

بررسی پایداری دینامیکی وسیله هوشمند زیرآبی به روش عددی

شهریار منصورزاده^۱ احمدرضا پیشه‌ور^۲ و احسان جوانمرد^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۲۵)

چکیده

برای بررسی پایداری ربات‌های زیرآبی لازم است معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت‌های صفحه‌ای افقی یا عمودی بررسی شوند. استفاده از معیار پایداری راس برای بررسی پایداری در صفحه افقی مستلزم داشتن چهار ضریب هیدرودینامیکی، شامل مشتقات نیروی جانبی، ممان عمودی نسبت به سرعت جانبی و سرعت زاویه‌ای می‌باشد. این ضرایب معمولاً در آزمون‌های تجربی در حوضچه کشش و بازوی چرخان اندازه‌گیری می‌شوند. در این پژوهش، ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV از طریق شبیه‌سازی عددی آزمون کشش مدل شناور با زاویه انحراف و نیز بازوی چرخان به روش دینامیک سیالات عددی استخراج شده و از آنها جهت تعیین پایداری حرکت وسیله در صفحه افقی و همچنین بررسی اثر سطوح کنترلی در میزان پایداری آن استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، پایداری، آزمون کشش با زاویه انحراف، آزمون بازوی چرخان، دینامیک سیالات عددی

Numerical Investigation of Dynamic Stability of an AUV

Sh. Mansoorzadeh A.R. Pishevar and E. Javanmard

Subsea R&D Center

Mech. Eng. Dep't.

Isfahan Univ. of Tech.

(Received: 27 August, 2012; Accepted: 15 May, 2013)

ABSTRACT

In order to determine the stability of underwater robots, their governing differential equations of motion in vertical and horizontal planes should be investigated. For horizontal plane stability, using Routh stability criterion, four hydrodynamic coefficients, including derivatives of the lateral force and vertical moment with respect to sway and angular velocity are required. These coefficients are usually measured in a towing tank with rotating arm experimental facilities. In present work, these coefficients were calculated for an AUV, using computational fluid dynamics. Towing of the model, with various drift angles, in a towing tank and also rotation of the model in a rotating arm are simulated numerically, to obtain the required coefficients. The coefficients were then used to investigate the stability of the robot in horizontal plane and to determine the effect of control surfaces on the robot's stability.

Keywords: Hydrodynamic Coefficients, Stability, Drift Angle Test, Rotating Arm Test, Computational Fluid Dynamics

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): shahriar@cc.iut.ac.ir

۲- استاد: apise@cc.iut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: e.javanmard@me.iut.ac.ir

۱- مقدمه

سامانه‌های زیرآبی بدون سرنشین^۱ از جمله شناورهایی می‌باشند که مهم‌ترین ویژگی آنها مستقل و خودمختار بودن ربات است. ربات‌های زیر آبی قادر به پیمودن یک مسیر از پیش تعیین شده بوده و در صورت مواجهه با شرایط مختلف از جمله موانع، قدرت تصمیم‌گیری دارند. مهم‌ترین کاربردهای این وسایل در صنایع فراساحلی، نظامی و تحقیقاتی است. مطالعه و بررسی حرکت دینامیکی این‌گونه وسایل در زیر آب، مستلزم آن است که مقادیر نیروها و گشتاورهای وارده از سویسایبر آنها مشخص شود. در مباحث هیدرودینامیکی، این نیروها به صورت ضرایب هیدرودینامیکی^۲ بیان می‌شوند که بدون شناخت دقیق ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیرآبی، انجام تحلیل‌های هیدرودینامیکی و مطالعه دینامیک حرکت چند درجه آزادی آن میسر نمی‌باشد. امروزه از روش‌های متنوعی جهت برآورد ضرایب هیدرودینامیکی استفاده می‌شود ولی به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی کرد:

۱- روش‌های تحلیلی و نیمه‌تجربی [۱].

۲- روش‌های آزمایشگاهی [۲-۳]، نظیر تست‌های کشش در حوضچه کشش^۳، تست‌های استهلاک آزاد^۴، تست‌های بازوی چرخان^۵، تست‌های حرکت صفحه‌ای توسط مکانیزم حرکت صفحه‌ای^۶ و ... و

۳- روش‌های عددی [۴]، در این روش‌ها، حرکات و مانورهای مدنظر شبیه‌سازی شده و میدان جریان سیال پیرامون وسیله حل می‌شود.

آرهی^۷ و همکارانش [۵] با بهره‌گیری از مکانیزم‌های حرکت صفحه‌ای و مکانیزم حرکت مخروطی^۸ به روش آزمایشگاهی به تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات هوشمند زیرآبی پرداختند. آنها با استفاده از مکانیزم حرکت صفحه‌ای و اعمال حرکات خاص در صفحات افقی و عمودی آن، موفق شدند تمامی ضرایب هیدرودینامیکی، به استثناء

ضرایب وابسته به حرکت رول^۹ را استخراج نمایند. برای به دست آوردن ضرایب وابسته به حرکت رول از مکانیزم حرکت مخروطی استفاده شده است. فیلیپس^{۱۰} و همکارانش [۶] به روش عددی و با شبیه‌سازی حرکت سووی خالص^{۱۱} در صفحه افق، ضرایب هیدرودینامیکی یک نوع AUV را در شرایط غیر دائم تعیین کردند. سیمسون^{۱۲} [۷] و بلور^{۱۳} [۸] به روش عددی و از طریق شبیه‌سازی معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس، تحلیل‌های خود را بر روی وسایل زیرآبی به انجام رساندند. در این پژوهش با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۴}، به استخراج بخشی از ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات هوشمند زیرآبی پرداخته و با استفاده از آنها، پایداری دینامیکی ربات ضمن حرکت، در صفحه افقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این وسیله هوشمند زیرآبی در پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان طراحی و ساخته شده است. برای بررسی پایداری دینامیکی وسیله از معیار پایداری راس^{۱۵} استفاده شده است که استفاده از این معیار مستلزم استخراج ضرایب هیدرودینامیکی N_r, Y_r, N_v, Y_v است [۹].

به طور مثال Y_v به صورت زیر تعریف شده است: $Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v} \left(\frac{N.s}{m} \right)$ که N و Y مطابق با شکل ۱ به ترتیب نیرو در جهت Y و ممان حول محور Z تعریف شده است. برای یافتن ضرایب هیدرودینامیکی ذکر شده، شبیه‌سازی دونوع آزمون ضروری می‌باشد: ۱- شبیه‌سازی آزمون حرکت تحت زوایای انحراف مختلف جهت استخراج ضرایب N_v, Y_v . ۲- شبیه‌سازی آزمون بازوی چرخان با حرکت در مسیر دوار در صفحه افقی، تحت سرعت‌های زاویه‌ای مختلف جهت استخراج ضرایب N_r, Y_r . هر یک از این شبیه‌سازی‌ها، یک بار با در نظر گرفتن سطوح کنترلی و یک بار بدون در نظر گرفتن سطوح کنترلی تکرار شده و اثر این سطوح در میزان پایداری دینامیکی ربات، در حرکت خط مستقیم آن در صفحه افقی تحلیل شده است.

