



بررسی عددی و تجربی اثر زاویه سطوح کنترلی بر نیروی پسای یک ربات هوشمند زیر آبی

احسان جوانمرد¹، شهریار منصورزاده^{2*}، احمد رضا پیشه‌ور³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، shahriar@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1393

پذیرش: 06 مهر 1393

ارائه در سایت: 24 آبان 1393

کلید واژگان:

ربات هوشمند زیر آبی

سطوح کنترلی

دینامیک سیالات تجربی

دینامیک سیالات محاسباتی

حوضچه کشش

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی اثر تغییر زاویه سطوح کنترلی افقی (سطوح کنترلی استرن) بر میزان نیروی درگ وارد بر ربات هوشمند زیر آبی پژوهشگاه علوم و فناوری زیر دریا به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی و استخراج ضریب هیدرودینامیکی مربوط به آن است. در بخش تجربی پژوهش، مدل یک به یک این ربات درون حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان تحت کشش با زوایای حمله مختلف برای سطوح کنترلی افقی قرار می‌گیرد. در این آزمون‌ها، سرعت کشش ربات در محدوده سرعت 1 تا 3 متر بر ثانیه و اتصال مدل به ارباب کشش توسط استروتهایی با مقطع هیدروفویل انجام شده است. در ادامه، نیرو و ضریب درگ وارد بر یک سطح کنترلی این ربات در سرعت‌های کشش مختلف و نیز زوایای مختلف استرن به روش تجربی استخراج شده‌اند. در بخش عددی پژوهش، آزمون‌های تجربی صورت گرفته در بخش آزمایشگاهی توسط کد تجاری سی اف ایکس در سرعت 1/5 متر بر ثانیه شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. در این مقاله نشان داده شده است که تغییرات نیروی پسای و ضریب نیروی پسای ربات نسبت به زاویه استرن به‌صورت یک منحنی درجه دوم قابل تخمین است و ضریب هیدرودینامیکی مرتبط با آن، به دو روش تجربی و عددی استخراج شده است. تطابق خوب نتایج حاصل از دو روش نشان داد که میتوان روش‌های عددی را در محدوده سرعت‌های مورد بررسی جایگزین روش‌های پر هزینه تجربی کرد. نتایج حاصله نشان داد که در سرعت 1/5 متر بر ثانیه با افزایش زاویه سطوح کنترلی به 45 درجه ضریب درگ 174 درصد افزایش می‌یابد.

A Numerical and Experimental Investigation of Effect of Control Surface Angle on an Autonomous Underwater Vehicle Drag

Ehsan Javanmard¹, Shahriar Mansoorzadeh^{2*}, Ahmad Reza Pishevar³

1- Subsea Science & Technology Center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Subsea Science & Technology Center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 8415683111 Isfahan, Iran, shahriar@cc.iut.ac.ir.

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 August 2014
Accepted 28 September 2014
Available Online 15 November 2014

Keywords:

Autonomous Underwater Vehicle
Control Surfaces
Computational Fluids Dynamic
Experimental Fluids Dynamic
Towing Tank

ABSTRACT

In this paper the effect of horizontal control surfaces (stern fins) angle on the drag force of the Subsea R&D Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is investigated using both experimental fluids dynamic and numerical fluids dynamic methods. The experiments were conducted in the Subsea R&D towing tank using a 1:1 scale model of the AUV at various stern angles, and in a speed range of 1 to 3 m/s. A pair of NACA shaped struts was used to connect the AUV to the carriage dynamometer. The stern drag force was experimentally calculated at various stern angles and towing speeds. The results obtained by experimental method were compared with those obtained numerically by commercial computational fluid dynamics CFX code. Both experimental and numerical results showed that as the stern angle increases, the total AUV drag force increases, and the drag force coefficient can be estimated by a second order polynomial. The results showed that, at a speed of 1.5m/s, as the stern angle increases to 45 degrees, the drag coefficient increases up to 174 percent It was also observed that at a specific stern angle, the drag force due to stern fin increases with the AUV speed. Variation of axial force as a function of stern angle was determined by using both experimental and numerical methods. The results obtained by both methods showed that the expensive experiments conducted in towing tanks can be replaced by numerical simulations.

1- مقدمه

از جمله شناورهای بدون سرنشین، ربات هوشمند زیر آبی³ می‌باشد که به‌صورت یک وسیله مستقل و هوشمند عمل می‌کند. این ربات‌ها قادر به پیچیدن یک مسیر از پیش تعیین شده بوده و در صورت مواجه با شرایط مختلف از جمله موانع، قدرت تصمیم‌گیری دارند. بطور کلی می‌توان کاربرد این

شناورهای زیر سطحی با توجه به قابلیت‌ها و روش استفاده از آنها تقسیم بندی می‌شوند. یکی از راه‌های دسته بندی آنها قراردادن آنها در یکی از دو گروه عمده سیستم‌های با سرنشین¹ و بدون سرنشین² می‌باشد.

1- Manned
2- Unmanned

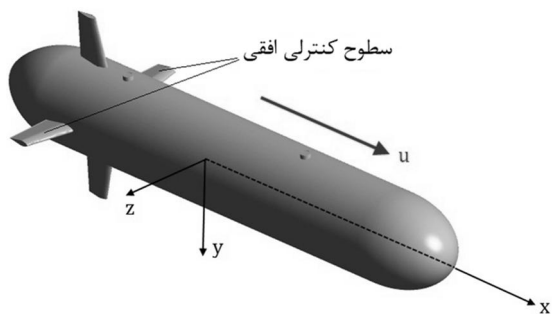
3- Autonomous Underwater Vehicle

Please cite this article using:

E.Javanmard, Sh. Mansoorzadeh, A.R. Pishevar, A Numerical and Experimental Investigation of Effect of Control Surface Angle on an Autonomous Underwater Vehicle Drag, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 358-366, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sst.ir



شکل 2 ربات در حال انجام یک حرکت مستقیم

بنابراین طبق رابطه تجربی (1) یک نیروی پسا به صورت محوری به آن وارد می شود که با نماد X نشان داده می شود [5].

$$X = -\left(\frac{1}{2} \rho c_d A\right) u|u| \quad (1)$$

که در آن ρ دانسیته سیال، c_d ضریب پسای محوری ربات و A سطح مقطع عرضی آن است. ضریب هیدرودینامیکی تشریح کننده این نیرو که با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی به صورت $X_{u|u}$ نشان داده می شود، به صورتی که در رابطه (2) ارائه شده است، قابل تعریف می باشد.

$$X_{u|u} = \frac{\partial}{\partial |u|} \frac{\partial X}{\partial u} = -\left(\frac{1}{2} \rho c_d A\right) \quad (2)$$

بنابراین می توان رابطه (1) را به صورت $X = X_{u|u} u|u|$ نمایش داد. ضریب هیدرودینامیکی $X_{u|u}$ در واقع شناسه نیروی محوری وارد بر ربات در طی این حرکت خواهد بود که با در اختیار داشتن آن می توان نیروی محوری وارد بر ربات را در هر سرعت دلخواه محاسبه کرد. با تعمیم این مثال به یک ربات با شش درجه آزادی حرکت، می توان نیروها و گشتاورهای وارد شده در جهت های مختلف را با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی و به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان کرد [6].

3- روش های استخراج ضرایب هیدرودینامیکی و پژوهش های انجام شده در این زمینه

روش های برآورد ضرایب هیدرودینامیکی شامل انجام تست های آزمایشگاهی درون حوضچه کشش¹، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی جهت تحلیل جریان پیرامون یک شناور زیرسطحی و استفاده از روابط نیمه تجربی است. در روش آزمایشگاهی بایستی متناسب با ضریب هیدرودینامیکی مجهول، حرکتی را در حوضچه کشش به شناور اعمال کرد.

