تعیین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی‌ها به روش تست مدل

بهنام صادق‌زاده پراپری[۱*]، محمد سعید سیف[۲]، حمید مهدیقلی[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - دریا، مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف
۲- استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از وسایل بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر این اساس تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیر سطحی هوشمند در مرحله طراحی بسیار مهم است. به عبارت دیگر برای طراحی یک زیرسطحی هوشمند باید قابلیت کنترل و مانور آن توسط مدلهای ریاضی دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی است که به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. بنابراین جهت شبیه‌سازی دقیق کارکرد زیرسطحی بدست آوردن مقدار دقیق این ضرایب ضروری است.

با اینکه در سالهای اخیر روشهای عددی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند اما هنوز هم روش تست تجربی مدل قابل اعتمادتر بوده و معمولاً وسایل دریایی ساخته نمی‌شوند مگر اینکه مدل آن تست شده باشد.

زیرسطحی SUT-2 یک زیرسطحی هوشمند است که در مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف ایران طراحی و ساخته شده است. تست مدل در حوضچه کشش آزمایشگاه مهندسی دریا انجام گردیده و نتایج آن در مدل‌سازی دینامیکی و طراحی زیرسطحی فوق مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله روش تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی هوشمند SUT-2 به روش تست مدل و ویژگی‌های آن‌ها تحلیل گردیده است. این ضرایب می‌توانند برای مدلسازی دینامیکی و طراحی کنترلر هوشمند مورد استفاده قرار گیرند. روش ارائه شده محدود به زیرسطحی SUT-2 نبوده و در بررسی و طراحی انواع وسایل و ربات‌های زیردریایی قابل استفاده خواهد بود.

کلمات کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، زیرسطحی هوشمند، مدل‌سازی دینامیکی، تست مدل

Identification of Underwater Vehicle Hydrodynamic Coefficients Using Model Tests

B. Sadeghzadeh Parapari[1], M. S. Seif [2] , H. Mahdigholi [3]

1- M.Sc. in Mech. Eng.- Marine, Marine Eng. Research Center Sharif University of Technology
2- Professor, Mech. Eng. Dept., Sharif University of Technology
3-Associate Professor, Mech. Eng. Dept., Sharif University of Technology

Abstract

In recent years, unmanned vehicles have intensively been developed to reduce human dangers for marine applications. Predicting the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle is important during the vehicle's design phase. In other words to design an AUV, one must clarify its maneuverability and controllability based on a mathematical model. The mathematical model contains various hydrodynamic forces and moments expressed

* نویسنده مسوول مقاله Behnam.sadeghzadeh@gmail.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

collectively in terms of hydrodynamic coefficients. Therefore, the correct values of the coefficients must be known to precisely design the controller of AUVs.
Despite of remarkable progress in numerical analysis in recent years, But the experimental methods test modes is still more reliable. No marine vehicle will be manufactured unless its model been tested clearly first.
SUT-2 is an AUV, being developed by Marine Engineering Research Center Sharif University of Technology in Iran. Model test done into marine engineering laboratory towing tank.
In this paper hydrodynamic coefficients calculated with model test of autonomous underwater vehicle and hydrodynamic forces analyzed. This coefficients are used for dynamic modeling and autonomous controller design.
Keywords: Hydrodynamic Coefficient, Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Dynamic Modeling, Model test

۱- مقدمه

طی دهه‌های اخیر وسیله‌های بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا بسیار مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در مهندسی زیرسطحی و عملیات دریایی نیز این موضوع اهمیت ویژه‌ای یافته و بدلیل محدودیت در تأمین توان مورد نیاز برای رانش و تجهیزات جانبی وسیله زیرسطحی، تخمین دقیق نیروهای مورد نیاز برای انجام مأموریت امری ضروری است. بر این اساس تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیر سطحی هوشمند[۱] در مرحله طراحی بسیار مهم است. به عبارت دیگر برای طراحی یک AUV باید قابلیت کنترل و مانور آن توسط مدلهای ریاضی دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی می‌باشد که به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. بنابراین جهت شبیه‌سازی دقیق کارکرد AUV بدست آوردن مقدار دقیق این ضرایب ضروری خواهد بود.

همانطور که مرسوم است به منظور مطالعه و بررسی هیدرومکانیکی وسیله‌های دریایی بجای تحلیل کامل آن توسط مدلهای ریاضی می‌توان از مدلهای فیزیکی کوچک به منظور پیش بینی رفتار یک سیستم با ابعاد واقعی استفاده کرد.

روشهای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی وسیله‌های مغروق مشابه روش‌های استفاده شده برای هواپیماها و موشک‌ها است. این ضرایب معمولاً توسط آزمایش، تحلیل عددی یا روابط تجربی محاسبه می‌گردند. اخیراً با توجه به قابلیت‌های کامپیوترهای قدرتمند، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی[۲] جهت شبیه‌سازی میدان جریان اطراف زیرسطحی و محاسبه توزیع فشار روی وسیله مورد توجه قرار گرفته است [۱]. با این روش نیروها و ممانهای وارد بر وسیله قابل محاسبه خواهد بود. همچنین می‌توان از آزمایش مدل در حوضچه کشش برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی وسیله استفاده نمود. روش دیگر ساخت نمونه اصلی و تست آن خواهد بود. روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی[۳] نیز می‌توانند در مراحل اولیه طراحی جهت تخمین ضرایب هیدرودینامیکی، قابلیت مانور و انتخاب سطوح کنترل به کار روند.

محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی زیردریایی‌ها و زیرسطحی‌های هوشمند درمقالات بسیاری چون هامفریز[۴] (۱۹۸۱)، میدا و تاتسوتا[۵] (۱۹۸۹)، ناهون[۶] (۱۹۹۳،۱۹۹۶)، بالمن[۷] (۱۹۹۰)، پرسترو[۸] (۲۰۰۱) و ریدلی[۹] و همکارانش (۲۰۰۳) مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. از روش‌های پیشرفته‌تر جهت طراحی زیرسطحی‌های هوشمند می‌توان به بهینه‌سازی همزمان بدنه و سطوح کنترلی (سیلوستر[۱۰] و همکارانش ۱۹۹۸) به طوری که مشخصات هندسی وسیله نقش اساسی در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی داشته باشد اشاره نمود[۲].