9- Roll

10- Philips

11- Pure Sway

12- Simonsen

13- Bellevre

14- Computational Fluid Dynamics (CFD)

15- Routh Stability Criterion

1- Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

2- Hydrodynamic Coefficients

3- Towing Tank

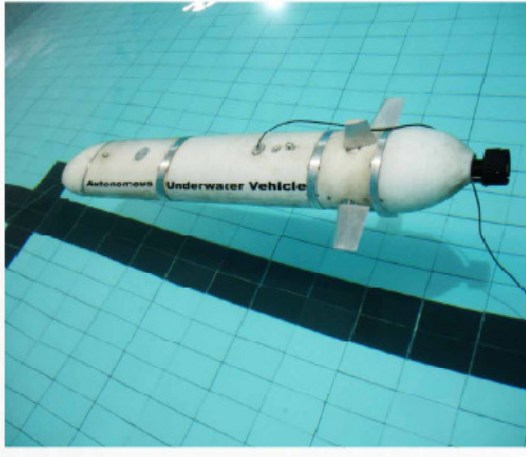
4- Free Decay

5- Rotating Arm

6- Planar Motion Mechanism (PMM)

7- Rhee

8- Coning Motion Device (CMD)



شکل (۲): AUV پژوهشگر علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان.

هنگامی که وسیله در صفحه افقی حرکت می‌کند، معادلات شش درجه آزادی آن به سه معادله حرکت صفحه‌ای ساده خواهند شد. این معادلات در حالت خطی به شکل زیر می‌باشند [۹]:

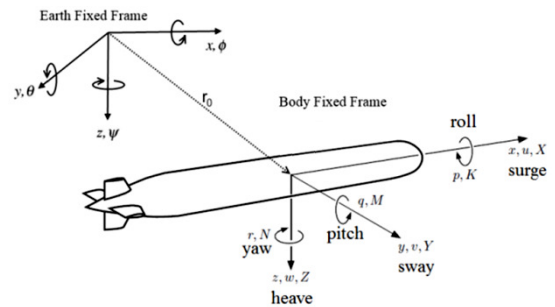
$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_u(u + U) + X_{prop}, \quad (1)$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mX_G - Y_r)\dot{r} = Y_v v + (Y_r - mU)r + Y_{\delta}\delta, \quad (2)$$

$$(mX_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_r)\dot{r} = N_v v - (N_r - mX_G U)r + N_{\delta}\delta, \quad (3)$$

که در آنها، معادله (۱) به معادله نیرویی سرچ^۳، معادله (۲) به معادله نیرویی سووی و معادله (۳) به معادله گشتاور یاو^۴ اشاره دارد. در معادلات بالا v و r به ترتیب مؤلفه‌های سرعت خطی سووی و سرعت زاویه‌ای یاو، m معرف جرم وسیله، U سرعت متوسط وسیله و یا به عبارتی سرعت کشش وسیله و u تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط، I_{zz} ممان اینرسی و δ زاویه انحراف پره کنترلی رادر^۵ (سکان) است. این معادلات با بهره‌گیری از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی بیان شده است. معادله نیرو در راستای سرچ به صورت یک معادله مستقل از معادلات (۲) و (۳) بوده و می‌تواند جداگانه حل شود که بررسی آن در تحقیق حاضر مد نظر نیست. از آنجایی که بررسی پایداری ربات در سیستم سووی/ یاو و بدون ورودی

در شکل ۲ تصویری از ربات زیرآبی مورد بررسی، نشان داده شده و در جدول ۱ مشخصات فنی آن ذکر شده است.



شکل (۱): تعریف دستگاه‌های مختصات.

۲- معادلات حرکت وسیله در صفحه افقی

از آنجایی که در شبیه‌سازی‌های مدنظر، وسیله تنها در صفحه افقی حرکت می‌کند بنابراین معادلات شش درجه آزادی حرکت، به سه معادله در صفحه افقی خلاصه خواهند شد. جهت تشریح دینامیک حرکت یک جسم صلب، در وهله اول نیاز به مشخص کردن یک دستگاه مختصات است. دو دستگاه مختصات قابل تعریف است که عبارتند از: ۱- دستگاه مختصات متصل به زمین^۱، ۲- دستگاه مختصات متصل به بدنه^۲. برای یک وسیله زیر سطحی با شش درجه آزادی حرکت، موقعیت این دو دستگاه در شکل ۱ نمایش داده شده است. مبدأ دستگاه مختصات اینرسی، یک نقطه مشخص از فضا است در حالی که مبدأ دستگاه مختصات متصل به بدنه به طور دقیق روی مرکز شناوری جسم یا مرکز هندسی آن قرار می‌گیرد. تحلیل حاضر بر مبنای دستگاه مختصات متصل به بدنه صورت گرفته است.

جدول (۱): مشخصات فنی AUV.

شکل هندسی	TORPEDO
سرعت	۱/۵ متر برثانیه
طول	۱/۴۵ متر
قطر	۲۵ سانتی‌متر
وزن	۴۷ کیلوگرم
عمق عملیات	۲۰ متر
طول زمان عملیات	۲/۵ ساعت
سطوح کنترل	۴ سطح مستقل
نوع سطوح کنترل	Naca ۰۰۱۵

3- Surge Force

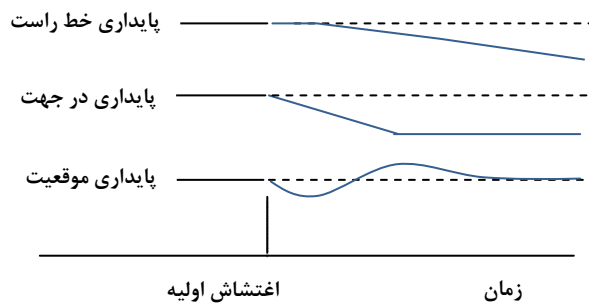
4- Yaw Moment

5- Rudder

1 -Earth-Fixed Coordinate Frame

2-Body-Fixed Coordinate Frame

حرکت وسیله پس از اعمال اغتشاش به طور دقیق همان مسیر اولیه باقی می ماند.



شکل (۳): حالات مختلف پایداری حرکت در پاسخ به اغتشاش اولیه.

جهت تعیین پایداری وسیله با توجه به معادله منفرد استخراج شده برحسب v یا x ، از معیار راس استفاده می شود که در آن فقط از بخش ثابت معادله منفرد استفاده می شود. بر اساس معیار راس، شرط پایداری وسیله این است که تمامی ضرایب معادله (۸) مثبت باشد:

$$\begin{aligned} -A_{11} - A_{22} &> 0 \\ A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} &> 0. \end{aligned} \quad (9)$$

با توجه به آنکه مرکز جرم وسیله تقریباً در مرکز شناوری آن قرار دارد، $x_G \approx 0$ در نظر گرفته می شود. در صورتی که سطح جلو و عقب وسیله به صورت منطقی حول مبدأ بالانس شده باشد، ترم های $\{N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_v, Y_r\}$ در مقایسه با دیگر ترم ها بسیار کوچک خواهند بود [۱۰]. از طرفی مؤلفه جرم افزوده $-Y_{\dot{v}}$ از مرتبه بزرگی جرم وسیله (m) است و به طور مشابه $N_{\dot{r}} = -I_{zz}$ خواهد بود. ترم های نیز شامل مقادیر منفی بزرگ هستند. بنابراین می توان گفت:

$$A_{11} = \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} < 0 \text{ و } A_{22} = \frac{N_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} < 0. \text{ پس اولین شرط}$$

پایداری ارضاء شده است. برای برقراری شرط دوم می بایست رابطه زیر برقرار باشد:

$$\begin{aligned} (I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_v(m - Y_{\dot{v}})N_r - \\ [N_{\dot{v}}Y_v + (m - Y_{\dot{v}})N_v] \times \\ [- (I_{zz} - N_{\dot{r}})(mU - Y_r) + Y_r N_{\dot{r}}]. \end{aligned} \quad (10)$$

