متفاوت به بدنه برهنه اولیه، این شبیه‌سازی‌ها تکرار شده‌است تا اثر وجود هیدروپلن و نوع هیدروپلن بر مشخصات هیدرودینامیکی و مانورپذیری بدنه بررسی شود.

۱-۶ آزمایش مقاومت

شبیه‌سازی تست مقاومت برای محاسبه مقاومت بدنه در سرعت‌های مختلف انجام می‌شود. شبیه‌سازی تست مقاومت برای ۵ بدنه برهنه در سرعت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه انجام شده‌است. تمام این شبیه‌سازی‌ها در شرایط بدون زاویه حمله انجام شده‌است.

نیروی طولی در هر کدام از این شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده و نتیجه آن در جدول (۴) برای هر کدام از این مدل‌ها استخراج گشته و با نتایج آزمایشگاهی [۱۱] مقایسه شده است. به دلیل تقارن بدنه در تست‌هایی که زاویه حمله صفر است باید نیروی عرضی برابر صفر باشد. برای اطمینان از درستی نتایج مقدار نیرو در جهت عرضی نیز محاسبه شد که مقدار آن در محدوده ۴-۱۰ نیوتن می‌باشد که نشان از دقت کافی نتایج دارد.

از نتایج جدول (۴) مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای تمام مدل‌ها مربوط به سرعت ۴ متر بر ثانیه است که به دلیل افزایش آشفتگی جریان در سرعت‌های بالاتر و افزایش خطای پیش‌بینی‌های عددی و آزمایشگاهی است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که برای یک سرعت ثابت با افزایش نسبت طول به قطر، اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. که این امر نیز می‌تواند ناشی از افزایش طول جدا شده جریان باشد.

جدول (۴) نتایج به دست آمده برای مقاومت و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی.

سرعت (متر بر ثانیه)	مقاومت مدل LDR=8.5 (نیوتن)		مقاومت مدل LDR=9.5 (نیوتن)		مقاومت مدل LDR=10.5 (نیوتن)		مقاومت مدل LDR=11.5 (نیوتن)		مقاومت مدل LDR=12.5 (نیوتن)	
	شبهه سازي	درصد خطا	شبهه سازي	درصد خطا	شبهه سازي	درصد خطا	شبهه سازي	درصد خطا	شبهه سازي	درصد خطا
۱	۲/۱۱	۲/۲۱	۴/۹۴	۲/۱۳	۲/۳۹	۱۲/۴	۲/۴۱	۷/۳۲	۲/۵۹	۲/۴۱
۲	۸/۴۴	۷/۹۳	۶/۰۲	۸/۵۲	۸/۵۹	۰/۸۸	۹/۶۴	۳/۵۷	۹/۳۰	۹/۶۴
۳	۱۸/۹۹	۱۶/۸	۱۱/۵	۱۹/۱۷	۱۸/۲	۴/۹	۲۱/۶۹	۱۹/۷	۲۱/۶۹	۲۱/۶۹
۴	۳۳/۷۶	۲۸/۶۵	۱۵/۱	۳۴/۰۸	۳۱/۰	۸/۸	۳۸/۵۶	۳۳/۶	۳۸/۵۶	۳۸/۵۶

$$Y_v = \left. \frac{\partial Y}{\partial \beta} \right|_{\beta=0} \left. \frac{\partial \beta}{\partial v} \right|_{v=0} = \frac{1}{U} \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{U}\right)^2}} \Big|_{v=0} Y_{\beta} \Big|_{\beta=0} \quad (13)$$

$$N_v = \left. \frac{\partial N}{\partial \beta} \right|_{\beta=0} \left. \frac{\partial \beta}{\partial v} \right|_{v=0} = \frac{1}{U} N_{\beta} \Big|_{\beta=0} \quad (14)$$

که در این روابط Y_{β} و N_{β} شیب نمودار نیروی عرضی و ممان بر حسب زاویه حمله در $\beta = 0$ می‌باشند. مقادیر محاسبه شده ضرایب خطی Y_v و N_v با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) در جدول (۵) آورده شده‌است.