در این مقاله به اصول روش تعیین ضرایب با استفاده از تست مدل پرداخته شده و نمونه نتایج در خصوص زیرسطحی SUT-2 ارائه گردیده است. زیرسطحی SUT-2 در سال‌های اخیر طراحی و ساخته شده است[۳].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

۲- تست مدل در طراحی وسیله‌های دریایی

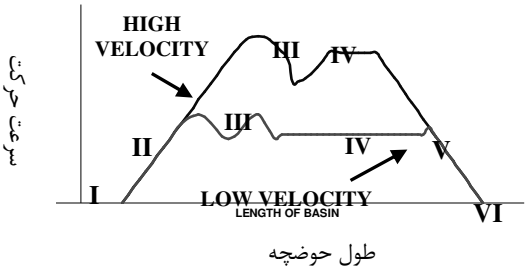
روش تست مدل در مقیاس کوچکتر یکی از ابزارهای مهم در مهندسی دریا به شمار می‌رود که روش مؤثری در پیشرفت این دانش بوده است. این روش متکی بر آنالیز ابعادی بوده و در اصل روشی است برای به دست آوردن اطلاعات کافی در مورد مسائلی که درک تحلیلی آنها به‌دلیل زیاد بودن پارامترهای مؤثر در مسأله بسیار پیچیده است. مزیت بزرگ این روش این است که با شناخت متغیرهای حاکم بر مسأله می‌توان آن‌ها را به گروه‌های بی‌بعد تبدیل و تعداد پارامترها را کاهش داد.

کاربرد این روش در طراحی و بهینه‌سازی زیرسطحی‌ها نیز قابل توجه است. چرا که فاکتورهای مهم مورد نیاز برای طراحی زیرسطحی از جمله نیروی محرکه، فرم بدنه، قابلیت مانور و... را می‌توان توسط آن مشخص نمود. امروزه حتی با پیشرفت علوم و تکنولوژی و به‌وجود آمدن نرم‌افزارهای قوی در زمینه طراحی، هنوز هم تست مدل یکی از مهمترین روشها در طراحی و تخمین اولیه فرم بدنه وسیله‌های دریایی به شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر با توسعه الگوریتم‌های مناسب و افزایش سرعت محاسبات رایانه‌ها، روشهای عددی نیز به عنوان جایگزینی مناسب برای تست مدل مطرح شده‌اند. اما هنوز روشهای عددی با تکیه بر شبیه‌سازی کامپیوتری به طور کامل نمی‌توانند جایگزین روشهای تجربی شوند بلکه به عنوان مکمل در کنار آنها می‌توانند مفید باشند.

شکل ۱- حوضچه کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا

در اکثر کانالهای کشش از ارابه[11] جهت حرکت مدل استفاده می‌گردد. به صورت معمول ارابه به وسیله نیروی الکتریکی بر روی ریلهایی در بالای حوضچه رانده می‌شود و اتصال آن به مدل توسط دینامومتری است که نیروهای وارد به مدل را در طول رانش در سرعت ثابت و یا در حرکت شتاب‌دار اندازه می‌گیرد.

شکل ۱ حوضچه کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا را نشان می‌دهد. سیستم کشش حوضچه مرکز پژوهشی مهندسی دریا از نوع ارابه ریلی است. در این حوضچه سرعت ارابه بین صفر تا m/s ۶ قابل تغییر بوده و توسط کاربر کنترل می‌شود. انجام دقیق آزمایش با سرعت یکنواخت ارابه امکان پذیر می‌باشد. شکل ۲ نواحی مختلف سرعت ارابه را نشان می‌دهد. در این شکل نواحی مختلف شتاب‌گیری، تنظیم سرعت، ناحیه اندازه‌گیری، کاهش سرعت و متوقف شدن ارابه نشان داده شده است.



I	**طول ارابه**
II	**ناحیه شتاب‌گیری**
III	**ناحیه تنظیم سرعت**
IV	**ناحیه اندازه‌گیری**
V	**ناحیه کاهش سرعت**
VI	**ناحیه اضافی ترمز**

شکل ۲- نواحی مختلف سرعت ارابه

در سیستم کشش دانشگاه شریف، امکان اندازه‌گیری پارامترهایی مانند نیروی مقاوم در مقابل حرکت، تغییرات زاویه‌ای[12]، نیروی عرضی[13]، تغییرات آبخور، گشتاور ایجاد شده و سرعت لحظه‌ای در راستای حرکت وجود دارد. همچنین تست‌های مختلفی از جمله تست تجهیزات زیرآب مانند پروانه، سکان و انواع زیردریایی‌ها قابل انجام است. نیروی محرکه سیستم کشش توسط یک الکتروموتور دور متغیر جریان متناوب تأمین شده و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

کنترل و داده‌برداری توسط رایانه انجام می‌شود. مشخصات کلی کانال و سیستم کشش در جدول ۱ ذکر گردیده است.

جدول ۱- مشخصات کلی کانال و سیستم کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا

طول × عرض × عمق کانال (متر)	۱/۲×۲/۵×۲۵
نوع سیستم کشش	Carriage + Electromotor (4kw)
بیشینه سرعت کشش	$۶\frac{m}{s}$
بیشینه شتاب کشش	$۲\ \frac{m}{s^2}$

۳- اصول تشابه

همانگونه که اشاره شد، امروزه با اینکه روشهای عددی در تحلیل هیدرودینامیکی رفتار شناورها پیشرفت قابل توجهی داشته است اما هنوز تست مدل از اجزای ضروری طراحی وسیله‌های دریایی به شمار می‌رود. معمولاً تست مدل توسط وسیله‌ای در ابعاد کوچکتر انجام می‌گیرد. برای اینکه بتوان نتایج حاصل از تست مدل را به نمونه واقعی تعمیم داد باید تشابه کاملی بین مدل و وسیله اصلی برقرار کرد و این هنگامی رخ می‌دهد که از سه لحاظ هندسی، سینماتیکی و دینامیکی تشابه برقرار شود.

معمولاً برقراری تشابه هندسی کامل در ابعاد اصلی انجام پذیر است اما در جزئیات به دشواری عملی می‌شود. به عنوان مثال ایجاد تشابه با در نظر گرفتن زبری سطح دشوار است و معمولاً در نظر گرفته نشده و تمهیداتی برای کاهش خطاهای ناشی از آن اندیشیده می‌شود.