ترم اول این رابطه متشکل از دو عدد منفی بزرگ و دو عدد مثبت بزرگ است. ترم دوم شامل مؤلفه (mU) بوده که دارای مقدار مثبت بزرگی است ولی ضرب شدن N_v در آن برقراری شرط را به چالش می کشد، بنابراین با در نظر گرفتن

کنترل یعنی $\delta = 0$ مد نظر است، روابط (۲) و (۳) به صورت زیر در خواهند آمد:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_{\dot{v}}v + (Y_r - mU)r. \quad (4)$$

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{\dot{v}}v - (N_r - mx_GU)r. \quad (5)$$

۳- روش تعیین پایداری دینامیکی

دو رابطه (۴) و (۵) معرف یک دستگاه معادلات دیفرانسیل خطی با متغیرهای v, r است. برای حل این دستگاه، بردار حالت $\vec{s} = \{v, r\}$ تعریف و معادلات (۴) و (۵) به صورت ماتریسی بیان می شوند [۱۰].

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \frac{d\vec{s}}{dt} = \begin{bmatrix} Y_{\dot{v}} & Y_r - mU \\ N_{\dot{v}} & N_r - mx_GU \end{bmatrix} \vec{s} \quad (6)$$

با معرفی M به عنوان ماتریس اینرسی و p به عنوان ماتریس ضرایب بردار حالت \vec{s} ، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{s}} &= M^{-1}P\vec{s} = A\vec{s}, \\ \dot{s}_1 &= A_{11}s_1 + A_{12}s_2, \\ \dot{s}_2 &= A_{21}s_1 + A_{22}s_2. \end{aligned} \quad (7)$$

با استخراج s_2 از معادله دوم و قرار دادن در معادله اول یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم همگن حاصل می شود که به صورت زیر است:

$$\ddot{s}_1 + (-A_{11} - A_{22})\dot{s}_1 + (A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21})s_1 = 0. \quad (8)$$

با حل این معادله و استخراج ریشه های حاصل که به صورت نمایی هستند، می توان تحلیل پایداری وسیله را با توجه به نوع ریشه ها (مختلط یا حقیقی) و علامت نمای آن انجام داد. مجموعه جواب به دست آمده، پاسخ وسیله را به اغتشاش وارد شده نشان خواهد داد. به طور کلی پایداری دینامیکی وسیله در صفحه افقی شامل حالات مختلفی است. این حالات که در شکل ۳ به تصویر کشیده شده اند عبارتند از: ۱- پایداری خط راست^۱، که در آن مسیر نهایی، بعد از اعمال اغتشاش به صورت یک خط مستقیم است در حالی که جهت حرکت تغییر می کند. ۲- پایداری در جهت^۲، که در آن مسیر نهایی وسیله بعد از اعمال اغتشاش تغییر نمی کند. ۳- پایداری موقعیت^۳، که در آن مسیر نهایی

1 -Straight Line Stability

2 -Directional Stability

3 -Positional Motion Stability

ضرایب را می‌توان از طریق انجام آزمایش بر روی مدل، با استفاده از روابط تئوری و یا به کمک روش‌های عددی به دست آورد. در شرایط دائم می‌توان از آزمایش کشش با زاویه انحراف در صفحه افق جهت استخراج ضرایب N_V و Y_V از آزمایش بازوی چرخان جهت استخراج ضرایب N_F و Y_F استفاده کرد. در شرایط غیردائم، استخراج هر چهار ضریب به کمک انجام آزمایش‌های حرکت صفحه‌ای و از طریق مکانیزم حرکت صفحه‌ای امکان پذیر خواهد بود. انجام آزمایشات هیدرودینامیک در بسیاری از موارد نیازمند صرف زمان و هزینه‌های بسیار بالا است. به عنوان نمونه، آزمایش بازوی چرخان دارای دو محدودیت اساسی است که یکی تجهیزات بسیار خاص و گران آن است و دیگری نیاز به استفاده از طول بازوی بلند، جهت بررسی سرعت‌های زاویه‌ای کوچک است. از آنجایی که معادلات حاکم بر حرکت سیال همگی شناخته شده هستند، تخمین‌های عددی می‌توانند برای حل این معادلات به کار روند. با ورود نرم‌افزارها و سخت افزارهای قدرتمند رایانه‌ای، بعضی از تخمین‌های هیدرودینامیکی جایگزین آزمایش‌های پرهزینه شده است. با توجه به آن‌چه اشاره شد، در تحلیل حاضر، دو آزمایش کشش با زاویه انحراف و آزمایش بازوی چرخان در حالت دائم برای مسئله مورد نظر به روش عددی و به کمک نرم‌افزار CFX شبیه‌سازی شده و ضرایب مورد-نیاز در حالت خطی استخراج می‌شوند. روش این دو آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

۴-۱- آزمایش کشش با زاویه انحراف

هنگامی که ربات زیرآبی در حوضچه کشش، تحت کشش با زاویه انحراف β قرار می‌گیرد، به علت نصب دستگاه مختصات در مرکز شناوری (یا مرکز ثقل) و زاویه داشتن دستگاه نسبت به جهت کشش، وسیله دارای دو مؤلفه سرعت سرچ و سووی خواهد بود که هر دو تابع β هستند (شکل ۴). در نتیجه علاوه بر نیروی درگ محوری^۱، نیروی سووی و ممان یاو نیز به وسیله وارد می‌شود.

مؤلفه‌هایی که دارای بزرگ‌ترین مقدار هستند شرط دوم به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۰]:

$$C = N_F Y_V + N_V (mU - Y_F) > 0. \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، C پارامتر پایداری وسیله نامیده می‌شود. N_F و Y_V هر دو مقادیری منفی هستند و بنابراین حاصل ضرب آنها که عبارت اول پارامتر C را تشکیل می‌دهد مقداری مثبت است. بنابراین پارامتر پایداری به شدت به بزرگی و علامت N_V بستگی دارد. فرم دیگر رابطه بالا به صورت $\frac{N_F}{Y_F - mU} - \frac{N_V}{Y_V} > 0$ است. در این رابطه، عبارت اول به نسبت ممان تولید شده از حرکت چرخشی یاو به نیروی حاصل از این حرکت اشاره دارد. بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که این ترم به نقطه اثر نیروی ناشی از حرکت یاو (\bar{x}_F) اشاره دارد. به طور مشابه ترم دوم، معرف نسبت ممان تولید شده ناشی از حرکت سووی به نیروی حاصل از این حرکت است و می‌توان آن را معرف نقطه اثر نیروی ناشی از حرکت سووی (\bar{x}_V) دانست. بنابراین جهت پایداری، لازم است که نقطه اثر نیرو ناشی از حرکت یاو جلوتر از نقطه اثر نیروی ناشی از حرکت سووی باشد. استفاده از سطوح کنترلی سطح پایداری^۱ وسیله را ارتقاء می‌دهد چرا که باعث افزایش مقدار N_V می‌شود. در ادامه، این مسئله با تحلیل عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجایی که وسیله مورد مطالعه دارای دو صفحه تقارن $x-z$ و $x-y$ است، تحلیل پایداری دینامیکی در صفحه عمودی، مشابه تحلیل آن در صفحه افقی خواهد بود. جهت سادگی در بیان معیار پایداری از مفهوم حاشیه پایداری^۲ به جای رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$G_H = 1 - \frac{N_V(Y_F - mU)}{N_F Y_V} > 0. \quad (12)$$

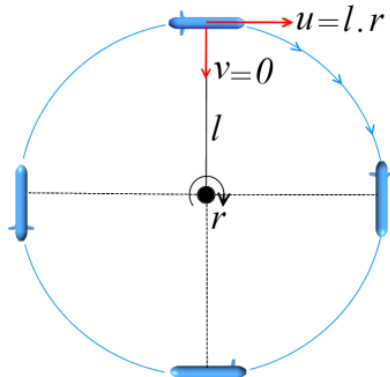
از آنجایی که در رابطه فوق ضرایب هیدرودینامیکی به صورت خطی وارد شده‌اند بنابراین معیار حاصل در محدوده‌ای قابل استفاده است که رفتار وسیله در صفحه افقی از حالت خطی تجاوز نکند.