ضرایب غیرخطی Y_{vvv} و N_{vvv} از نمودار نیروی طولی، عرضی و ممان یا بر حسب زاویه حمله و با استفاده از مشتق زنجیره‌ای محاسبه می‌شوند:

$$Y_{vvv} = \left. \frac{\partial^3 Y}{\partial \beta^3} \right|_{\beta=0} \left(\frac{\partial \beta}{\partial v} \right)^3 = \left(\frac{1}{U} \right)^3 Y_{\beta\beta\beta} \Big|_{\beta=0} \quad (15)$$

$$N_{vvv} = \left. \frac{\partial^3 N}{\partial \beta^3} \right|_{\beta=0} \left(\frac{\partial \beta}{\partial v} \right)^3 = \left(\frac{1}{U} \right)^3 N_{\beta\beta\beta} \Big|_{\beta=0} \quad (16)$$

ضرایب $Y_{\beta\beta\beta}$ و $N_{\beta\beta\beta}$ از مقدار مشتق سوم نمودارهای نیروی عرضی و ممان یا در زاویه $\beta = 0$ به دست می‌آیند. ضرایب هیدرودینامیک غیر خطی دمپینگ به دست آمده در جدول (۶) مشاهده می‌شوند.

در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در یک زاویه حمله ثابت با افزایش نسبت طول به قطر نیروی طولی افزایش پیدا می‌کند و دلیل آن افزایش سطح بدنه ربات و در نتیجه آن افزایش مقاومت کل است. همچنین در شکل (۱۱) نیز مشاهده می‌شود که برای یک زاویه حمله ثابت با افزایش نسبت طول به قطر مقدار نیروی عرضی افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات در نمودار ممان یا در شکل (۱۲) نیز مشاهده می‌شود.

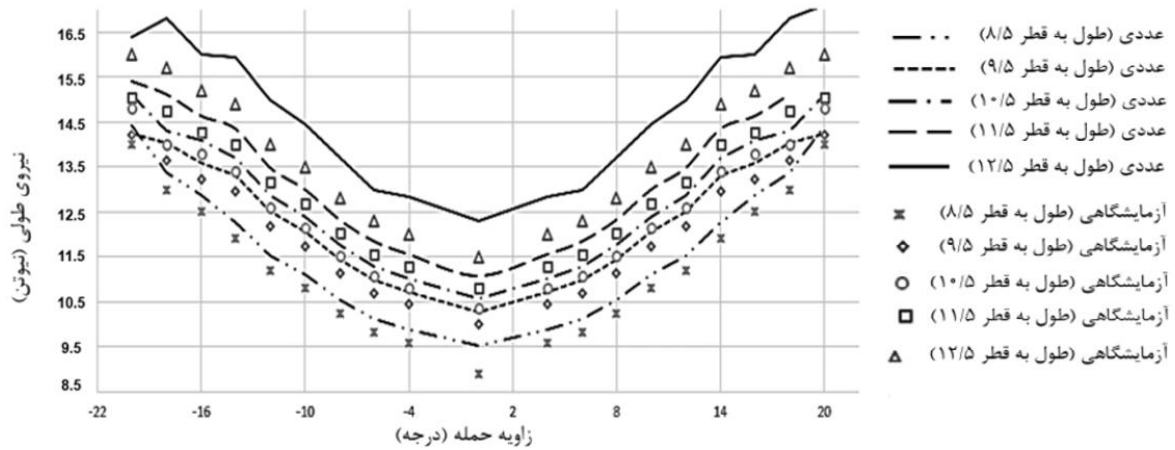
جدول (۵) ضرایب هیدرودینامیکی عرضی.

مدل (نسبت طول به قطر)	\dot{Y}_v	\dot{N}_v
۸/۵	1.27	0.44
۹/۵	1.42	0.53
۱۰/۵	1.57	0.56
۱۲/۵	1.85	0.68