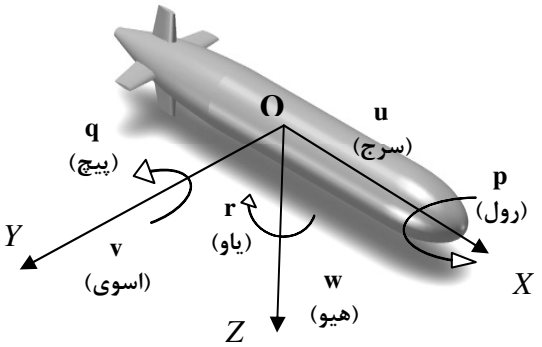
برای جریان سیال تراکم ناپذیر، وقتی اعداد فرود (معمولاً به دو صورت تعریف می‌شود: $Fn_\nabla = \frac{V}{\sqrt{g.\nabla^{1/3}}}$ و $Fn = \frac{V}{\sqrt{g.L}}$) برای مدل و نمونه اصلی یکسان شود، تشابه سینماتیکی به‌دست می‌آید [۴]. این تشابه برای شناورهای سطحی و یا زیرسطحی‌های نزدیک به سطح آب مهم می‌باشد. برای تشابه دینامیکی وسیله‌های زیرسطحی باید اعداد رینولدز ($R_e = \frac{VL}{\nu}$) و کاویتاسیون ($\sigma = \frac{p - p_v}{\rho V^2}$) یکسان باشد. در صورتی که تنش سطحی آب هم اهمیت داشته باشد باید عدد وبر ($We = \frac{\rho V^2 L}{\gamma}$) مدل و نمونه اصلی هم برابر شود. در اینجا فرض شده است اثر کاویتاسیون و تنش سطحی ناچیزند. پس از برقراری تشابه‌های لازم بین مدل و نمونه اصلی، به کمک نتایج آزمایش مدل و تحلیل ابعادی می‌توان نیروهای وارد به وسیله را محاسبه و رفتار نمونه اصلی را ارزیابی کرد.

۴- معادلات دینامیکی حرکت

معمولاً بررسی حرکت به دو بخش تقسیم می‌شود: سینماتیک، که فقط جنبه هندسی حرکت را بررسی می‌کند و سینتیک که به تحلیل نیروهای به وجود آورنده حرکت می‌پردازد.

معمولاً مبدأ محور مختصات متصل به بدنه در مرکز جرم وسیله انتخاب می‌شود. در زیرسطحی‌ها، محورهای X Y Z منطبق با محورهای اصلی اینرسی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

X: محور طولی (جهت از دم به سمت دماغه)، Y: محور عرضی (جهت به سمت استاربورد[۱۴])، Z: محورعمودی (جهت از بالا به پایین). شکل ۳ محورهای مختصات تعریف شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تعریف دستگاه مختصات و نمادگذاری

معادله غیرخطی حرکت در دستگاه مختصات متصل به بدنه به صورت زیر قابل بیان می‌باشد [۳]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

$$\left(M_{RB}+M_A\right)\dot{v}+\left(C(v)+D(v)\right)v+g(\eta)=\tau \qquad (۱)$$

ماتریس جرم جسم صلب (M_{RB}) با رابطه (۲) نشان داده شده است. با مشخص بودن ابعاد، تجهیزات، جنس بدنه و همچنین جانمایی وسیله مؤلفه‌های مختلف ماتریس فوق قابل محاسبه می‌باشد [۵].

$$M_{RB}=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mx_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mx_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mx_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mx_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

ماتریس جرم افزوده (M_A) با رابطه (۳) و ماتریس گریز از مرکز و کریولیس هیدرودینامیکی ($C(v)$) نیز با رابطه (۴) بدست می‌آیند. مؤلفه‌های مختلف این ماتریس با تست مدل با شتاب ثابت محاسبه می‌گردد [۶].

$$M_A=-diag\{X_{\dot{u}},Y_{\dot{v}},Z_{\dot{w}},K_{\dot{p}},M_{\dot{q}},N_{\dot{r}}\} \qquad (۳)$$

$$C_A(v)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_w w & Y_v v \\ 0 & 0 & 0 & Z_w w & 0 & -X_u u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_v v & X_u u & 0 \\ 0 & -Z_w w & Y_v v & 0 & -N_r r & M_q q \\ Z_w w & 0 & -X_u u & N_r r & 0 & -K_p p \\ -Y_v v & X_u u & 0 & -M_q q & K_p p & 0 \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

جمله میرایی هیدرودینامیکی ($D(v)v$) در رابطه (۱) با معادله (۵) به دست می‌آید. این جملات نیز با تست مدل با سرعت ثابت تعیین می‌شوند [۷].

$$D(v)v=diag\{X_d,Y_d,Z_d,K_d,M_d,N_d\} \qquad (۵)$$

ماتریس نیروها و ممانهای بازگرداننده ($g(\eta)$) نیز با معادله (۶) به دست می‌آید. مقادیر مؤلفه‌های این ماتریس با مشخص بودن موقعیت مرکز جرم قابل محاسبه خواهند بود [۸]، [۹].

$$g(\eta)=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\overline{BG}_y Wc\theta c\phi+\overline{BG}_z Wc\theta s\phi \\ \overline{BG}_z Ws\theta+\overline{BG}_x Wc\theta c\phi \\ -\overline{BG}_x Wc\theta s\phi-\overline{BG}_y Ws\theta \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

نهایتاً، ماتریس نیروها و ممانهای جلوبرنده (τ) شامل دو مؤلفه نیروها و ممانهای ناشی از پروانه و نیروها و ممانهای ناشی از سطوح کنترلی می‌باشد [۱۰]، [۱۱].

مؤلفه‌های ماتریس‌های جرم افزوده(M_A)، گریز از مرکز و کریولیس($C_A(v)$) و میرایی هیدرودینامیکی($D(v)v$) را که در مجموع تعداد آنها ۱۰۸ ضریب می‌باشد را ضرایب هیدرودینامیکی بدنه می‌نامند. ضرایب هیدرودینامیکی تابعی از شکل بدنه بوده و بیانگر نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی وارد بر وسیله در محیط زیر آب هستند. با ساده‌سازی‌های انجام شده برای بدنه متقارن محوری مغروق، تعداد ۸۲ ضریب صفر یا بسیار نزدیک صفر هستند [۱۲]. تعداد دیگری نیز با هم برابر بوده یا با توجه به ضرایب دیگر قابل محاسبه است. در نهایت ۳ ضریب از ماتریس جرم افزوده ($X_{\dot{u}},Y_{\dot{v}},M_{\dot{q}}$) و ۴ ضریب از ماتریس میرایی هیدرودینامیکی (X_d,Y_d,K_d,M_d) باقی می‌ماند [۱۲].