۴- معرفی روش حل

جهت بررسی وضعیت پایداری با معیار راس، بایستی ضرایب هیدرودینامیکی N_V ، N_F ، Y_V و Y_F وسیله استخراج شوند. این

1- Level of Stability
2- Stability Margin

خطی وسیله، ثابت بماند. در این صورت، همواره رابطه $u = l \cdot r = \text{Constant}$ برقرار می‌ماند. حال اگر این آزمایش تحت سرعت‌های زاویه‌ای مختلف r انجام شود و در هر حالت نیروهای جانب به مرکز سووی و ممان یاو، محاسبه شود در نهایت می‌توان تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای r یعنی ضریب Y_r و از سوی دیگر تغییرات ممان یاو نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای r یعنی ضریب N_r را استخراج کرد. از آنجایی که هدف، استخراج این ضرایب در حالت خطی است محدوده تغییرات سرعت زاویه‌ای بین 0.05 تا 0.1 رادیان بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۵): آزمایش بازوی چرخان.

۵- شبیه‌سازی عددی آزمایشات

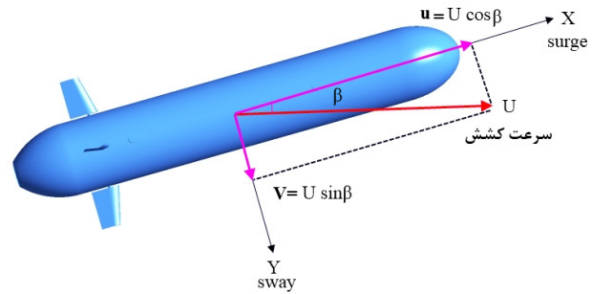
در این بخش ابتدا به شرح معادلات حاکم بر جریان پرداخته و سپس شرایط حل عددی مسئله تشریح می‌گردد.

۵-۱- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال، بیانی از قوانین بقا هستند و به معادلات ناویر استوکس مشهورند [۱۱]. به علت حضور حرکت‌های گردابه‌ای در تحلیل جریان‌های گذار و یا آشفته، به کارگیری این معادلات و حل آنها به طور مستقیم بسیار مشکل است. به همین دلیل معمولاً از شکل متوسط‌گیری شده معادلات ناویر-استوکس به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + f_i. \quad (16)$$



شکل (۴): آزمایش مدل در حوضچه ککش با زاویه انحراف β .

حال، اگر این آزمایش تحت زوایای مختلف β انجام شود و در هر حالت نیروهای سووی و ممان یاو، محاسبه شوند در نهایت، می‌توان تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت سووی یعنی ضریب Y_v و همچنین تغییرات ممان یاو، نسبت به مؤلفه سرعت سووی یعنی ضریب N_v را استخراج کرد.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود $u = U \cos \beta$ و $v = U \sin \beta$ در صورتی که زاویه انحراف کوچک باشد، $u \approx U$ و $v \approx U \cdot \beta$ خواهد بود. با بهره‌گیری از مفهومی مشتقات هیدرودینامیکی خواهیم داشت:

$$Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v} = \frac{\partial Y}{\partial (U \cdot \beta)} = \frac{1}{U} \frac{\partial Y}{\partial \beta} \quad (13)$$

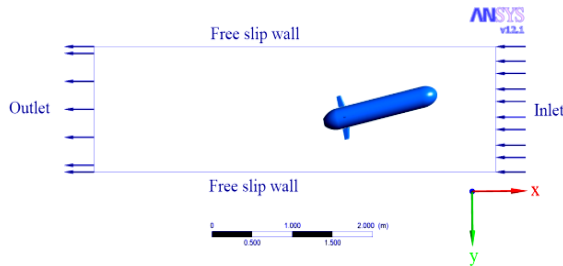
$$N_v = \frac{\partial N}{\partial v} = \frac{\partial N}{\partial (U \cdot \beta)} = \frac{1}{U} \frac{\partial N}{\partial \beta}. \quad (14)$$

از آنجایی که هدف، استخراج این ضرایب در حالت خطی است بنابراین محدوده تغییرات زاویه انحراف بین 0 تا 12 درجه در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- آزمایش بازوی چرخان

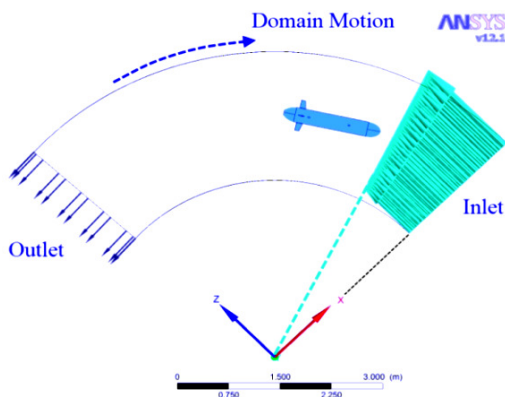
در این آزمایش، مدل از طریق یک بازو به طول l در یک مسیر دایره‌ای در صفحه افقی با سرعت زاویه‌ای r حرکت می‌کند. در طول حرکت همواره بایستی محور طولی وسیله در مرکز شناوری (یا مرکز جرم) بر مسیر حرکت دایره‌ای مماس باشد، به گونه‌ای که در هر لحظه مؤلفه سرعت خطی سرچ وسیله، معادل $u = l \cdot r$ باشد. در حالی که همواره مؤلفه شعاعی سرعت (سووی) صفر است (شکل ۵). مهم‌ترین نکته در این آزمایش آن است که این مدل همواره بایستی دارای یک سرعت خطی سرچ ثابت در تمامی سرعت‌های زاویه‌ای باشد یعنی به‌ازای تغییر در سرعت زاویه‌ای، طول بازوی چرخان می‌بایست به گونه‌ای تغییر کند که در نهایت سرعت

گرفته است. شرط عدم لغزش^۵ نیز به عنوان شرط مرزی بدنه وسیله در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی برای این شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): شرایط مرزی، شبیه‌سازی کشش با زاویه انحراف.

برای شبیه‌سازی آزمایش بازوی چرخان، همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، میدان جریان یک قطاع دایره‌ای با مقطع مربعی شکل در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی دیواره‌های جانبی، شرط مرزی در خروج و نیز بدنه وسیله، مشابه قبل است ولی برای شبیه‌سازی حرکت وسیله، حوزه حل^۶ با سرعت زاویه‌ای Ω نسبت به دستگاه مختصات متصل به مرکز چرخش، دوران می‌کند. ضمن آنکه در ورودی جریان لازم است که پروفیل سرعت به صورت خطی نسبت به محور x دستگاه مفروض تغییر کند. این پروفیل می‌بایست به گونه‌ای روی شرط مرزی ورودی اعمال شود که وسیله، همواره دارای سرعت خطی $1/5$ متر بر ثانیه باشد.