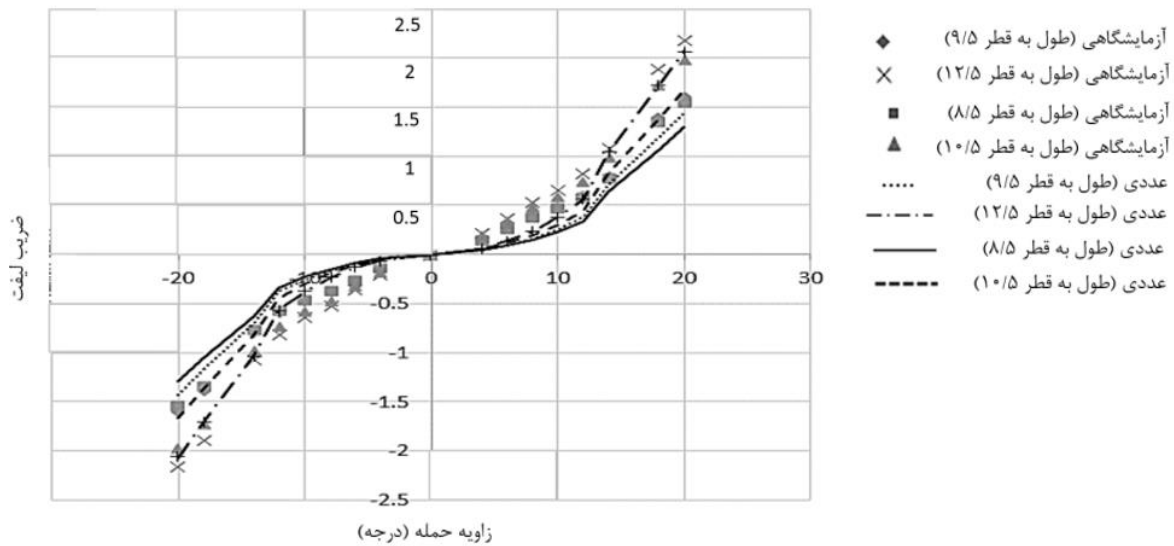
جدول (۶) ضرایب هیدرودینامیکی عرضی.

مدل (نسبت طول به قطر)	\dot{Y}_{vvv}	\dot{N}_{vvv}
۸/۵	2.31	1.67
۹/۵	2.24	1.83
۱۰/۵	2.35	2.42
۱۲/۵	2.47	2.56

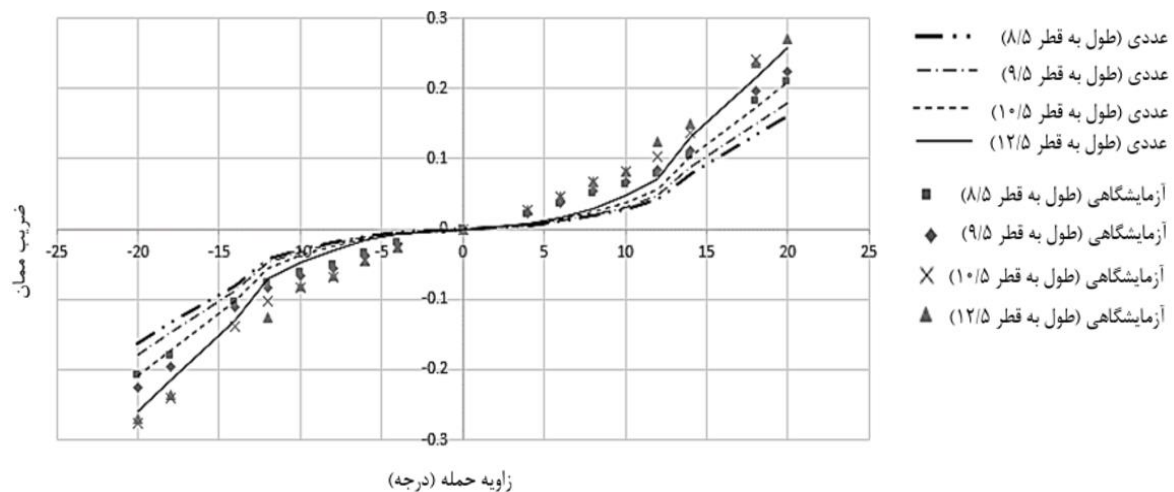
با رسم نمودار تغییرات این نیروها و ممان بر حسب زاویه حمله و برازش منحنی مناسب بر داده‌های به دست آمده و انجام محاسبات ریاضی ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی به دست می‌آیند. برای شبیه‌سازی این آزمایش در محیط دینامیک سیالات محاسباتی بدنه مدل به صورت ثابت با زاویه حمله مشخص قرار گرفته و جریان یکنواخت سیال با سرعت ثابت از روی بدنه عبور داده می‌شود. نیروهای طولی و عرضی و ممان یا وارد شده به بدنه اندازه‌گیری می‌شود. برای افزایش دقت محاسبات و همچنین امکان استخراج ضرایب هیدرودینامیک غیرخطی مدل در زوایای ۲۰- تا ۲۰+ درجه با فواصل ۲ درجه در معرض جریان با سرعت ۲ متربر ثانیه قرار گرفته‌است. این شبیه‌سازی برای چهار مدل طراحی شده با نسبت طول به قطرهای مختلف انجام شده- است. نمودارهای تغییرات نیروی طولی و عرضی بر حسب تغییرات زاویه حمله برای مدل‌های مختلف در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رسم شده‌است. به دلیل تقارن بدنه نسبت به محور طولی مقدار نیروی طولی ایجاد شده در دو زاویه حمله قرینه β و $-\beta$ باید مقدار یکسانی داشته باشد. در حقیقت نمودار تغییرات نیروی طولی نسبت به تغییرات زاویه حمله باید تابعی زوج باشد که این موضوع در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. از طرفی به دلیل تقارن بدنه نسبت به محور طولی نیروی عرضی ایجاد شده در دو زاویه حمله قرینه β و $-\beta$ باید از نظر مقدار برابر و از نظر علامت مخالف هم باشند. به عبارت دیگر نیروی عرضی می‌بایست تابعی فرد از زاویه حمله باشد. این موضوع در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. نتایج آزمایشگاهی موجود برای مقایسه در این دو نمودار مشاهده می‌شود. نمودار تغییرات ممان یا بر حسب زاویه حمله برای مدل‌های مختلف در شکل (۱۲) رسم شده‌است. مانند نیروی عرضی که تغییراتش تابعی فرد از زاویه حمله می‌باشد، به دلیل تقارن بدنه مدل نسبت به محور طولی، نمودار تغییرات ممان یا نیز تابعی فرد از زاویه حمله است. به عبارت دیگر نمودار ممان یا - زاویه حمله نسبت به مرکز مختصات متقارن است. در این شکل نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شده‌است. ضرایب هیدرودینامیک خطی Y_v و N_v از نمودارهای نیروی عرضی و ممان یا بر حسب زاویه حمله با استفاده از روابط مشتق زنجیره‌ای محاسبه می‌شوند:



شکل (۱۰) نمودار نیروی طولی (مقاومت) بر حسب زاویه حمله (نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی).



شکل (۱۱) نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله (نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی).

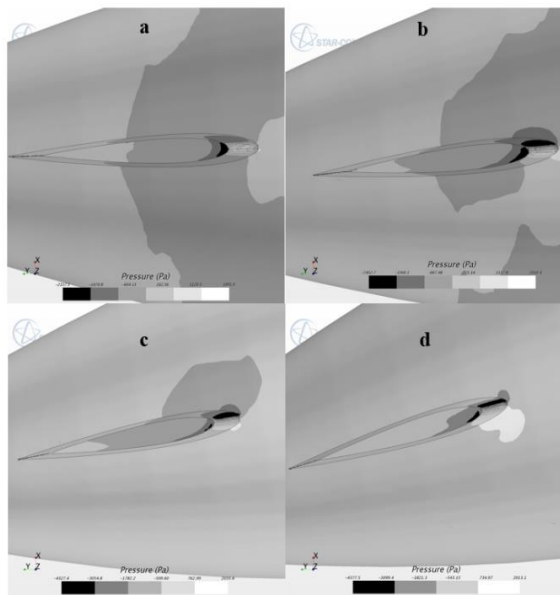


شکل (۱۲) نمودار ممان یاو بر حسب زاویه حمله (نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی).

نتیجه ضرایب هیدرودینامیکی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده برای ضرایب هیدرودینامیکی بدنه مجهز به هیدروپلن با نسبت طول به قطر $8/5$ در جدول (۷) ارائه و با نتایج مربوط به بدنه برهنه مقایسه شده است.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با کمک نرم افزار STAR CCM+، تست‌های مانور شبیه سازی شد و نیروها و ضرایب هیدرودینامیکی دمپینگ برای شناور برای مدل-های مختلف در سرعت‌های متفاوت به دست آمد. این روش می‌تواند در مراحل اولیه طراحی برای پیش‌بینی مانورپذیری ربات‌های هوشمند زیرآبی و همچنین در زمینه طراحی سیستم کنترلی برای این شناورها کاربرد فراوان داشته باشد. با انجام آزمایش برای زوایای مختلف دریافت ضرایب هیدرودینامیکی غیرخطی دمپینگ نیز محاسبه شدند.