$X_{\dot{u}}$ جرم افزوده در جهت X در اثر شتاب وسیله در جهت X ($\dot{u}$) ، $Y_{\dot{v}}$ جرم افزوده در جهت Y در اثر شتاب وسیله در جهت Y ($\dot{v}$) و $M_{\dot{q}}$ جرم افزوده در اثر شتاب دورانی $\dot{q}$ می‌باشد. X_d میرایی در جهت X است و بقیه ضرایب میرایی هم به همین ترتیب تعریف می‌شوند.

با توجه به امکانات مرکز پژوهشی مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف، امکان محاسبه ۲ ضریب ($X_{\dot{u}},Y_{\dot{v}}$) از ۳ ضریب ماتریس جرم افزوده و ۲ ضریب (X_d,Y_d) از ۴ ضریب ماتریس میرایی هیدرودینامیکی وجود دارد.

جهت محاسبه ضرایب جرم افزوده از روابط زیر استفاده می‌شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

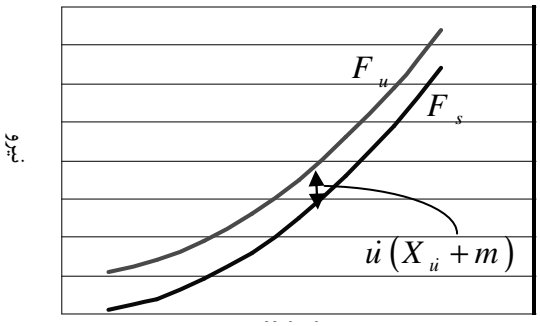
ضریب جرم افزوده در راستای محور X به‌دلیل شتاب در جهت X یعنی $\dot{u}$:

$$X_{\dot{u}} = \frac{(F_u)_X - (F_s)_X}{\dot{u}} - m \qquad (۷)$$

ضریب جرم افزوده در راستای محور Y به‌دلیل شتاب در جهت Y یعنی $\dot{v}$:

$$Y_{\dot{v}} = \frac{(F_u)_Y - (F_s)_Y}{\dot{v}} - m \qquad (۸)$$

انتظار می‌رود بدلیل فرض غیرلزج بودن سیال در حرکت شتابدار، منحنی نیرو بر حسب سرعت (F_u) تقریباً درجه دو بوده و اختلاف آن با منحنی نیرو بر حسب سرعت در حالت پایا[۱۵] (F_s) در همه سرعت‌ها تقریباً مقدار ثابتی باشد. شکل تقریبی این منحنی‌ها در شکل ۴ نشان داده شده و نحوه محاسبه $X_{\dot{u}}$ در صورت وجود نتایج آزمایشگاهی مشخص شده است.



شکل ۴- نحوه محاسبه ضرایب جرم افزوده

با بسط تیلور نیروهای وارد بر وسیله در حرکت پایا و ساده سازی معادلات حاصل بر اساس تقارن محوری وسیله، روابط زیر برای محاسبه ضرایب میرایی بدست می‌آیند [۳]:

میرایی در جهت X:

$$\begin{aligned} X_d = {} & X_{u|u|} u|u| + X_{uv} uv \\ & + X_{uw} uw + X_{v|v|} v|v| \\ & + X_{w|w|} w|w| \end{aligned} \qquad (۹)$$

میرایی در جهت Y:

$$Y_d = Y_{uv_d} uv + Y_{v|v|} v|v| \qquad (۱۰)$$

همچنین برخی از ضرایب وابسته به شکل زیر قابل محاسبه هستند:

ضریب جرم افزوده در راستای محور Z به‌دلیل شتاب در جهت Z یعنی $\dot{w}$:

$$Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}} \qquad (۱۱)$$

میرایی در جهت Z:

$$Z_d = Y_d = Z_{uw_d} uw + Z_{w|w|} w|w| \qquad (۱۲)$$

ضریب درگ نیز به عنوان معیاری بدون بعد از نیروی درگ وارد بر وسیله به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho A u^2} \qquad (۱۳)$$

با فرض ثابت بودن عدد رینولدز، ضریب درگ را می‌توان به صورت تابعی درجه دوم از زاویه حمله به صورت زیر در نظر گرفت [۱۲]:

$$C_D = a\alpha^2 + b\alpha + c \qquad (۱۴)$$

در این صورت با فرض کوچک بودن زاویه حمله ($\sin\alpha \approx \alpha$) به دست می‌آید [۱۲]:

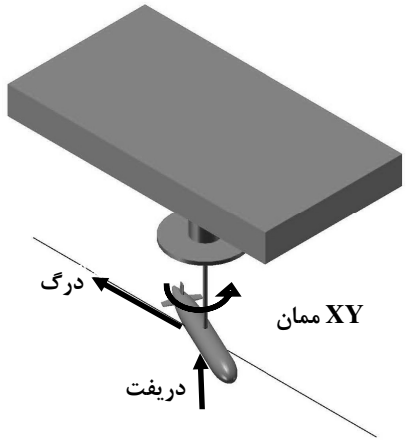
$$\begin{aligned} & X_{u|u|} = -(\tfrac{1}{2}\rho A)c \\ & X_{uw} = X_{uv} = -(\tfrac{1}{2}\rho A)b \\ & Z_{uw_d} = -Y_{uv_d} = -(\tfrac{1}{2}\rho A)\left(a - \frac{c}{2}\right) \\ & X_{v|v|} = X_{w|w|} = -(\tfrac{1}{2}\rho A_{transverse})(C_L)_{Transverse} \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

جهت محاسبه ۲ ضریب ماتریس جرم افزوده ($X_{\dot{u}}$، $Y_{\dot{v}}$) تست مدل در حوضچه کشش با شتاب ثابت بصورت طولی و عرضی انجام می‌شود.