شکل (۷): شرایط مرزی، شبیه‌سازی بازوی چرخان.

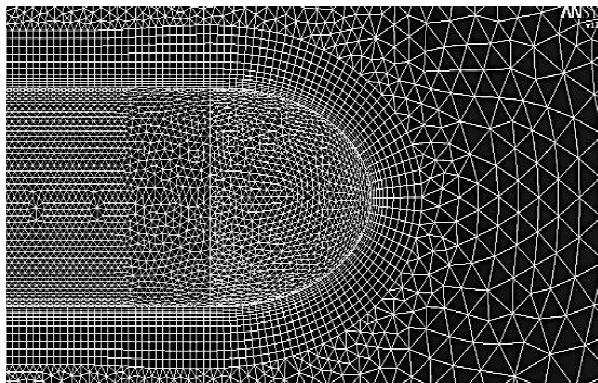
در این فرم از معادلات عبارتی تحت عنوان تنش‌های رینولدز^۱ $(\frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j})$ به معادلات اضافه می‌شود که برای بسته شدن معادلات و حل کردن آنها لازم است که این تنش‌های رینولدز را مدل‌سازی کرد. جهت مدل‌سازی آنها روش‌های متعددی ارائه شده که هر روش متناسب با جریانی خاص است [۱۲]. همان‌طور که اشاره شد، در پژوهش حاضر جریان پیرامون وسیله، توسط کد تجاری حجم محدود ANSYS CFX شبیه‌سازی شده است [۱۳] و برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز از مدل آشفتگی SST^۲ به علت توانایی بالای این مدل در پیش‌بینی جدایش جریان [۱۳] در حالتی که سطوح کنترلی حضور دارند و از مدل $k - \epsilon$ شرایطی که سطوح کنترلی حضور ندارند استفاده می‌شود [۱۳]. با این کار معادلات متوسط‌گیری شده نویر استوکس در شرایط دائم، غیرقابل تراکم و بدون در نظر گرفتن مسئله دمایی، به منظور حل کردن میدان جریان کارتزین $(U_i = u, v, w)$ و فشار (p) سیال توسط نرم‌افزار به کار گرفته خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های آشفتگی مذکور، سازگاری قابل قبولی با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

۵-۲- مشخصات بدنه، میدان جریان و شرایط مرزی

بدنه مورد مطالعه، مدل بدنه ربات هوشمند زیرآبی پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان است. میدان جریان برای شبیه‌سازی کشش با زاویه انحراف به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته می‌شود که در آن شرط مرزی ورودی در فاصله‌ای معادل طول وسیله در بالادست جریان قرار گرفته و دارای سرعت ورودی یکنواخت $1/5$ متر بر ثانیه و شدت اغتشاش^۳ ۵٪ است [۱۴]. شرط مرزی خروجی در فاصله‌ای در حدود ۲ برابر طول وسیله در پائین دست جریان قرار گرفته و دارای شرط فشار متوسط استاتیکی است. دیواره‌های جانبی دارای شرط لغزش آزاد^۴ بوده و در فاصله‌ای در حدود ۳ برابر قطر وسیله قرار

- 1 - Reynolds Stresses
- 2 - Shear Stress Transport (SST)
- 3- Turbulence Intensity
- 4- Free Slip

- 5- No Slip
- 6- Domain



شکل (۸): نمایی از شبکه بی‌سازمان تولید شده به همراه لایه مرزی بر روی AUV

یکی از مسائل مهم در حل عددی، یافتن مشخصات شبکه‌ای است که نتایج آن مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها باشد. به همین منظور شبکه‌های آماده شده در جدول‌های ۳-۲ برای آزمون استقلال جواب از شبکه، مورد مطالعه قرار گرفته 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.

از آنجایی که کمیت‌های انتگرالی نظیر نیرو به شدت به شبکه‌بندی مجاور بدنه و نوع تابع دیوار وابسته است و برای بررسی استقلال جواب از شبکه پارامترهای مناسبی نیستند، بنابراین برای گزینش شبکه بهینه، از پارامتر ضریب فشار استفاده می‌شود که در رابطه زیر تعریف شده است:

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5\rho V^2} \quad (19)$$

جدول (۲): مشخصات شبکه‌های حل برای حالت کشش با زاویه انحراف.

تعداد المان‌ها	تعداد گره‌ها ^۵	
۱,۵۳۳,۳۳۹	۳۵۰,۵۶۶	شبکه درشت
۲,۱۳۸,۷۰۵	۴۶۳,۲۶۹	شبکه متوسط
۳,۸۳۷,۱۷۴	۸۳۹,۴۹۴	شبکه ریز
۶۲۲۰,۱۴۳	۱,۵۱۳,۴۸۵	شبکه خیلی ریز

۵-۳- شبکه بندی میدان حل

جهت ایجاد شبکه بر روی هندسه و میدان حل، می‌بایست آن را به ماژول ANSYS ICEM CFD انتقال داد. ساختار شبکه از نوع بی‌سازمان بوده و ضمن استفاده از شبکه ریز در نواحی که دارای گرادیان شدید است (بالک‌ها، دماغه^۲ و...) برای حل دقیق‌تر لایه مرزی پیرامون وسیله باید روی دیواره‌های وسیله مرز ایجاد کرد. مفهوم این کار افزایش چگالی شبکه در نزدیکی دیواره‌ها است. در مناطق نزدیک دیوار، لایه مرزی سبب می‌شود که گرادیان‌های سرعت عمود بر صفحه زیاد باشد. بنابراین در نزدیک دیواره‌های وسیله از المان‌های منشوری^۳ استفاده شود تا شبکه تولید شده دارای چگالی زیاد در جهت عمود بر دیوار باشد. برای این منظور می‌بایست تحلیل دقیقی از ضخامت اولین لایه و تعداد لایه‌های منشوری برای پوشش کامل لایه مرزی داشت. با توجه به اینکه سرعت کارکرد وسیله در تحلیل حاضر ۱/۵ متر بر ثانیه است، رینولدز آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Re_L = \frac{UL}{\nu} = \frac{1.5 \cdot 1.45}{1.005 \cdot 10^{-6}} = 2.16 \cdot 10^6 \quad (17)$$

با توجه به محدوده عدد رینولدز، با استفاده از رابطه تجربی $\frac{\delta_L^+}{L} = \frac{0.382}{Re_L^{0.2}}$ [۱۱] ضخامت لایه مرزی در انتهای وسیله و در حالتی که دارای زاویه انحراف نباشد ۲۹ میلی‌متر خواهد بود ($\delta = 29 \text{ mm}$). ضخامت اولین لایه با توجه به مقدار $y^+ \approx 30$ از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\Delta y = L \Delta y^+ \sqrt{80} Re^{-\frac{13}{14}} \quad (18)$$

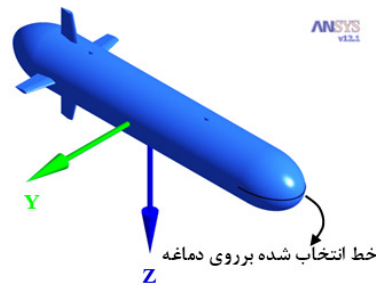
در نتیجه، ضخامت اولین لایه در حدود ۰/۱۵۰۵ میلی‌متر خواهد بود که با لحاظ کردن فاکتور انبساط^۴ ۱/۳ و استفاده از ۱۱ لایه می‌توان کل ضخامت لایه مرزی بر روی مدل را پوشش داد. در شرایطی که وسیله دارای زاویه انحراف باشد ضخامت لایه مرزی بیشتر از مقدار بالا بوده و در هر زاویه انحراف محاسبه خواهد شد. شکل ۸ شبکه تولید شده بر روی وسیله را نشان می‌دهد.