شکل (۱۳) توزیع فشار در اطراف هیدروپلن NACA0012 برای زوایای حمله مختلف برای سرعت روبه جلوی ۲ متر بر ثانیه (a) زاویه حمله ۲ درجه، b زاویه حمله ۶ درجه، c زاویه حمله ۱۰ درجه و d زاویه حمله ۱۶ درجه).

۳-۶ آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای برای بدنه مجهز به هیدروپلن

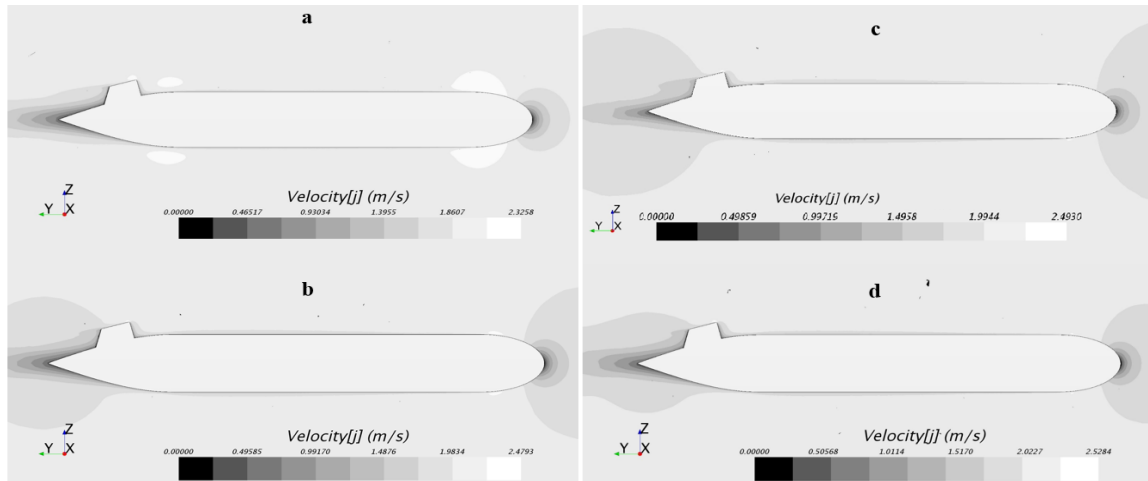
هیدروپلن‌ها المان‌هایی با مقطع هیدروفویل می‌باشند که جهت بهبود مشخصات مانورپذیری و پایداری شناورهای زیر سطحی در صفحات افقی و عمودی استفاده می‌شوند. وجود هیدروپلن‌ها در عقب شناور باعث تغییر مقادیر نیرو و ممان‌های هیدرودینامیکی و در نتیجه ضرایب هیدرودینامیکی موثر در پایداری و مانورپذیری می‌شود. در ادامه جهت بررسی اثر کلی این المان بر مشخصات هیدرودینامیکی ربات هوشمند زیردریایی و همچنین بررسی اثر نوع هیدروپلن بر این مشخصات، آزمایش کشش در زوایای دریافت مختلف برای بدنه مجهز به هیدروپلن برای چهار هیدروپلن با سطح مقطع مختلف انجام می‌شود و نیرو و ممان‌های هیدرودینامیکی و در نتیجه ضرایب هیدرودینامیکی خطی و غیرخطی محاسبه می‌شوند و با نتایج حاصل در حالت بدنه برهنه مقایسه خواهند شد.

در شکل (۱۳) توزیع فشار در اطراف هیدروپلن NACA0012 برای زوایای حمله متفاوت در سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه نشان داده شده است. تغییرات محل محل نقطه سکون با تغییر زاویه حمله به خوبی دیده می‌شود. در شکل (۱۴) توزیع سرعت در اطراف بدنه مدل در حالت بدنه مجهز به هیدروپلن در حالت بدون زاویه حمله و سرعت روبه جلوی ۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود. در این اشکال مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت هیدروپلن حداکثر سرعت بدنه که در اطراف هیدروپلن رخ می‌دهد افزایش می‌یابد.