جهت محاسبه ۲ ضریب ماتریس میرایی هیدرودینامیکی (X_d, Y_d)، تست مدل در زوایای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

حمله متفاوت (زاویه حمله صفر و حداقل سه زاویه حمله دیگر به عنوان مثال ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه) با سرعت ثابت انجام می‌شود. تکرار تست در سرعت‌های متفاوت (۴ سرعت بین حداقل و حداکثر سرعت تست) و نیز افزایش تعداد زاویه حمله، باعث افزایش دقت در محاسبه ضرایب خواهد شد. نیروهای اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر در شکل ۵ نشان داده شده است.

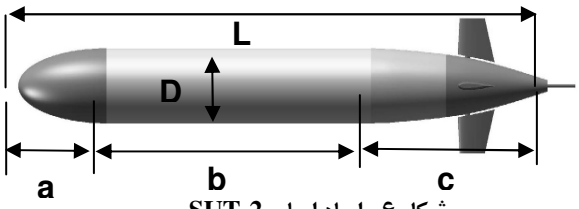


شکل ۵- نیروهای اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر

تست سطوح کنترل نیز در حوضچه کشش انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در زوایای ۳۵-۵ درجه در ۴ سرعت متفاوت انجام گردیده است. لازم به ذکر است در هر دو تست مدل بدنه و سطوح کنترل، مدل توسط میله‌ای به دینامومتر متصل می‌شود. این میله باعث وارد آمدن خطایی در نیروها و ممانهای ثبت شده می‌گردد. با تست میله بدون مدل می‌توان تأثیر آن را اندازه‌گیری و از نتایج نهایی کم نمود.

۵- نتایج تجربی

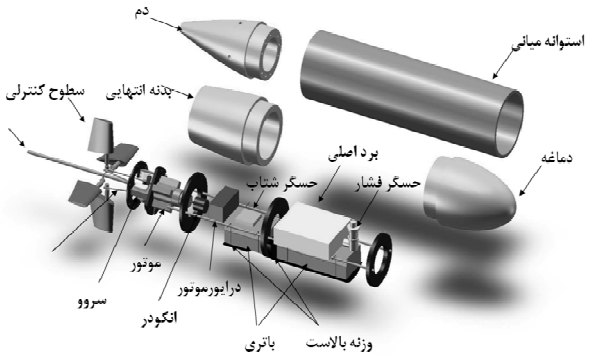
همانگونه که اشاره شد طراحی و ساخت زیرسطحی هوشمند SUT-2 در سال ۱۳۸۷ آغاز گردید [۳]. طراحی خطوط بدنه این زیرسطحی بر اساس بدنه مایرینگ[۱۶] انجام گرفت. این شکل بدنه در بسیاری از مقالات علمی استفاده شده و به عنوان بهترین خطوط بدنه از لحاظ کاهش ضریب درگ بدنه و جانمایی بهتر نسبت به خطوط بدنه اژدری شکل دیگر شناخته شده است.[۱۷] شکل ۶ و جدول ۲ ابعاد اصلی SUT-2 را نشان می‌دهند. در شکل ۷ جانمایی تجهیزات زیرسطحی SUT-2 نشان داده شده است.



شکل ۶- ابعاد اصلی SUT-2

جدول ۲- ابعاد اصلی SUT-2 (میلی‌متر)

طول کل	L	۱۴۱۲
قطر	D	۲۰۰
طول دماغه	a	۲۳۵
طول استوانه میانی	b	۷۰۶
طول دم	c	۴۷۱



شکل ۷- جانمایی تجهیزات SUT-2

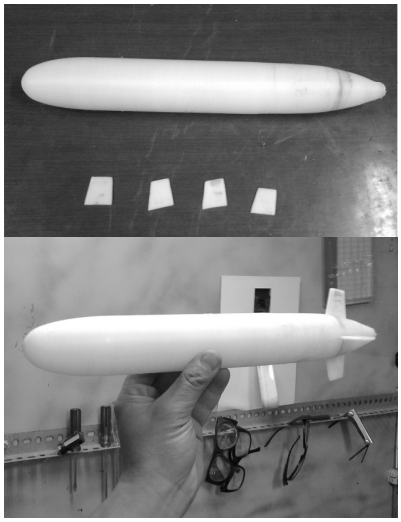
در این تحقیق مدل بدنه و سطوح کنترل پس از طراحی و رعایت اصول تست و تشابه در کارگاه ساخت مدل مرکز پژوهشی مهندسی دریا ساخته شده است. در ادامه به جزئیات مدل‌های ساخته شده پرداخته شده است.

۵-۱- مدل بدنه

مدل ساخته شده از جنس پلی‌آمید بوده و به روش تراشکاری ساخته شده است. نسبت ابعادی مدل $\frac{1}{4}$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

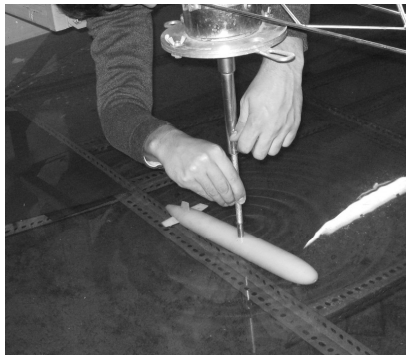
می‌باشد. شکل ۸ مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. در جدول ۳ نیز ابعاد کلی مدل ساخته شده ارائه شده است. شکل ۹ نیز نحوه نصب مدل بر روی ارابه حوضچه کشش در تست با حرکت جانبی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مدل $\frac{1}{4}$ زیرسطحی SUT-2

جدول ۳- ابعاد کلی مدل $\frac{1}{4}$ زیرسطحی SUT-2

		نمونه اصلی (میلی‌متر)	مدل (میلی‌متر)
طول کل	L	۱۴۱۲	۳۵۳
قطر	D	۲۰۰	۵۰
طول دماغه	a	۲۳۵	۵۹
طول استوانه میانی	b	۷۰۶	۱۷۶
طول دم	c	۴۷۱	۱۱۸

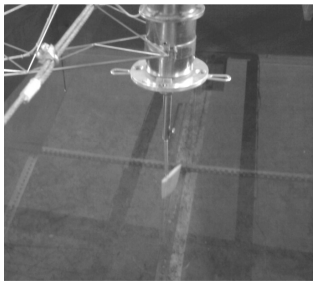


شکل ۹- نصب مدل بر روی ارابه حوضچه کشش

۵-۲- مدل سطوح کنترل

سطوح کنترل ساخته شده جهت نصب بر روی زیرسطحی در ابعاد واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل ۱۰- الف سطوح کنترل زیرسطحی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰- ب سطوح کنترل زیرسطحی بر روی ارابه حوضچه کشش نشان داده شده است.