- 1- Mesh
- 2- Nose
- 3- Prism
- 4 - Expansion Factor

جدول (۳): مشخصات شبکه‌های حل برای حالت بازوی چرخان.

تعداد المان‌ها	تعداد گره‌ها	شبکه
۱,۱۳۴,۶۳۷	۳۰۲,۲۵۲	شبکه درشت
۲,۶۱۳,۲۲۱	۵۱۳,۴۸۹	شبکه متوسط
۶,۵۷۰,۱۳۱	۱,۵۸۰,۰۳۲	شبکه ریز
۷,۹۲۶,۱۹۳	۲,۴۵۰,۸۲۷	شبکه خیلی ریز

بدین منظور برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف، توزیع ضریب فشار بر روی خط انتخاب شده بر روی دماغه وسیله محاسبه می‌شود. در شکل ۹ موقعیت این خط نشان داده شده است:

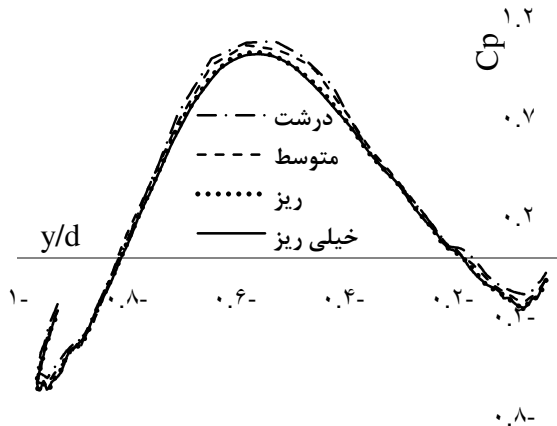


شکل (۹): موقعیت خط انتخاب شده بر روی دماغه AUV جهت رسم ضریب فشار.

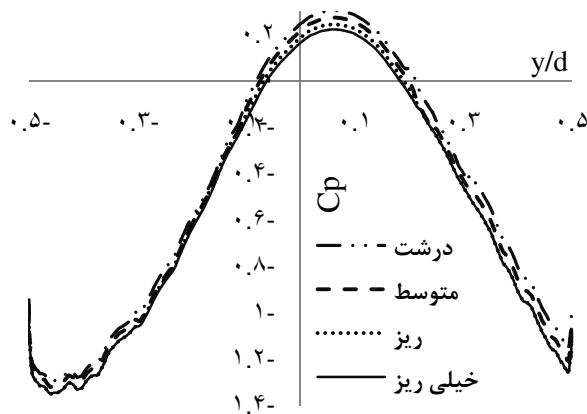
مقادیر ضریب فشار بر حسب پارامتر بدون بعد y/d در طول خط مذکور در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده‌است. همان‌طور که در هر دو شکل مشاهده می‌شود با ریز شدن شبکه، ضریب فشار بر روی دماغه کاهش پیدا می‌کند و این روند در حالتی که شبکه ریز است تقریباً به حالت ثابت می‌رسد. توزیع ضریب فشار در این حالت تقریباً با توزیع فشار شبکه بسیار ریز مطابقت دارد، بنابراین جهت صرفه جویی در زمان و هزینه‌های محاسباتی در هر دو شبیه‌سازی از شبکه ریز استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی برای حالت کشش با زاویه انحراف در زوایای انحراف ۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درجه با سرعت کشش ۱/۵ متر بر ثانیه در دو حالت: ۱- با حضور پره‌های کنترلی ۲- بدون حضور پره‌های کنترلی انجام می‌شود. شبیه‌سازی بازوی چرخان نیز در دو حالت بالا (با پره کنترلی و بدون پره

کنترلی) و برای سرعت‌های زاویه‌ای ۰/۰۵، ۰/۰۵۵، ۰/۰۶، ۰/۰۶۵، ۰/۰۷۵، ۰/۰۸، ۰/۰۹ و ۰/۱ رادیان بر ثانیه انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در هر سرعت زاویه‌ای می‌بایست طول بازو (شعاع مسیر دایره‌ای) به گونه‌ای انتخاب شود که سرعت خطی سرچ، ۱/۵ متر بر ثانیه باقی بماند.



شکل (۱۰): توزیع ضریب فشار در زاویه انحراف ۱۲ درجه.



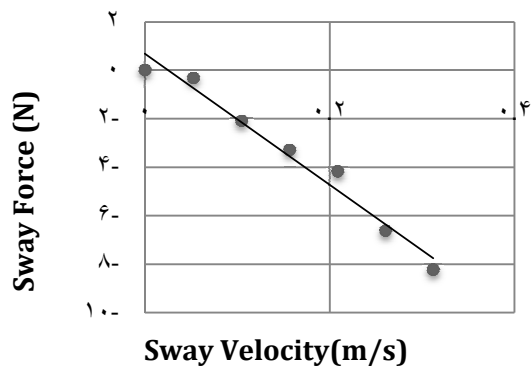
شکل (۱۱): توزیع ضریب فشار در سرعت زاویه‌ای ۰/۱ رادیان بر ثانیه.

۶- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پایداری

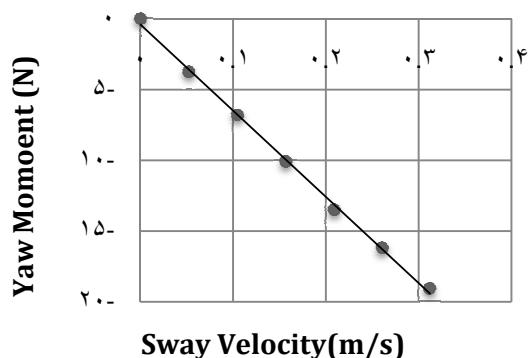
در این قسمت به تشریح نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

۶-۱- کشش با زاویه انحراف

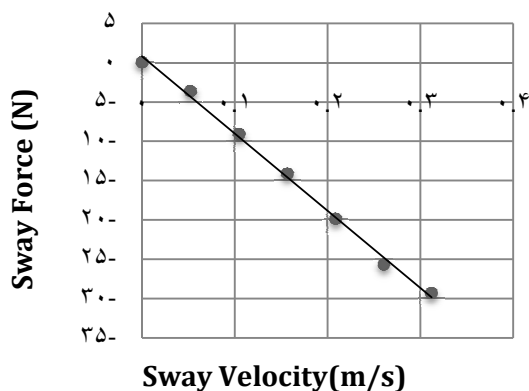
در شکل ۱۲ تغییرات سرعت جریان در اطراف وسیله، در زاویه حمله ۱۲ درجه برای حالتی که پره‌های کنترلی بر روی وسیله نصب شده‌اند، نمایش داده شده است. تغییرات نیروی سووی و



شکل (۱۴): تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت خطی سووی (بدون پره).