آزمایش های ساده از قبیل تست های استاتیکی که در آن شناور بدون انجام مانور، درون حوضچه حرکت داده می شود، به مکانیزم پیچیده ای نیاز ندارد و شناور در وضعیت های مختلف (با زاویه حمله، با زاویه انحراف و ...) از طریق ارباب کشش² حرکت داده می شود. استخراج برخی از ضرایب هیدرودینامیکی به روش آزمایشگاهی مستلزم استفاده از مکانیزم هایی است که بتوانند حرکات و مانورهای مورد نیاز را به شناور اعمال کنند. تست های بازوی چرخان³ و تست های حرکت صفحه ای⁴ از مهمترین این آزمون ها می باشند. مکانیزم مورد استفاده در آزمون های حرکت صفحه ای بگونه ایست که ضمن کشش شناور در طول حوضچه کشش، مانورها و حرکاتی را در یکی از صفحات افقی و یا قائم به شناور اعمال می کند. مراجع [7-13] نمونه هایی از پژوهش های تجربی است که در هریک متناسب با ضریب هیدرودینامیکی مورد نیاز، از یکی از روش های تجربی جهت استخراج آن استفاده شده است.

ربات ها را در سه بخش فراساحلی، نظامی و تحقیقاتی دسته بندی نمود. این ربات ها امروزه در حوزه های مختلفی از قبیل بازرسی، اکتشاف، تعمیر و نگهداری، عملیات نجات، نظامی، محیط زیست و بیولوژیک کاربرد دارند [1-4]. در شکل 1 تصویری از ربات هوشمند زیرآبی ساخته شده در پژوهشکده علوم و فناوری زیردریا دانشگاه صنعتی اصفهان نشان داده شده است. در جدول 1 نیز مشخصات فنی این ربات ارائه شده است. در مسیر طراحی شناورهای زیر سطحی لازم است که مقادیر نیروها و گشتاورهای وارد شده از سوی سیال بر شناور مشخص باشد. تعیین این نیروها امکان برآورد قدرت پیشران مورد نیاز و نیز بررسی پایداری و قابلیت کنترل و مانور پذیری شناور را میسر می سازد. دینامیک حرکت شناورهای زیر سطحی توسط مدل های ریاضی دقیق مورد بررسی قرار می گیرد. این مدل ریاضی که به مدل دینامیکی وسیله مشهور است شامل تمامی نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که در شرایط واقعی به شناور وارد می شود. در مباحث هیدرودینامیکی این نیروها به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می شوند.

2- ضرایب هیدرودینامیکی

از آنجائی که نیروها و گشتاورهای وارد بر یک شناور زیرسطحی تابعی از سرعت بدنه، نوع حرکت و مانور وسیله و نیز شکل هندسی بدنه هستند، معمولاً دارای مقادیر ثابتی نمی باشند و به همین دلیل در مباحث هیدرودینامیکی این نیروها به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می شوند و تعیین این ضرایب یکی از اولین و مهمترین کارهای طراحان است. اما منظور از ضرایب هیدرودینامیکی چیست؟ تعریف یک ضریب هیدرودینامیکی با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی انجام می شود. برای روشن شدن موضوع فرض می شود که یک ربات هوشمند زیر آبی مطابق با شکل 2 با سرعت ثابت u در حال حرکت مستقیم باشد.

جدول 1 مشخصات فنی ربات هوشمند زیرآبی

مشخصه	توضیحات
شکل	اژدر مانند
طول (m)	1/45
قطر (m)	0/23
وزن (kg)	45
بیشینه عمق عملیات (m)	20
بیشینه زمان عملیات (hr)	2/5
سطوح کنترلی	NACA0015
بیشینه سرعت افقی (m.s ⁻¹)	1/5



شکل 1 ربات هوشمند زیرآبی دانشگاه صنعتی اصفهان

1- Towing tank
2- Carriage
3- Rotating arm
4- Planar motion

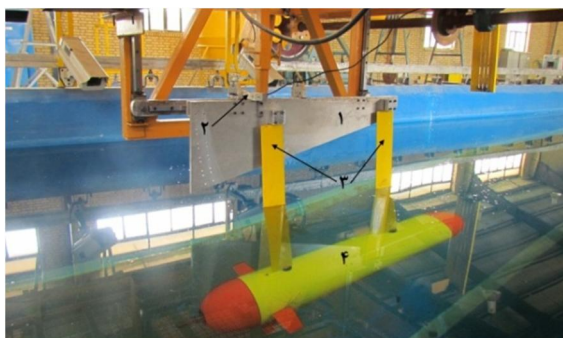
نیروهای وارده بر مدل بدست می‌آید. در پژوهش حاضر از دینامومتر یک درجه آزادی استفاده شده است که موقعیت آن در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 2 شرایط مد نظر برای انجام تست‌های تجربی

سرعت ربات درون حوضچه کشش (متر بر ثانیه) زاویه سطوح کنترلی افقی (درجه)	
45, 30, 25, 20, 15, 10, 5, 0	1, 1/25, 1/5, 1/75, 2, 2/5, 3



شکل 3 نمایش از یک سطح کنترلی افقی با زاویه حمله (زاویه استرن)



شکل 4 موقعیت دینامومتر (1)، لودسل (2)، استروت‌ها (3) و مدل (4)



شکل 5 استروت‌ها با مقطع هیدروفویل شکل



شکل 6 حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان

از روش‌های عددی معمولاً به علت هزینه‌های بالای تجهیزات آزمایشگاهی، جهت شبیه سازی آزمون‌های تجربی و یا اعتبارسنجی آنها استفاده می‌شود [8, 13-17]. در این حوزه، با بهره گیری از دینامیک سیالات محاسباتی، میدان جریان پیرامون ربات در آزمون‌های مختلف شبیه سازی می‌شود. کاربرد روابط نیمه تجربی در استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، صرفاً به هندسه‌های بسیار ساده محدود می‌شود و در فرآیند طراحی یک ربات با هندسه پیچیده جواب‌های غیر منطقی خواهد داشت. به همین علت در تمامی تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، نتایج حاصله با یکی از روش‌های عددی و یا تجربی اعتبارسنجی شده است [18, 19].

در هیچ یک از تحقیقات انجام شده در مراجع بالا، اثر تغییرات زاویه سطوح کنترلی بر میزان نیروی پسای ربات در نظر گرفته نشده است و در ارتباط با سطوح کنترلی، صرفاً کارایی این سطوح در تولید نیروی برآ (در مانورهای مربوط به تغییر عمق) و نیروی جانبی (در مانورهای مربوط به تغییر جهت) مورد بررسی قرار گرفته است. حال آنکه با تغییر زاویه سطوح کنترلی جهت انجام یک مانور مشخص در بستر دریا، نیروی پسا نیز دچار تغییراتی می‌شود که نادیده گرفتن این تغییرات در فرآیند طراحی یک ربات منجر به پایین آمدن دقت مدل دینامیکی و عدم کارایی آن در کنترل هوشمند ربات خواهد شد ضمن آنکه بدون در نظر گرفتن این اثرات، امکان برآورد دقیق نیروی پیشران مورد نیاز وجود نداشته و این باعث عدم تخمین واقعی مصرف انرژی و انتخاب نامناسب باتری‌ها در ربات خواهد شد.