الف- نمونه سطوح کنترل



ب- سطوح کنترل بر روی ارابه حوضچه کشش

شکل ۱۰- سطوح کنترل زیرسطحی SUT-2

۵-۳- تست بدنه با متعلقات

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، تشابه کامل مدل و نمونه واقعی در عمل غیر ممکن است. دراین تحقیق سعی شده است تا مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و تست مدل در محدوده اعداد رینولدز برابر انجام شود. بدین منظور عدد رینولدز مدل برای قرار گرفتن در ناحیه جریان آشفته، بالای 10^5 نگه داشته می‌شود.

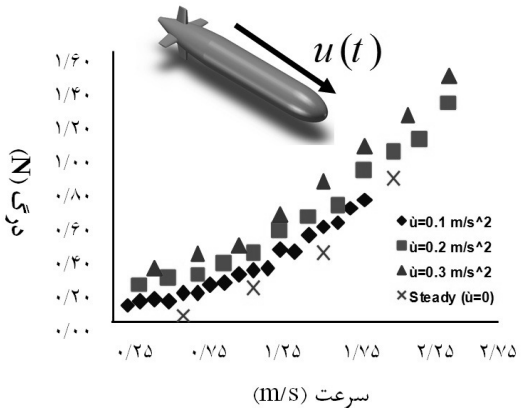
در تست مدل در حالت کشش عرضی به دلیل محدودیت دینامومتر در ثبت نیروهای بزرگ و امکان آسیب دیدن دینامومتر، تست‌ها در محدوده جریان آرام انجام شده است.

عمق غوطه‌وری ۵ برابر قطر وسیله بوده و با توجه به مشاهدات در این عمق، تأثیرات سطح آزاد قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

شکل ۱۱ نمودار نتایج تست مدل در حرکت طولی رو به جلو با زاویه حمله صفر درجه را در شتاب‌های مختلف نشان می‌دهد. خط رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم برای هر شتاب نیز رسم شده است. نمودار نیرو بر حسب سرعت برای حالت پایا نیز جهت مقایسه در شکل فوق رسم گردیده است.

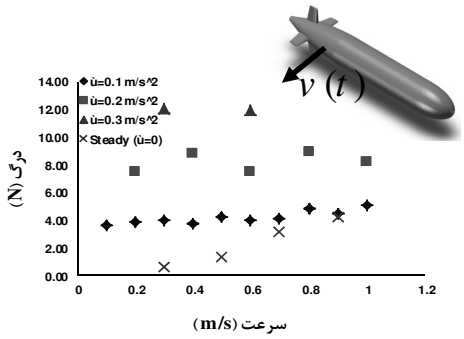
[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

با توجه به شکل ۴ و توضیحات ارائه شده، ضریب جرم افزوده $X_{\dot{u}}$ با استفاده از این نتایج قابل محاسبه می‌باشد. نتایج تست، مقدار عددی این ضریب برای مدل را $X_{\dot{u}} = 0.017 \ (kg)$ نشان می‌دهد.



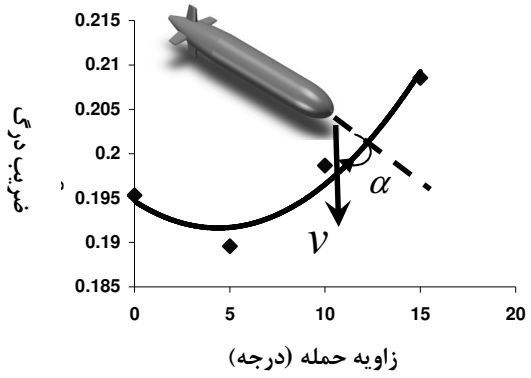
شکل ۱۱- نتایج تست مدل در حرکت طولی رو به جلو با زاویه حمله صفر درجه در شتاب‌های مختلف

شکل ۱۲ نمودار نتایج تست مدل در حرکت عرضی (با زاویه حمله ۹۰ درجه) را در شتاب‌های مختلف نشان می‌دهد. خط رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم برای هر شتاب رسم شده است. نمودار نیرو بر حسب سرعت برای حالت پایا نیز جهت مقایسه رسم گردیده است تا بتوان ضریب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ با استفاده از آن محاسبه نمود. نتایج تست، مقدار عددی این ضریب برای مدل را $Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} = 0.682 \ (kg)$ نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نتایج تست مدل در حرکت عرضی (با زاویه حمله ۹۰ درجه) در شتاب‌های مختلف

شکل ۱۳ نمودار ضریب درگ بر حسب زاویه حمله و خط رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم را نشان می‌دهد. همانطور که توضیح داده شد با استفاده از ضرایب رگرسیون مرتبه دو این منحنی، ضرایب میرایی هیدرودینامیکی وسیله قابل محاسبه خواهند بود.



شکل ۱۳- نمودار ضریب درگ بر حسب زاویه حمله و خط رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم

جدول ۴ ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل با نتایج تست زیرسطحی ریموس[18] که دارای هندسه کاملاً مشابه است، مقایسه شده است. مقایسه نتایج تست مدل با نتایج زیرسطحی ریموس خطایی در حدود حداکثر ۶/۹ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی SUT-2 و REMUS و مقایسه آن‌ها

	ضریب بی‌بعد	SUT-2	REMUS	اختلاف (٪)
جرم افزوده	$X'_{\dot{u}}$	-۰/۰۰۰۷۸۰	-۰/۰۰۰۷۶۶	۱/۸۳
	$Y'_{\dot{v}}$	-۰/۰۳۱	-۰/۰۲۹	۶/۹۰
	$Z'_{\dot{w}}$	-۰/۰۳۱	-۰/۰۲۹	۶/۹۰
ضرایب میرایی هیدرودینامیکی	$X'_{u\|u\|}$	-۰/۰۰۳۳۰	-۰/۰۰۳۴۴	۴/۰۷
	$Y'_{v\|v\|}$	-۰/۰۹۶	-۰/۱۰۰	۴/۰۰
	$Z'_{w\|w\|}$	-۰/۰۹۶	-۰/۱۰۰	۴/۰۰
	X'_{uv}	-۰/۰۰۰۱۴	۰	***
	X'_{uw}	-۰/۰۰۰۱۴	۰	***
	$X'_{v\|v\|}$	۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۱۰۰	۳/۰۰
	$X'_{w\|w\|}$	۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۱۰۰	۳/۰۰
	Y'_{uv_d}	-۰/۰۰۳۳۰	-۰/۰۰۳۴۴	۴/۰۷
	Z'_{uw_d}	-۰/۰۰۳۳۰	-۰/۰۰۳۴۴	۴/۰۷