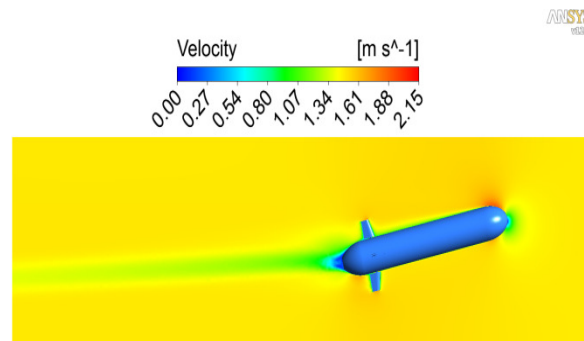


شکل (۱۵): تغییرات ممان یاو نسبت به مؤلفه سرعت خطی سووی (بدون پره).



شکل (۱۶): تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت خطی سووی (با پره).

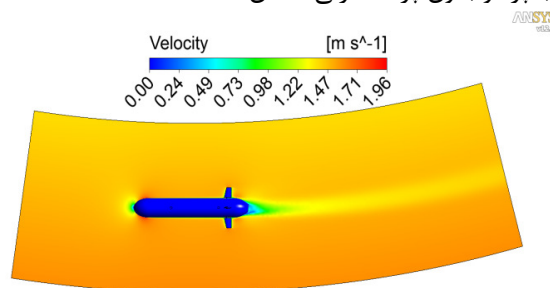
مومنتوم یاو، نسبت به تغییرات مؤلفه سرعت سووی (ناشی از تغییرات زاویه انحراف)، در شکل‌های ۱۷-۱۴ برای هر دو حالت (با پره و بدون پره کنترلی) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): پروفیل سرعت در اطراف وسیله در زاویه حمله ۱۲ درجه.

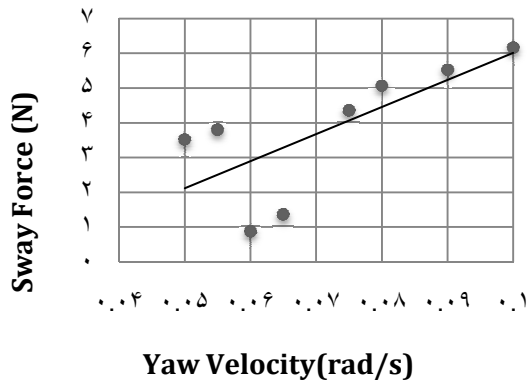
۶-۲- بازوی چرخان

در شکل ۱۳ تغییرات سرعت جریان در اطراف وسیله در سرعت زاویه‌ای ۰/۱ رادیان بر ثانیه برای حالتی که پره‌های کنترلی بر روی وسیله نصب شده نمایش داده شده است. تغییرات نیروی سووی و مومنتوم یاو، نسبت به تغییرات سرعت زاویه‌ای یاو، در شکل‌های ۲۱-۱۸ برای هر دو حالت (با پره و بدون پره کنترلی) نشان داده شده است.

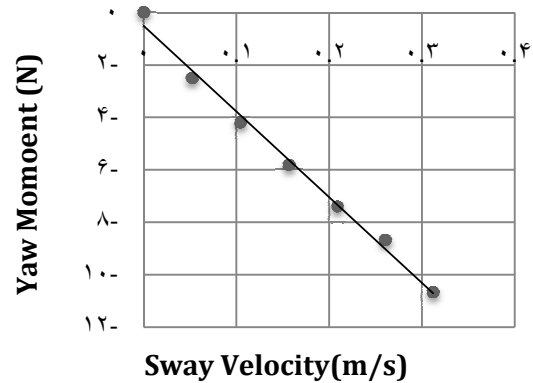


شکل (۱۳): پروفیل سرعت در اطراف وسیله در سرعت زاویه‌ای ۰/۱ رادیان بر ثانیه (۱=۱۵ m).

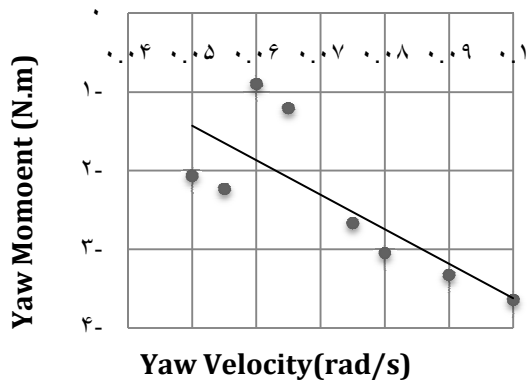
با توجه به نمودارهای حاصل در شکل‌های ۲۱-۱۴، می‌توان تغییرات نیرو و مومنتوم را در هر حالت نسبت به مؤلفه سرعت خطی سووی یا سرعت زاویه‌ای یاو محاسبه کرد. برای این منظور کفایست شیب منحنی‌های حاصل را در محدوده نزدیک به سرعت صفر به دست آورد.



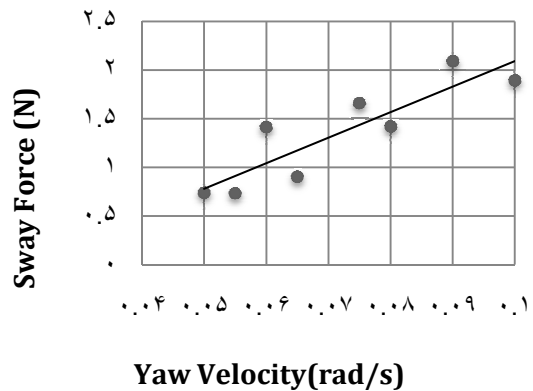
شکل (۲۰): تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای یاو (با پره).



شکل (۱۷): تغییرات ممان یاو نسبت به مؤلفه سرعت خطی سووی (با پره).



شکل (۲۱): تغییرات ممان یاو نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای یاو (با پره).

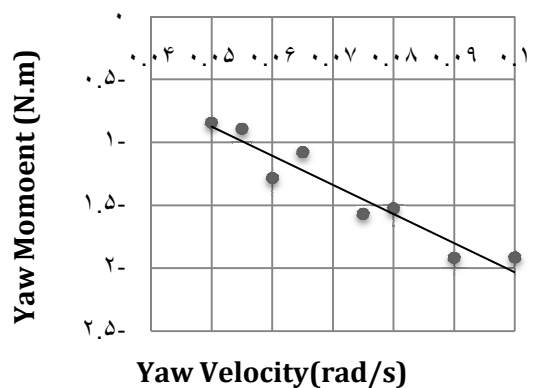


شکل (۱۸): تغییرات نیروی سووی نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای یاو (بدون پره).

حال، با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی، ضرایب هیدرودینامیکی در حالت خطی استخراج می‌شوند. مقادیر به دست آمده این ضرایب در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۴): ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شده به روش عددی برای AUV در دو حالت.

ضرایب هیدرودینامیکی	$\left(\frac{N.s}{m}\right)$	(N. s)	$\left(\frac{N.s}{rad}\right)$	$\left(\frac{N.m.s}{rad}\right)$
با سطوح کنترلی	-۹۴/۷	-۳۴/۹	۵۴/۴	-۳۳/۳
بدون سطوح کنترلی	-۲۴/۰	-۶۲/۷	۱۹/۵	-۱۹/۶



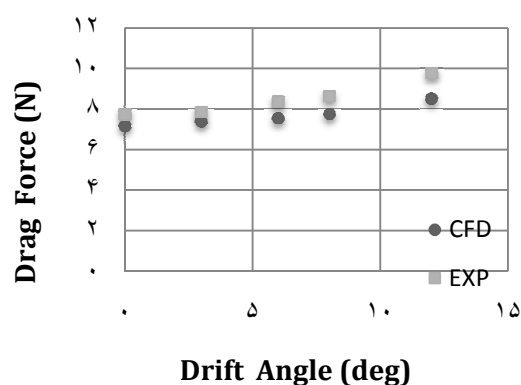
شکل (۱۹): تغییرات ممان یاو نسبت به مؤلفه سرعت زاویه‌ای یاو (بدون پره).