پژوهش حاضر شامل تحلیل‌های آزمایشگاهی و عددی بر روی یک نمونه ربات زیرآبی تحقیقاتی به منظور بررسی میزان تاثیر زاویه سطوح کنترلی بر نیروی پسای وارده بر ربات است. این اثرات به صورت یک ضریب هیدرودینامیکی معرفی خواهد شد تا امکان اضافه کردن آن به مدل دینامیکی ربات وجود داشته باشد.

4- آماده سازی تجهیزات آزمایشگاهی و انجام تست های تجربی

در بخش تجربی پژوهش حاضر یک مجموعه تست آزمایشگاهی با شرایط مندرج در جدول 2 در حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان بر روی مدل یک به یک ربات انجام خواهد شد. به طوری که در جدول 2 مشاهده می‌شود آزمون‌های تجربی در محدوده مناسبی از سرعت ربات انجام می‌شوند تا بتوان نقش سرعت ربات را بر نتایج حاصله مورد بررسی قرار داد. در شکل 3 تصویری از مدل یک به یک ربات زیرآبی با زاویه حمله برای سطوح کنترلی افقی (استرن¹) نمایش داده شده است. مدل از جنس فایبرگلاس بوده و جرم آن بگونه ای در نظر گرفته شده است که به هنگام قرارگیری درون حوضچه کشش دارای بویانسی تقریباً صفر باشد. جهت نصب مدل ساخته شده بر روی ارابه کشش از واسطه‌هایی موسوم به استروت² استفاده میشود. استروت‌ها در واقع واسطه بین مدل و دینامومتر³ هستند و در پژوهش حاضر از دو استروت به شکل هیدروفویل NACA0012 استفاده شده است. در شکل 4 نمایش از نحوه اتصال مدل به ارابه کشش، در شکل 5 تصویری از استروت‌ها، در شکل 6 نمایش از حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان و نهایتاً در شکل 7 شماتیکی از حوضچه و تجهیزات مورد استفاده جهت انجام آزمایش نشان داده شده است. یکی از مهمترین تجهیزات مورد استفاده دینامومتر می‌باشد. نیروهای وارد شده به مدل در حین آزمایش از طریق لودسل⁴ تعبیه شده بر روی دینامومتر دریافت و در نتیجه آن، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی در لودسل حاصل می‌شود که باتوجه به کالیبراسیون انجام شده بر روی آن، میزان

1- Stern
2- Strut
3- Dynamometer
4- Load cell

علت حضور حرکت‌های گردابه‌ای، بکارگیری این معادلات و حل آنها بطور مستقیم بسیار مشکل است. به همین دلیل معمولاً از شکل متوسط‌گیری شده معادلات ناویر-استوکس (RANS) استفاده می‌شود. این معادلات در روابط (3) و (4) نشان داده شده است [20].

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

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + f_i \quad (4)$$

در این فرم از معادلات عبارتی تحت عنوان تنش‌های رینولدز $(\bar{U}_i \bar{U}_j)$ به معادلات اضافه می‌شود که برای بسته شدن معادلات و حل آنها لازم است که آنها را مدل سازی نمود. در کار حاضر برای مدل سازی تنش های رینولدز از مدل آشفتگی انتقال تنش‌های رینولدز³ (SST) به علت توانایی بالای این مدل در پیش بینی جدایش جریان استفاده می‌شود [21]. مدل آشفتگی انتقال تنش‌های رینولدز علاوه بر دربرداشتن اثرات رینولدز پایین، اثرات پراکندگی جریان برشی را نیز شامل می‌باشد [22]. با این کار معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس در شرایط دائم، غیرقابل تراکم و بدون در نظر گرفتن مسئله دمایی، به منظور حل کردن میدان جریان کارترین $(U_i = u, v, w)$ و فشار (p) سیال توسط نرم افزار بکار گرفته شده است.

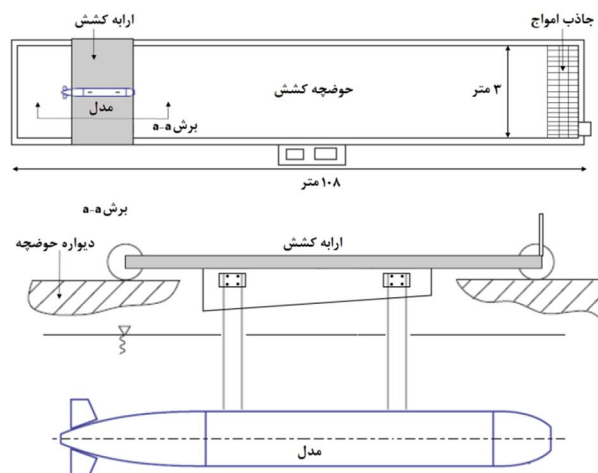
5-3- مشخصات میدان جریان و شرایط مرزی

به طوری که در شکل 9 نشان داده شده است میدان جریان برای شبیه سازی آزمون های کشش به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته می‌شود. ابعاد میدان حل بایستی بگونه ای انتخاب شود که ضمن عدم تاثیر دیواره ها بر نتایج تحلیل عددی، حجم محاسبات سنگین نشود. بنابراین ابعاد بهینه میدان حل به گونه ای انتخاب شده است که ضمن ارضای مرزهای بینهایت، هزینه های محاسباتی مسئله نیز در سطح پائینی قرار گیرد. لذا در کار حاضر شرط مرزی ورودی در فاصله ای معادل دو برابر طول وسیله در بالادست جریان قرار گرفته و از شرط سرعت ثابت با شدت اغتشاش⁴ ورودی به میزان 5 درصد برای آن استفاده شده است.

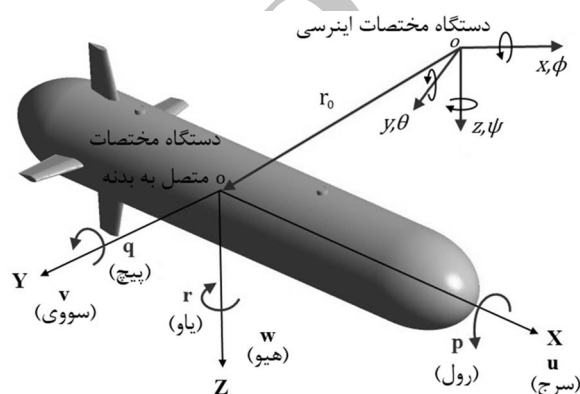
شرط مرزی خروجی در فاصله ای معادل 5 برابر طول وسیله در پایین دست جریان قرار گرفته و دارای شرط فشار متوسط استاتیکی است. با توجه به آن که دیواره های جانبی به میزان کافی از بدنه ربات فاصله دارند، اثرات جریان در این نواحی بر روی بدنه ربات ناچیز است و لذا دیواره های جانبی دارای شرط لغزش آزاد⁵ بوده و در فاصله ای در حدود 4 برابر قطر وسیله قرار گرفته اند. شرط عدم لغزش⁶ نیز به عنوان شرط مرزی بدنه ربات در نظر گرفته شده است.

5-4- شبکه بندی میدان حل

برای ایجاد شبکه محاسباتی از ماژول ICEM نرم افزار استفاده شده است. ساختار شبکه از نوع بی سازمان بوده و ضمن استفاده از شبکه ریز در نواحی که دارای گرادیان شدید است نظیر بالک ها و دماغه⁷، برای حل دقیقتر لایه مرزی پیرامون وسیله، روی دیواره های وسیله مرز ایجاد شده است. مفهوم این کار افزایش چگالی شبکه در نزدیکی دیوارها است. در مناطق نزدیک دیوار، لایه مرزی سبب می‌شود که گرادیان های سرعت عمود بر صفحه زیاد باشد.