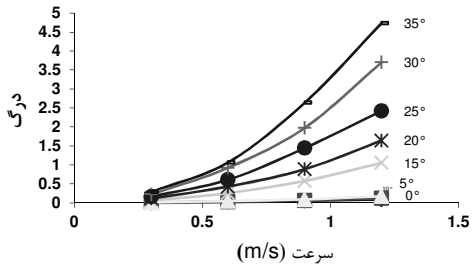
[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

۵-۴- تست سطوح کنترل

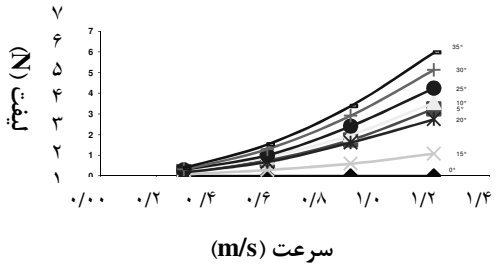
همانگونه که به آن اشاره گردید تست سطوح کنترل در ابعاد واقعی انجام گردیده است. مزیت اصلی تست در ابعاد واقعی، از بین بردن خطای ناشی از تحلیل ابعادی و عدم تشابه کامل مدل و نمونه اصلی است.

عمق غوطه‌وری ۲ برابر ارتفاع سطوح کنترلی در نظر گرفته شده که باعث می‌گردد از اثرات سطح آزاد صرفنظر شود.

شکل ۱۴ نمودار نیروی درگ بر حسب سرعت و شکل ۱۵ نمودار نیروی لیفت بر حسب سرعت را برای زوایای حمله مختلف سطوح کنترل نشان می‌دهد.

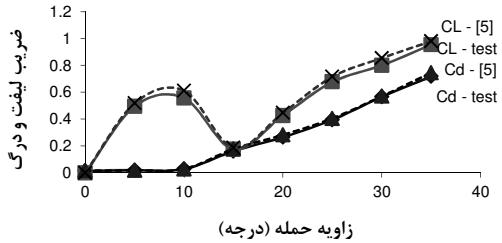


شکل ۱۴- نمودار نیروی درگ بر حسب سرعت برای زوایای حمله مختلف سطوح کنترل



شکل ۱۵- نمودار نیروی لیفت بر حسب سرعت برای زوایای حمله مختلف سطوح کنترل

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ضرایب بدون بعد لیفت و درگ قابل محاسبه می‌باشند. نمودار شکل ۱۶ ضرایب بدون بعد لیفت ودرگ سطوح کنترل زیرسطحی SUT-2 بر حسب زاویه حمله را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تست با نتایج تست آزمایشگاه ملی سندیای نیومکزیکو بر روی مقطع NACA0015 مقایسه شده است [۱۳].



شکل ۱۶- ضرایب بدون بعد لیفت ودرگ سطوح کنترل زیرسطحی SUT-2 بر حسب زاویه حمله

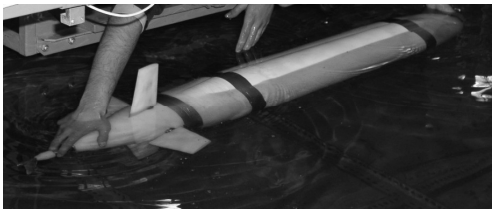
۶- تست خودرانش وسیله در ابعاد اصلی

زیرسطحی SUT-2 پس از اتمام مرحله طراحی جزئیات و بررسی‌های هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی، مکانیکی و الکترونیکی وارد مرحله ساخت گردید. شکل ۱۷ نمونه واقعی زیرسطحیSUT-2 را در کنار مدل $\frac{1}{4}$ آن نشان می‌دهد.

شکل ۱۷- زیرسطحی SUT-2 و مدل $1/4$

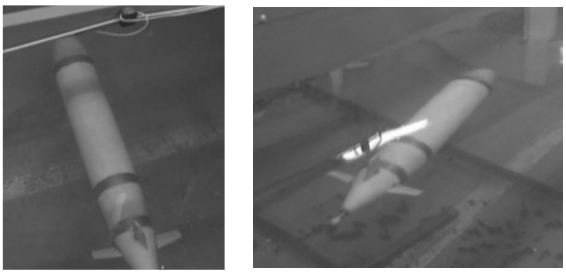
تست‌های اولیه این زیرسطحی به صورت کنترل از راه دور انجام گردیده و در مرحله نصب حسگرها و تجهیزات خودکنترلی می‌باشد. شکل ۱۸ زیرسطحی SUT-2 را در حال به آب‌اندازی نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]



شکل ۱۸- زیرسطحی SUT-2 در حال به آب‌اندازی

به‌دلیل محدودیت دینامومتر حوضچه کشش در اندازه‌گیری نیرو و ممان وارد و همچنین عدم قابلیت حوضچه کشش دانشگاه شریف در انجام تست‌های مانور، امکان تست نمونه واقعی زیرسطحی در حوضچه کشش وجود ندارد. به همین دلیل تست خود رانش وسیله با نصب حسگرهای لازم و در حوضچه‌ای با اندازه کافی در نظر گرفته شده است. شکل ۱۹ زیرسطحی SUT-2 را در حال مانور در حوضچه مرکز پژوهشی مهندسی دریا نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- زیرسطحی SUT-2 در حال مانور در حوضچه مرکز پژوهشی مهندسی دریا

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ضرایب هیدرودینامیکی بدنه یک زیرسطحی هوشمند به روش تست مدل محاسبه و نیروهای هیدرودینامیکی تحلیل گردیده است. بدین منظور روش تست مدل بدنه و سطوح کنترل در مرکز پژوهشی مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف ایران تدوین و اجرا گردید. این ضرایب برای مدلسازی دینامیکی و طراحی کنترلر هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ضرایب هیدرودینامیکی وسیله‌های زیرسطحی معمولاً توسط آزمایش، تحلیل عددی یا روابط تجربی محاسبه می‌گردند. به منظور مطالعه و بررسی هیدرومکانیکی وسیله‌های دریایی بجای تحلیل کامل آن توسط مدلهای ریاضی می‌توان از مدلهای فیزیکی کوچک به منظور پیش بینی رفتار یک سیستم پیچیده استفاده کرد. امروزه با اینکه روشهای عددی در تحلیل هیدرودینامیکی رفتار شناورها پیشرفت قابل توجهی داشته است اما هنوز تست مدل از اجزای ضروری طراحی وسیله‌های دریایی به شمار می‌رود. تست مدل توسط وسیله‌ای در ابعاد کوچکتر انجام می‌گیرد. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و مقایسه نتایج، دقت روش و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته قابل قبول بوده و می‌توان از روش فوق در ارزیابی هیدرودینامیکی زیرسطحی‌های مختلف استفاده کرد.