این پدیده به دلیل افزایش گرادیان تغییرات فرم هیدروپلن با افزایش ضخامت آن می‌باشد. افزایش گرادیان سرعت، افزایش گرادیان فشار و در نتیجه افزایش نیروی تولیدی توسط هیدروپلن را در پی دارد. در واقع همانطور که قابل پیش‌بینی می‌باشد با افزایش ضخامت هیدروپلن به ازای تغییرات ثابت سرعت تغییرات نیروهای هیدرودینامیکی و در

جدول (۷) مقادیر عددی ضرایب هیدرودینامیکی.

	Bare Hull	NACA 0012	NACA 0015	NACA 0018	NACA 0020
Y'_v	1.27	1.54	1.62	1.64	1.89
N'_v	0.44	0.62	0.71	0.88	1.00
Y'_{vvv}	2.31	2.38	2.54	2.78	2.93
N'_{vvv}	1.67	1.83	2.05	2.22	2.47



شکل (۱۴) توزیع سرعت در اطراف بدنه‌های مجهز به هیدروپلن برای حالت سرعت ۲ متر بر ثانیه (از بالا به پایین؛ بدنه مجهز به هیدروپلن NACA0012، NACA0015، NACA0018 و NACA0020).

- PMM Data”, 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, pp.1-18, 26-31 August 2012.
- [5] Hajivand, A., Mousavizadegan, S. H., “Virtual Maneuvering Test in CFD Media in Presence of Free Surface”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.7, No.3, pp.540-558, 2015
- [6] Hajivand, A., Mousavizadegan, S. H., “Virtual Simulation of Maneuvering Captive Tests for a Surface Vessel”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.7, No.5, 2015
- [7] Williams, C. D., Curtis, T., Doucet, J. M., Issac, M. T., Azarsina, F., “Effects of Hull Length on the Hydrodynamic Loads on a Slender Underwater Vehicle During Manoeuvres”, *IEEE Ocean Conference*, Boston, MA, 2006.
- [8] Beck, R., Reed, A., “Modern Seakeeping Computations for Ships”, *Twenty Third Symposium on Naval Hydrodynamics*, Val de Reuil, Ch.2, P. 1005, 2000.
- [9] Ferziger, H. J., Peric, M., “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Third rev. edition, chapter 9, 2002.
- [10] Roache, P. J., “Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.29, pp.123-160, 1997.
- [11] Azarsina, F., Williams, C. D., “Manoevring Simulation of the MUN Explorer AUV based on the Empirical”, *Journal of Applied Ocean Research*, Vol.32, pp.443-453, 2010.

با نتایج به دست آمده می‌توان پایداری دینامیکی و مانورپذیری شناور در مرحله طراحی اولیه را بررسی نمود و در صورت نیاز به اصلاح با تغییر ابعاد و یا با استفاده از ملحقات به معیارهای کنترل و مانورپذیری مورد نظر دست پیدا کرد. اثر هیدروپلن‌های مختلف بر ضرایب هیدرودینامیکی بدنه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سطح مقطع هیدروپلن ضرایب خطی افزایش پیدا می‌کنند که این امر موجب افزایش مانورپذیری و کاهش پایداری دینامیکی می‌شود. بنابراین انتخاب هیدروپلن مناسب به مشخصات هیدرودینامیکی مورد نظر بستگی دارد. دینامیک سیالات محاسباتی با توانایی و سرعت بالا در محاسبات، امکان بهینه‌سازی فرم بدنه و هیدروپلن مورد نظر را ایجاد می‌کند.

۸- مراجع

- [1] Tyagi, A., Sen, D. “Calculation of Transverse Hydrodynamic Coefficients Using Computational Fluid Dynamic Approach”, *Journal of Ocean Engineering*, Vol.33, pp.798-809, 2006.
- [2] Zhang, H., Xu, Y., Cai, H., “Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficients”, *Journal of Science Marine Applications*, Vol.9, pp.137-151, 2010.
- [3] Nazir, Z., Su, Y., Wang, Z., “A CFD Based Investigation of the Unsteady Hydrodynamic Coefficients of 3-D Fins in Viscous Flow”, *Journal of Marine Science Applications*, Vol.9, pp.250-255, 2010.
- [4] Simonsen, C. D., Otzen, J. F., Klimt, C., Larsen, N. L. and Stern, F., “Maneuvering Predictions in the Early Design Phase using CFD Generated