شکل 7 شماتیکی از حوضچه کشش و تجهیزات مورد استفاده جهت آزمایش



شکل 8 نمایش دستگاه های مختصات



شکل 9 شماتیکی از شرایط مرزی در شبیه سازی های مورد نظر

5- آماده سازی پخش عددی

5-1- دستگاه مختصات

برای تحلیل هیدرودینامیکی هر وسیله زیر سطحی تعیین دستگاه مختصات مورد استفاده الزامی است. در این راستا دو دستگاه مختصات قابل تعریف است که عبارتند از دستگاه مختصات اینرسی¹ و دستگاه مختصات متصل به بدنه². برای یک وسیله زیر سطحی با شش درجه آزادی حرکت، موقعیت این دو دستگاه در شکل 8 نمایش داده شده است. توجه شود که مبدأ دستگاه مختصات اینرسی یک نقطه مشخص از فضا است در حالیکه مبدأ دستگاه مختصات متصل به بدنه دقیقاً روی مرکز شناوری جسم قرار می‌گیرد. محورهای مختصات، مولفه های سرعت خطی و سرعت زاویه ای در شکل 9 نشان داده شده است.

5-2- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال بیانی از قوانین بقاء هستند و به معادلات ناویر-استوکس مشهورند. در تحلیل جریان های گذار و یا آشفتنه به

3- Shear Stress Transport

4- Turbulence Intensity

5- Free Slip

6- No Slip

7- Nose

1- Earth-Fixed frame

2- Body-Fixed frame

ترسیم کانتور، صحت و درستی آن چک شود.

5-5- استقلال شبکه محاسباتی

یکی از مسائل مهم در مسائل عددی یافتن مشخصات شبکه‌ای است که نتایج حاصل از آن، مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها باشد. به همین منظور شبکه‌های موجود در جدول 3 برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، مورد مطالعه قرار گرفت تا بتوان با توجه به سرعت جریان، شبکه‌ای را انتخاب نمود که دقت کافی را در حل عددی تأمین نماید و از لحاظ هزینه‌های محاسباتی نیز مقرون به صرفه باشد.

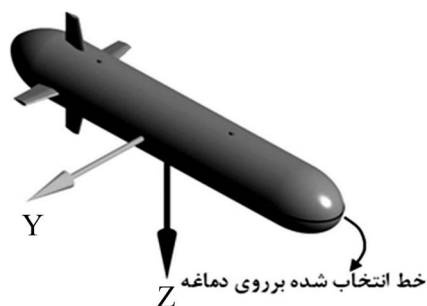
برای بررسی استقلال شبکه از پارامتر ضریب فشار که در رابطه (5) تعریف شده است استفاده می‌شود.

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5\rho U_{ref}^2} \quad (5)$$

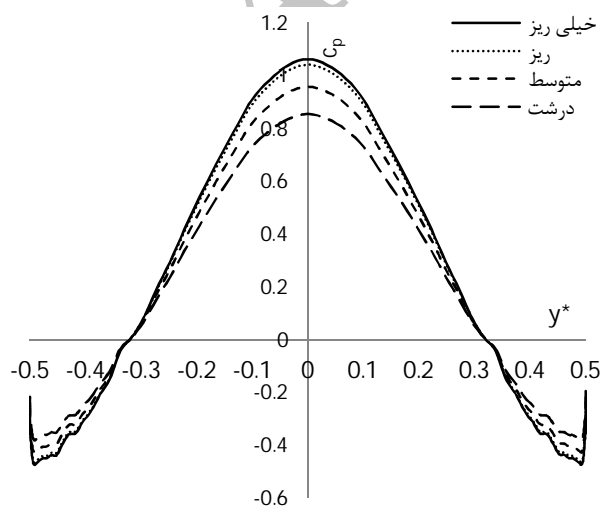
بدین منظور برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف، توزیع ضریب فشار بر روی خط انتخاب شده بر روی دماغه ربات ترسیم می‌شود. موقعیت این خط در شکل 11 نشان داده شده است. در شکل 12 توزیع ضریب فشار در طول خط مذکور نسبت به موقعیت عرضی بدون بعد که به صورت $y^* = \frac{y}{D}$ تعریف می‌شود برای شبکه‌های مختلف نمایش داده شده است.

جدول 3 مشخصات چهار شبکه محاسباتی جهت مطالعه شبکه

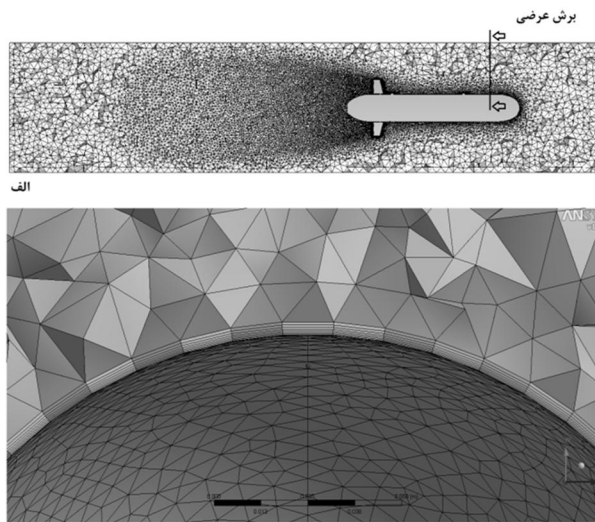
نوع شبکه	تعداد گره	تعداد المان
شبکه درشت	350566	1533339
شبکه متوسط	463269	2138705
شبکه ریز	839494	3837174
شبکه خیلی ریز	1513485	6220143



شکل 11 موقعیت خط انتخاب شده جهت ترسیم توزیع فشار



شکل 12 توزیع ضریب فشار بر روی خط مورد نظر در سرعت 1/5 متر بر ثانیه



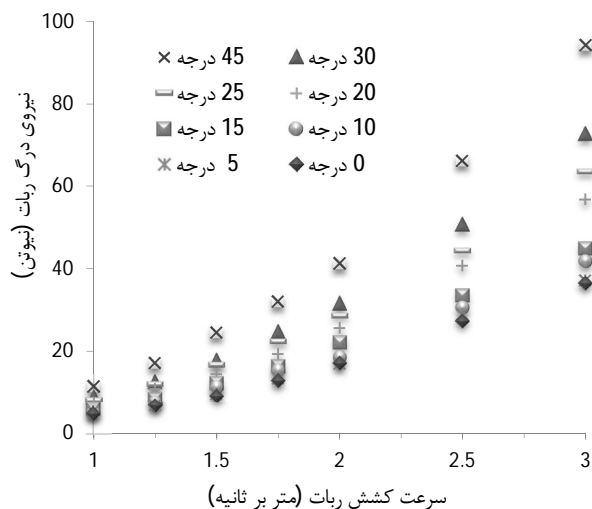
شکل 10 شبکه محاسباتی: (الف) میدان حل، (ب) برش عرضی

بنابراین در نزدیک دیواره‌های وسیله از المان‌های منشوری¹ استفاده می‌شود تا شبکه تولید شده دارای چگالی زیاد در جهت عمود بر دیوار باشد. در شکل 10 نمونه‌ای از شبکه حل تولید شده نمایش داده شده است. تعداد المان، فاصله اولین المان از سطح و نرخ رشد المان‌های منشوری در دقت نتایج بدست آمده موثر است. باتوجه به مطالعات انجام شده، چنانچه مقدار ضخامت بدون بعد اولین المان (Δy^+) برای مدل آشفتگی $k-\epsilon$ معادل 30 و برای مدل آشفتگی SST معادل 11 انتخاب شود، کیفیت شبکه و دقت نتایج مطلوب می‌باشد.