بوده که نشان دهنده ناپایداری وسیله در محدوده سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه است. در حالی که حاشیه پایداری برای حالتی که پره‌های کنترلی حضور دارند، مقدار ۰/۸۲ را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت استفاده از پره‌های کنترلی باعث افزایش \bar{X}_R و کاهش \bar{X}_V شده و در نهایت سبب می‌شود که نقطه اثر نیروی ناشی از حرکت یاو، جلوتر از نقطه اثر نیروی ناشی از حرکت سووی قرار گیرد.

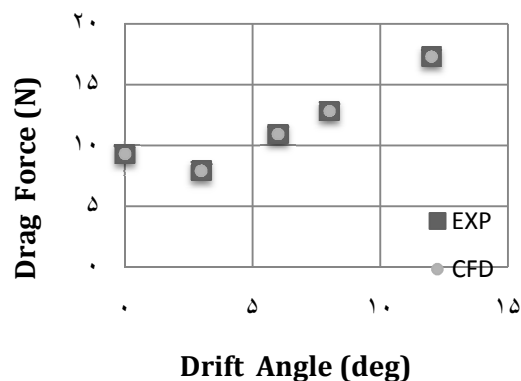
۷- نتیجه‌گیری

جهت بررسی حاشیه پایداری یک نمونه ربات هوشمند زیرآبی در دو حالت بدنه لخت^۱ و بدنه با پره‌های کنترلی، چهار ضریب هیدرودینامیکی N_R, Y_R, N_V, Y_V به روش عددی محاسبه شدند. با توجه به محور مختصات انتخاب شده، همان گونه که انتظار می‌رفت مقادیر Y_V که نشان دهنده اثر سرعت جانبی بر نیروی لیفت (سووی) است منفی شده است. مقدار این نیرو با افزایش زاویه انحراف β افزایش می‌یابد. حضور پره‌های کنترلی باعث افزایش نیروی سووی و در نتیجه افزایش ضریب هیدرودینامیکی Y_V می‌شود. مقادیر منفی به دست آمده برای N_V ، با توجه به منفی بودن Y_V ، نشان دهنده این است که بازوی ممان مثبت بوده و مرکز فشار وسیله در جلوی مبدأ مختصات قرار گرفته است. با اضافه شدن پره‌ها، مرکز فشار به مبدأ مختصات نزدیک‌تر شده (بازوی ممان کوتاه‌تر می‌شود) و باعث کاهش میزان منفی بودن ضریب هیدرودینامیکی N_V و در نتیجه افزایش حاشیه پایداری خواهد شد. در ارتباط با نتایج آزمون‌های بازوی چرخان می‌بایست به این نکته اشاره کرد که Y_R که نشانه اثر سرعت زاویه‌ای (نرخ تغییر یاو) بر نیروی جانبی است، مثبت بوده و علت آن این است که برای یک r مثبت، گرادیان فشار در جهت سووی منفی است که این باعث ایجاد یک نیروی سووی خالص مثبت می‌شود. از طرف دیگر چون افزایش سرعت سووی، نیروی متناظر با آن را افزایش می‌دهد، Y_R مثبت می‌شود. با اضافه شدن سطوح کنترلی نیروی لیفت قسمت عقب وسیله بیشتر شده و باعث افزایش ضریب هیدرودینامیکی Y_R می‌شود. گشتاور یاو ناشی از حضور سطوح کنترلی در جهت گشتاور یاو اولیه بوده و این باعث می‌شود گشتاور یاو

جهت بررسی میزان دقت محاسبات انجام شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی آزمون کشش با زاویه انحراف، با نتایج تجربی متناظر که در حوضچه کشش پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل‌های ۲۲-۲۳ نشان داده شده است. نتایج عددی مذکور سازگاری قابل قبولی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف در حدود ۱۳٪ مربوط به زاویه انحراف ۱۲ درجه در حالت بدون پره است.



شکل (۲۲): مقایسه تغییرات نیروی درگ نسبت به زاویه انحراف حاصل از روش‌های عددی و تجربی (بدون پره).



شکل (۲۳): مقایسه تغییرات نیروی درگ نسبت به زاویه انحراف حاصل از روش‌های عددی و تجربی (با پره).

با استفاده از رابطه (۱۲) و نتایج جدول ۴، حاشیه پایداری در حالتی که وسیله فاقد پره‌های کنترلی باشد در حدود ۵/۸-

6. Phillips, A.B., Furlong, M., and Turnock, S.R. "The Use of Computational Fluid Dynamics to Aid Cost-Effective Hydrodynamic Design of Autonomous Underwater Vehicles", J. Eng. for a Maritime Environment, Vol. 224, No. 4, pp. 239-254, 2010.
7. Simonsen, C.D. and Stern, F. "Flow Structure around Maneuvering Tanker in Deep and Shallow Water", The 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 2006.
8. Bellevre, D., Diaz de Tuesta, A., and Perdon, P. "Submarine Manoeuvrability Assessment, Using Computational Fluid Dynamic Tools", The 23rd Symposium of Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, September, 2000.
9. Burcher, R. and Rydill, L. "Concepts in Submarine Design", Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1994.
10. Triantafyllou, M.S. and Hover, F.S. "Maneuvering and Control of Marine Vehicles", Dep't. of Ocean Eng., Massachusetts Institute of Tech., Massachusetts, USA, 2003.
11. White, F.M. "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, Columbus, 1991.
12. Wilcox, D.C. "Turbulence Modeling for CFD", La Canada, Calif. DCW Industries, California 1998.
13. ANSYS CFX Reference Guide 12.1, November 2009.
14. Tagavi, R. and Salari, M. "Prediction of Boundary Layer Transition at High Freestream Turbulence Conditions, Using a Physical Model", Mech. & Aerospace Eng. J. Vol. 2, No. 2, 2006 (In Persian).

خالص اعمال شده به وسیله با مقادیر منفی افزایش یابد. با توجه به رابطه (۱۱) با افزایش N_r ، عبارت اول سمت راست آن مثبت تر می‌شود. از طرف دیگر عبارت منفی جمله دوم با اضافه شدن سطوح کنترلی به سمت مقادیر کوچک‌تر میل کرده و حاشیه پایداری وسیع‌تر می‌شود.

۸- مراجع

1. Perrault, D.E, Curtis, T., Bose, N., O'Young, S., and Williams, C. "C-Scout Maneuverability-A Study in Sensitivity", Oceans, MTS/IEEE Conf. and Exhibition, Vol. 1, pp. 436-437, 2001.
2. Kimbler, N. and Marshfield, W. "Design and Testing of Control Surfaces for the Autosub Demonstrator Test Vehicle", DRA Haslar Tech. Rep., 1993.
3. Guo, J. and Chiu, F. "Maneuverability of a Flat-Streamlined Underwater Vehicle", The 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
4. Larsson, L., Stern, F., and Bertram, V. "Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop", J. Ship Research, Vol. 47, No. 1, pp. 63-81, 2003.
5. Rhee, K., Yoon, H.K., Sung, Y. J., Kim, S.H. and Kang, J.N. "An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of a Submerged Body, Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device", Shilim-Dong Kwanak-Gu, Korea, 2001.