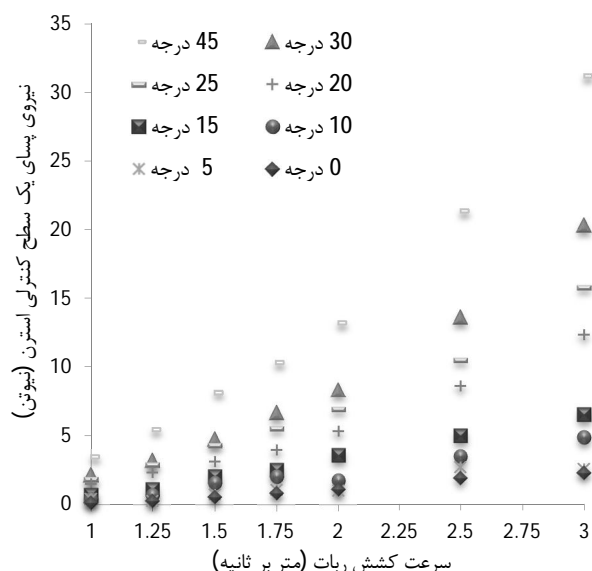
به‌عنوان نمونه در اینجا نحوه آماده سازی یک شبکه منشوری جهت پوشش لایه مرزی در محدوده سرعت کاری ربات با مقدار $\Delta y^+ = 30$ برای مدل آشفتگی $k-\epsilon$ تشریح می‌شود. با توجه به اینکه سرعت کارکرد ربات در تحلیل حاضر 1/5 متر بر ثانیه می‌باشد، رینولدز جریان در انتهای ربات در حدود $2/16 \times 10^6$ خواهد بود. با توجه به محدوده عدد رینولدز، با استفاده از رابطه تجربی $\frac{\delta_L}{L} = \frac{0.382}{Re_L^{0.2}}$ [23] ضخامت لایه مرزی در انتهای وسیله (δ_L) برابر 29 میلی متر خواهد بود. ضخامت بعد دار اولین لایه، از رابطه $\Delta y = L \Delta y^+ \sqrt{80} Re^{-1/4}$ [21]. در نتیجه ضخامت اولین لایه در حدود 0/5105 میلی متر خواهد بود که با لحاظ کردن فاکتور انبساط $1/3^2$ و استفاده از 11 لایه می‌توان کل ضخامت لایه مرزی بر روی مدل را پوشش داد. چنانچه از مدل آشفتگی SST استفاده شود کافیت ضخامت بدون بعد اولین لایه را معادل 11 در نظر گرفته و محاسبات فوق را مجدداً تکرار کرد.

از آنجائی که مدل آشفتگی SST از توانائی بالاتری در پیش بینی جدایش جریان برخوردار است در پژوهش حاضر از این مدل برای پیش‌بینی و مدل سازی تنش‌های رینولدز استفاده شده است. توجه به این نکته الزامی است که در هر یک از حالات شبیه سازی، بایستی یکبار مسئله را با توجه به مقدار Δy^+ در نظر گرفته شده حل کرده و کانتور مربوط به آنرا بر روی مدل ترسیم کرد تا محدوده تغییرات آن چک شود. در صورتی که توزیع این پارامتر بر روی بدنه ربات در محدوده مد نظر قرار گرفته باشد ضخامت اولین لایه مناسب بوده است ولی چنانچه مقدار آن در برخی از نقاط از مقدار تعریف شده برای مدل بیشتر باشد لازم است با اصلاح ضخامت اولین لایه و حل مجدد مسئله و

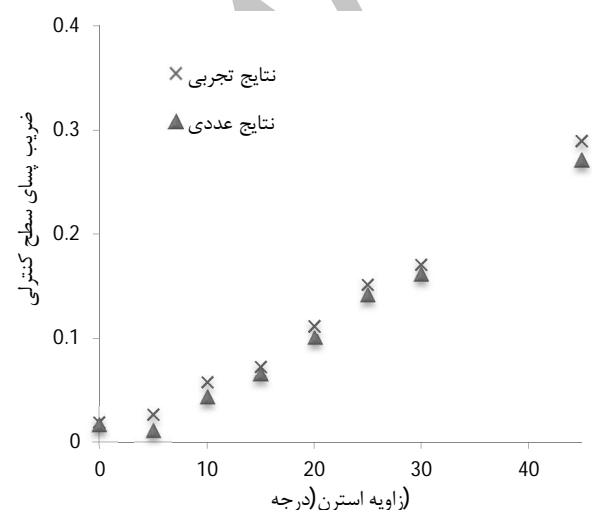
1- Prism
2- Expansion Factor



شکل 13 تغییرات نیروی پسای وارد بر ربات نسبت به تغییرات سرعت کشش برای زوایای استرن مختلف به روش تجربی



شکل 14 تغییرات نیروی پسای وارد بر یک سطح کنترلی استرن نسبت به تغییرات سرعت کشش برای زوایای استرن مختلف به روش تجربی



شکل 15 تغییرات ضریب سطح کنترلی استرن نسبت به تغییرات زاویه استرن در سرعت 1/5 متر بر ثانیه به روش تجربی و عددی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با ریز شدن شبکه ضریب فشار بر روی خط مذکور افزایش پیدا می‌کند و این روند در حالتی که شبکه ریز است تقریباً به حالت ثابت رسیده است و توزیع ضریب فشار در این حالت تقریباً با توزیع فشار شبکه بسیار ریز مطابقت دارد، لذا جهت صرفه جویی در زمان و هزینه‌های محاسباتی از شبکه ریز به عنوان شبکه مناسب جهت تحلیل عددی استفاده می‌شود.

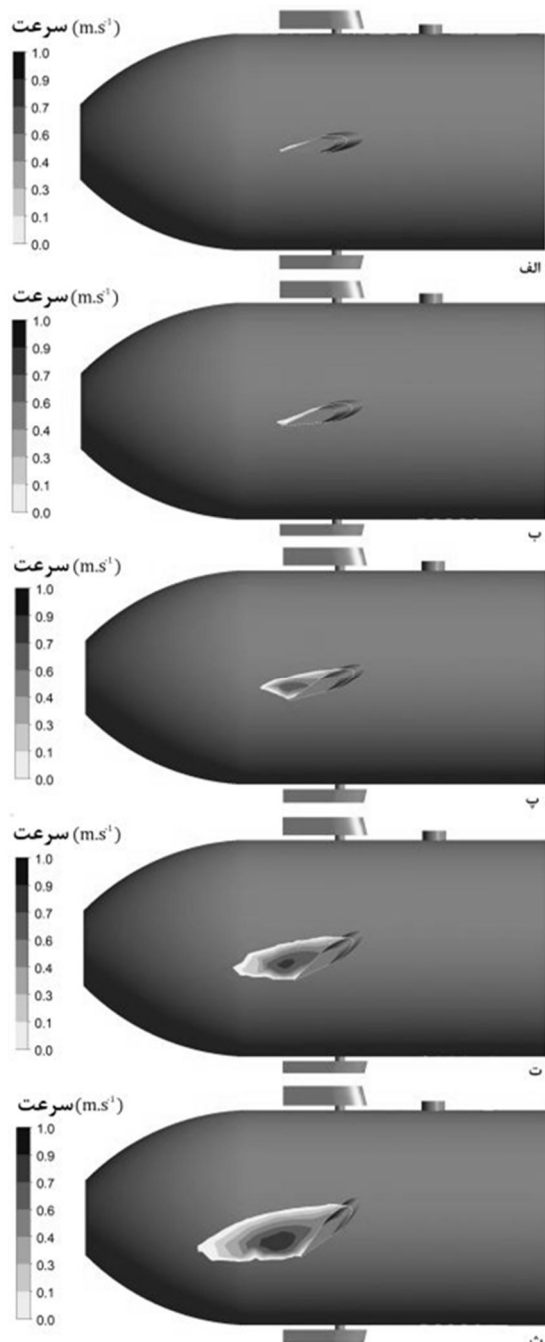
پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، مسائل مورد نظر توسط حلگر CFX بر روی یک پردازنده 4 هسته‌ای 8 رشته‌ای با قدرت 3/02 گیگا هرتز و استفاده از قابلیت موازی‌سازی نرم افزار حل می‌شود. حداکثر تعداد تکرار حلقه داخلی برای همگرایی معادلات در مسائل گذرا در هر بازه زمانی، 20 تکرار در نظر گرفته شده است. در هر گام زمانی نیز معادلات جریان تا مرتبه 10^6 همگرا می‌شوند.

6- نتایج تجربی و عددی

در ارتباط با آزمون‌های کشش بایستی متذکر شد که مطابق با شکل 3 در هریک از آزمون‌ها بایستی زاویه دو سطح کنترلی افقی هم‌زمان تغییر کند. نتایج مربوط به این آزمون‌ها در شکل 13 ارائه شده است. در ارتباط با این آزمون‌ها سعی بر آن است که اثر تغییر زاویه استرن (β) بر نیروی پسای وارد بر ربات و نهایتاً نیروی پسای وارد بر یک سطح کنترلی افقی در سرعت‌ها و زوایای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. به‌طوری که در شکل 13 مشاهده می‌شود، همانگونه که انتظار میرفت، در هر زاویه استرن، با افزایش سرعت کشش، نیروی پسای وارد بر ربات افزایش یافته است. بطور مشابه در هر سرعت کشش، با افزایش زاویه استرن، نیروی درگ وارد بر ربات افزایش پیدا می‌کند. از طرفی می‌توان درگ وارد بر یک سطح کنترلی را در سرعت‌ها و زوایای استرن مختلف بدست آورد. نتایج این تحلیل در شکل 14 ارائه شده است. به‌طوری که مشاهده می‌شود در یک زاویه استرن مشخص، با افزایش سرعت، نیروی پسای افزایش یافته است. این افزایش، در زوایای بالاتر با شیب تندتری پدیدار می‌شود. در اینجا توجه به این نکته الزامیست که نیروهای پسای حاصله در شکل 14، نیروی پسای یک سطح کنترلی متصل بر روی ربات است. لذا نتایج ارائه شده فوق شامل اثرات جریان اطراف بدنه ربات نیز می‌باشد و طبعاً با نتایج حاصل از انجام آزمایش بر روی همان سطح کنترلی به‌صورت مستقل در تونل باد متفاوت است. با توجه به اینکه شناور ساخته شده در پژوهشکده با اضافه شدن تجهیزات جدید به آن در معرض تغییرات زیادی در هندسه آن خواهد بود، در صورتی که به این نتیجه رسیده شود که نتایج عددی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد، میتوان بجای آزمون‌های پر هزینه تجربی از شبیه سازی عددی جهت کسب نتایج مورد نظر استفاده نمود. جهت بررسی تطابق نتایج عددی و نتایج تجربی، شبیه سازی عددی در سرعت 1/5 متر بر ثانیه انجام و با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شود. ضریب پسای یک سطح کنترلی با استفاده از رابطه (6) قابل محاسبه است.

$$C_{d\text{ fin}} = \frac{F_{\text{fin}}}{0.5\rho A_{\text{fin}} u^2} \quad (6)$$

در این رابطه F_{fin} نیروی پسای وارد بر یک سطح کنترلی، A_{fin} سطح مقطع سطح کنترلی و u سرعت جریان سیال و یا سرعت کشش مدل درون حوضچه می‌باشد. نتایج تجربی و عددی حاصله در شکل 15 ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش زاویه استرن، ضریب پسای سطح کنترلی افزایش پیدا می‌کند که علت آن افزایش سطح در مقابل جریان است. از سوی دیگر با افزایش زاویه استرن، اختلاف فشار بین ناحیه پرفشار جلو و ناحیه کم فشار در پشت سطح کنترلی بیشتر شده و این باعث افزایش ضریب پسای آن خواهد شد.



شکل 17 ناحیه جریان بازگشتی در پشت سطح کنترلی در سرعت 1/5 متر بر ثانیه در زوایای استرن: الف) 0 درجه، ب) 15 درجه، پ) 25 درجه، ت) 35 درجه، ث) 45 درجه.

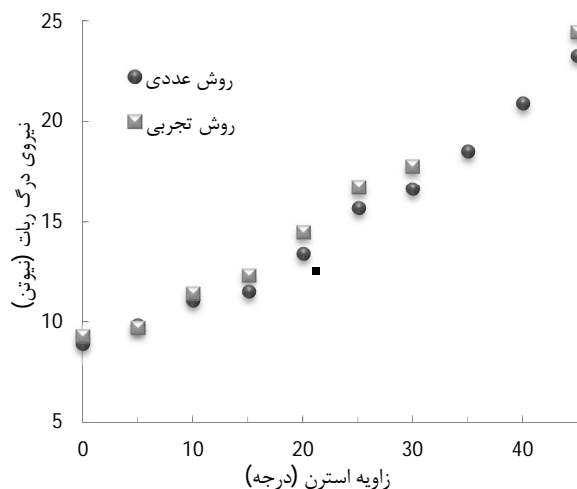
از سوی دیگر با افزایش زاویه استرن، تقارن خطوط جریان در پشت سطوح کنترلی افقی به هم خورده و جریان دچار بازگشت می‌شود. در شکل 17 کانتورهای توزیع سرعت جریان بازگشتی در پشت سطح کنترلی در زوایای استرن مختلف در سرعت 1/5 متر بر ثانیه ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در زاویه استرن 5 درجه وسعت ناحیه بازگشتی به ناحیه کوچکی در لبه فرار سطح کنترلی محدود می‌شود.

با افزایش زاویه استرن، ناحیه بازگشتی وسیع‌تر شده و به سمت لبه حمله سطح کنترلی حرکت می‌کند. به عبارت بهتر با افزایش زاویه استرن نقطه جدایش جریان در پشت سطح کنترلی به سمت لبه حمله جابجا می‌شود. کنترل لایه مرزی تشکیل شده بر روی هیدروفویل‌ها جهت افزایش

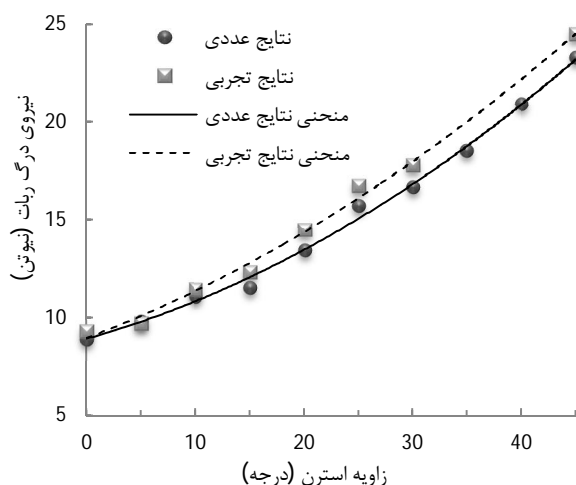
تغییر در زاویه استرن باعث تغییر در شکل گردابه‌های ایجاد شده در پشت ربات نیز می‌شود. در شکل 16 نمایی از گردابه‌های تولید شده در پشت ربات و اثر زاویه استرن بر وسعت آنها در سرعت 1/5 متر بر ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در شرایطی که زاویه استرن صفر درجه است، شکل گیری گردابه‌ها صرفاً به ناحیه کم فشار واقع در پشت ربات محدود می‌شود. با افزایش زاویه استرن، بواسطه اینکه در پشت سطح کنترلی افقی یک ناحیه کم فشار ایجاد می‌شود، زمینه برای شکل گیری گردابه‌ها فراهم می‌شود. هرچه زاویه استرن افزایش پیدا می‌کند وسعت ناحیه کم فشار بیشتر شده و این باعث تولید گردابه‌های بزرگ‌تر خواهد شد.



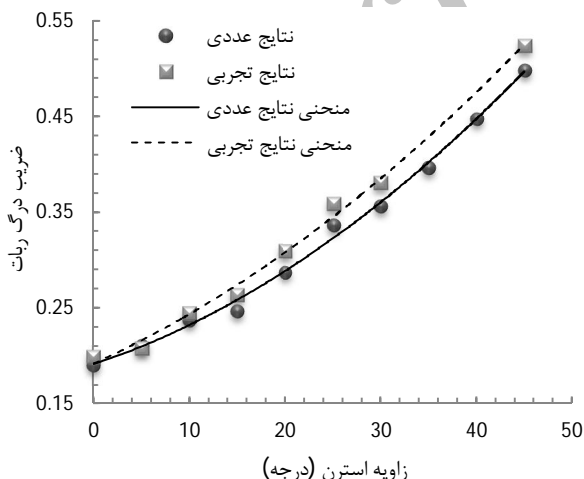
شکل 16 شکل گیری ساختارهای گردابه‌ای در پشت ربات در سرعت 1/5 متر بر ثانیه در زوایای استرن مختلف: الف) 0 درجه، ب) 10 درجه، پ) 20 درجه، ت) 35 درجه، ث) 45 درجه.



شکل 18 مقایسه تغییرات نیروی درگ ربات نسبت به تغییرات زاویه استرن در سرعت 1/5 متر بر ثانیه حاصل از روش های تجربی و عددی



شکل 19 تغییرات نیروی درگ ربات نسبت به تغییرات زاویه استرن در سرعت 1/5 متر بر ثانیه حاصل از روش های تجربی و عددی و منحنی های تقریبی آنها



شکل 20 تغییرات نیروی درگ ربات نسبت به تغییرات زاویه استرن در سرعت 1/5 متر بر ثانیه حاصل از روش های تجربی و عددی و منحنی های تقریبی آنها

جدول 4 مقادیر عددی و تجربی ضریب هیدرودینامیکی $X_{\beta\beta}$

ضریب هیدرودینامیک	واحد	مقدار تجربی	مقدار عددی
$X_{\beta\beta}$	$\text{kg.m.s}^{-2}.\text{rad}^{-2}$	0/006	0/0072

ضریب برآ و کاهش ضریب پسا، یکی از روش های مهم در بهبود عملکرد هیدروfoilها است. یکی از راه های کنترل لایه مرزی، دمش و مکش سیال از سطح هیدروfoil است که به کمک آن می توان توزیع فشار و نیز حجم گردابه های موجود در ناحیه جدایش را تغییر داد [24]. آنچه که در تحلیل سطوح کنترلی حائز اهمیت می باشد، نیروی وارد بر سطح کنترلی بر اثر تغییرات زاویه آن است.

تغییر در زاویه حمله یک سطح کنترلی نه تنها باعث وارد شدن یک نیرو به خود آن می شود بلکه بعلاوه باعث وارد شدن نیروی برآ به آن و فاصله نقطه اثر این نیرو از مرکز شناوری وسیله، باعث تولید گشتاور برای ربات می شود و اتفاقاً وجود همین خاصیت است که لزوم استفاده از سطوح کنترلی را برای هدایت و مانور پذیری ربات توجیه می کند.

7- اعتبار سنجی روش

با شبیه سازی مجموعه آزمون های انجام شده در سرعت کارکرد ربات یعنی 1/5 متر بر ثانیه، مقدار نیروی پسای وارد بر ربات در هر یک از زوایای استرن استخراج و با نتایج تجربی در شکل 18 مقایسه شده است. اختلاف موجود بین نتایج عددی و تجربی به دلایل مختلف ظاهر می شود. اولاً نتایج عددی با توجه به شرایط مرزی نشان داده شده در شکل 9 حاصل شده است. با توجه به این شرایط مرزی، شبیه سازی حرکت AUV در یک جریان تک فازی شامل سیال آب در یک محیط بی نهایت انجام شده است. بنابراین اثرات امواج سطحی بوجود آمده در اثر حرکت آن که در آزمون های تجربی کما بیش وجود دارد و نیز اثرات دیواره های حوضچه کشش شبیه سازی نشده است. ثانیاً در شبیه سازی عددی، استروته ها و اثر آن بر جریان اطراف بدنه AUV دیده نشده است. علاوه بر آن خطاهای موجود در آزمون های تجربی و تقریب های عددی بکار رفته در مدل کردن جریان به صورت عددی باعث بوجود آمدن اختلاف در نتایج عددی و تجربی می شود. با این وجود بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و عددی در حدود 7 درصد و در زاویه استرن 20 درجه رخ داده است. با توجه به شکل 18 مشاهده می شود که با افزایش زاویه استرن، سطحی از ربات که در مقابل جریان قرار می گیرد افزایش پیدا کرده و باعث افزایش نیروی پسای وارد بر ربات شده است.

8- نتیجه گیری و جمع بندی

در کار حاضر اثر تغییر زاویه سطوح کنترلی افقی (زاویه استرن) بر میزان نیروی پسای وارد بر ربات هوشمند زیرآبی پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا به روش تجربی و شبیه سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. هر دو روش افزایش نیروی پسای وارد بر ربات را در حین تغییر زاویه سطوح کنترلی تصدیق می کنند. مقایسه نتایج تجربی و عددی حاکی از آن است که مقادیر بدست آمده به روش عددی کوچکتر از مقادیر حاصل از تست های آزمایشگاهی است که علت آن ناشی از شبیه سازی تست های آزمایشگاهی بدون در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر اثر متقابل استروته ها و بدنه و نیز اثر امواج سطحی است. اثر تغییر زاویه استرن بر ساختار جریان سیال در پشت ربات و همچنین شکل گیری جریان های بازگشتی در پشت سطوح کنترلی افقی بررسی و توسط کانتورهای مناسب تشریح شد.

با در نظر گرفتن X بعنوان نیروی پسای وارد بر ربات در راستای x و استفاده از شکل 18 میتوان تغییرات نیروی پسای وارد بر ربات را نسبت به زاویه استرن به صورت یک تابع درجه دو تقریب زد.

این تغییرات به صورت تابع $X = 0.003(\beta)^2 + 0.21(\beta) + 8.94$ به روش تجربی و $X = 0.0036(\beta)^2 + 0.156(\beta) + 8.9$ به روش عددی حاصل می شود.

علائم یونانی

β	زاویه حمله سطح کنترلی افقی یا زاویه استرن (deg)
δ	ضخامت لایه مرزی (m)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})

بالانویس‌ها

– کمیت متوسط گیری شده

زیرنویس‌ها

ref	کمیت مرجع
fin	سطح کنترلی

10- مراجع

- [1] M. R. Dhanak, K. Holappa, An Autonomous Ocean Turbulence Measurement Platform, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, Vol. 16, pp. 1506-1518, 1999.
- [2] P. E. An, S. M. Smith, An Experimental Data Base of Ocean Explore AUV for Self-Motion Controlled Study in *IEEE Transactions on Oceanic Engineering* 1998, pp. 174-285.
- [3] S. M. Smith, S. E. Dunn, T. L. Hopkins, K. Heeb, T. Pantelakis, The Application of a Modular AUV to Coastal Oceanography in *Proceeding of IEEE Ocean 95 Conference*, San Diego: 1423-1432, 1995.
- [4] T. Curtin, The Autonomous Oceanographic Sampling Network, in *Proceeding of Oceanology International 98 Conference*, Brighton, UK: 1-16, 1998.
- [5] S. F. Hoerner, *Fluid Dynamic Drag*, USA: Published by author, 1965.
- [6] R. Burcher, L. Rydill, *Concepts in Submarine Design*, UK: press Syndicate of the University of Cambridge, 1994.
- [7] C. Aage, L. W. Smit, Hydrodynamic maneuverability data of a flatfish type AUV, in *Proceeding of IEEE Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation*, 425-430, 1994.
- [8] E. Javanmard, Determination of Hydrodynamic Coefficients of an AUV with Computational Fluid Dynamics and Experimental Fluid Dynamics Methods, Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, 2013. (In persian)
- [9] K. Rhee, H. K. Yoon, T. J. Sung, S. H. Kim, J. N. Kang, An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device, International Workshop on Ship Manoeuvrability at the Hamburg Ship Model Basin, pp. 1-20, 2000.
- [10] M. Gerfler, *The DTMB Planar-Motion-Mrchan ISM System*, Naval Ship Research And Development Center, 1967.
- [11] P. Jagadeesh, K. Murali, V. G. Idichandy, Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form, *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 113-118, 2009.
- [12] P. Ridley, J. Fontan, P. Corke, Submarine dynamic modelling, in *Proceeding of Australian Conference Robotics and Automation*, Brisbane, 2003.
- [13] S. K. Lee, T. H. Joong, S. J. Cheon, T. S. Jang, J. H. Lee, Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test, *Ocean Engineering*, Vol. 3, pp. 174-180, 2011.
- [14] A. Phillips, M. Furlong, S. R. Turnock, The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle, National Oceanography Centre, 2009.
- [15] A. Phillips, M. Furlong, S. R. Turnock, The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective hydrodynamic design of autonomous underwater vehicles, *Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 224, pp. 239-254, 2010.
- [16] N. Sakamoto, *URANS, DES Simulations of Static and Dynamic Maneuvering for Surface Combatant*, Ph.D. Thesis, University of Iowa, USA, 2009.
- [17] S. Tang, T. Ura, T. Nakatani, B. Thornton, T. Jiang, Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous Underwater Vehicle TUNA-SAND, *J Mar Sci Technol*, Vol. 14, pp. 373-386, 2009.
- [18] B. Ferreira, M. Pinto, A. Matos, N. Cruz, Hydrodynamic modeling and motion limits of auv mares, in *Proceeding of 35th Annual Conference of IEEE*, 2241-2246, 2009.
- [19] T. Prestero, *Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle*, Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, Mechanical Engineering, 2001.
- [20] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Fourth ed., University of Rhode Island, 1985.
- [21] ANSYS, *Ansys-cfx solver modeling guide*, USA, 2009.
- [22] M. Jahanmirdi, A. Omidvar, M. K. Koopae, A comparative study of turbulence models performance in predicting the frequency of naturally-excited oscillating jet flows, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-11, 2013. (In persian)
- [23] F. M. White, *Viscous Fluid Flow*, Third ed., University of Rhode Island, 2006.
- [24] P. Akbarzadeh, I. Mirzaee, M. H. Kayhani, E. Akbarzadeh, Blowing and suction effect on drag and lift coefficients for viscous incompressible flows over hydrofoils by power-low preconditioning method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 129-140, 2013. (In Persian)

در شکل 19 این دو منحنی تقریبی نمایش داده شده است. بنابراین می‌توان یکی از ضرائب هیدرودینامیکی وابسته به سطوح کنترلی را در حالت غیر خطی و با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی استخراج کرد. این روند در رابطه (7) نشان داده شده است.

$$X_{\beta\beta} = \frac{\partial}{\partial\beta} \left(\frac{\partial X}{\partial\beta} \right) = \frac{\partial^2 X}{\partial\beta^2} \quad (7)$$

بنابراین می‌توان با استفاده از دو منحنی حاصله در شکل 19 و استفاده از رابطه (7)، ضریب هیدرودینامیکی $X_{\beta\beta}$ را به دو روش تجربی و عددی استخراج نمود. مقادیر حاصله برای این ضریب در جدول 4 ارائه شده است.

در شکل 20 تغییرات ضریب نیروی پسای ربات نسبت به زاویه استرن نشان داده شده است. نتایج بدست آمده به دو روش تجربی و عددی دارای انطباق قابل قبولی می‌باشد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، ضریب پسای ربات با افزایش زاویه استرن افزایش پیدا می‌کند. مشابه شکل 19 میتوان این تغییرات را بوسیله یک تابع درجه دوم تقریب زد. این تغییرات به‌صورت تابع $C_d = 0.00006(\beta)^2 + 0.0045(\beta) + 0.1917$ به روش تجربی و $C_d = 0.00008(\beta)^2 + 0.0033(\beta) + 0.1909$ به روش عددی حاصل می‌شود. با توجه به شکل 20 ضریب درگ ربات در زاویه استرن 45 درجه در حدود 0/52 و در زاویه استرن صفر درجه در حدود 0/19 است. یعنی ضریب درگ ربات با تغییر زاویه استرن از صفر به 45 درجه در حدود 174 درصد افزایش یافته است. با توجه به اینکه بیشتر AUV های که شکل کلی آنها شبیه این AUV است نیز رفتاری نسبتاً مشابه دارند، جهت انتخاب تراستر و موتور محرک و باتری‌ها و می‌توان تا حد زیادی از نتایج این تحقیق به‌صورت کیفی استفاده نمود.

نتایج حاصل از مطالعات تجربی و عددی نشان داد که میتوان با تقریب نسبتاً خوبی، در محدوده سرعت‌های بررسی شده در این تحقیق، بجای روش‌های تجربی از روش‌های عددی جهت حصول به نتایج دلخواه استفاده نمود.

9- فهرست علائم

A	سطح مقطع عرضی مدل (m^2)
A_{fin}	سطح مقطع سطح کنترلی (m^2)
c_d	ضریب نیروی پسای بر مدل
$c_{d\ fin}$	ضریب نیروی پسای سطح کنترلی
C_p	ضریب فشار
D	قطر مدل (m)
f_i	مولفه i ام بردار نیروی خارجی بر واحد جرم (ms^{-2})
F_{fin}	نیروی پسای وارد بر سطح کنترلی (kgms^{-2})
L	طول مدل (m)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
P_{ref}	فشار مرجع ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
\bar{U}_i, \bar{U}_j	تانسور تنشی های رینولدز ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-2}$)
U_i	مولفه i ام بردار سرعت در میدان جریان کارترین (ms^{-1})
U_{ref}	سرعت مرجع (ms^{-1})
ν	سرعت کشش مدل در حوضچه (ms^{-1})
x_i	مشخصه i ام دستگاه مختصات کارترین (m)
X	نیروی پسای محوری وارد بر مدل (kgms^{-2})
y^+	ضخامت بدون بعد اولین المان روی سطح مدل
y^*	مشخصه عرضی بدون بعد
Δy	ضخامت اولین المان روی سطح مدل (m)