کلید واژگان

1-Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
2-Computational Fluid Dynamics (CFD)
3-Analytical and Semi Empirical
4-Humphreys
5-Maeda and Tutsuta
6- Nahon
7- Bohlmann
8- Prestero
9- Ridley
10- Silvestre
11- Carriage
12- Trim
13- Drift
14- Starboard (سمت راست وسیله)
15- Steady State
16- Myring,1976
17- Jun, B.-H.,et al. 2008
18- REMUS, 2009

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

فهرست علائم و اختصارات

Fn	-	عدد فرود
V	$\frac{m}{s}$	سرعت وسیله
g	$\frac{m}{s^2}$	شتاب گرانش زمین
L	m	طول وسیله
D	m	قطر وسیله
Fn_∇	-	عدد فرود حجمی
∇	m^3	حجم وسیله (جابجایی)
R_e	-	عدد رینولدز
ν	$\frac{m^2}{s}$	لزجت سینماتیکی
σ	-	عدد کاویتاسیون
p	pa	فشار
p_v	pa	فشار بخار اشباع
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی
γ	$\frac{kg}{s^2}$	کشش سطحی
X	N	مؤلفه نیرو در راستای محور x
Y	N	مؤلفه نیرو در راستای محور y
Z	N	مؤلفه نیرو در راستای محور z
K	$N-m$	مؤلفه ممان در راستای محور x
M	$N-m$	مؤلفه ممان در راستای محور y
N	$N-m$	مؤلفه ممان در راستای محور z
u	$\frac{m}{s}$	مؤلفه سرعت در راستای محور x
v	$\frac{m}{s}$	مؤلفه سرعت در راستای محور y
w	$\frac{m}{s}$	مؤلفه سرعت در راستای محور z
p	$\frac{rad}{s}$	مؤلفه سرعت دورانی در راستای محور x
q	$\frac{rad}{s}$	مؤلفه سرعت دورانی در راستای محور y
r	$\frac{rad}{s}$	مؤلفه سرعت دورانی در راستای محور z
x,y,z	m	مکان‌های اویلری
ϕ, ψ, θ	rad	زوایای اویلری
M_{RB}		ماتریس جرم جسم صلب
M_A		ماتریس جرم افزوده
$C(v)$		ماتریس گریز از مرکز و کریولیس هیدرودینامیکی
$D(v)$		ماتریس میرایی هیدرودینامیکی
$g(\eta)$		ماتریس نیروها و ممان‌های بازگرداننده
τ		ماتریس نیروها و ممان‌های جلوبرنده
m	kg	جرم واقعی وسیله
$x_G, y_G,$	m	موقعیت مرکز جرم
$I_x, I_{xy}, I_{xz}, I_y, I_{yx}, I_{yz}, I_{zx}, I_{zy}, I_z$	$kg-m^2$	ممان‌های اینرسی
$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$	kg	ضرایب جرم افزوده، به عنوان مثال $X_{\dot{u}}$ جرم افزوده در راستای محور x به دلیل شتاب در راستای محورx یعنی u است.
$K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}$	kg/m	
X_d, Y_d, Z_d		ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال X_d میرایی در جهت x است.
K_d	N	
M_d, N_d	$N-m$	
$\overline{BG}_x, \overline{BG}_y, \overline{BG}_z$	m	موقعیت مرکز جرم نسبت به مرکز شناوری.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]

وزن واقعی وسیله	N	W
نیروی وارد بر وسیله در حرکت شتاب‌دار	N	F_u
نیروی وارد بر وسیله در حرکت پایا	N	F_s
مؤلفه‌های شتاب خطی وسیله	$\frac{m}{s^2}$	u ,w ,v
زیرضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال $X_{u\|u\|}$ میرایی در جهت x به دلیل حرکت در جهت x با سرعت ثابت u است.	$\frac{kg}{m}$	$X_{u\|u\|}$ X_{uv}, X_{uw} $X_{v\|v\|}, X_{w\|w\|}$ $Y_{uv_d}, Y_{v\|v\|}$ $Z_{uw_d}, Z_{w\|w\|}$
ضریب درگ	-	C_D
ضریب لیفت	-	C_L
نیرو	N	F
سطح مقطع عرضی وسیله، سطح رو به جریان	m^2	A
زاویه حمله	rad	α
ضرایب رگرسیون مرتبه دو ضریب درگ بر حسب زاویه حمله	-	a,b,c
ضریب درگ در حرکت عرضی	-	$(C_D)_{Transverse}$
ضریب لیفت در حرکت عرضی	-	$(C_L)_{Transverse}$
سطح رو به جریان در حرکت عرضی	m^2	$A_{Transverse}$

۸- مراجع

1-“Investigation of a method for predicting AUV derivatives”, E.A. de Barros , A. Pascoal , E. de Sa, Ocean Engineering 35 - 1627–1636, 2008

2-“Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle”, Jason Evans, Meyer Nahon, Elsevier, 2004.

3-"Numerical Simulation of Flow Around SUT-2 Autonomous Underwater Vehicle", Sadeghzadeh Parapari, Mahdigholi, Seif, 2009. (In Persian)

4-“Fluid Mechanics”, Frank M. White, University of Rhode Island.

5-“State-dependent Riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints”, Mugdha S. Naik, Sahjendra N. Singh, Ocean Engineering 34-1711–1723, 2007.

6-“Sensitivity of AUV added mass coefficients to variations in hull and control plane geometry”, Doug Perrault et al., Ocean Engineering 30 (2003) 645–671, 2003.

7-“Sensitivity of AUV response to variations in hydrodynamic parameters”, Doug Perrault et al., Ocean Engineering 30 (2003) 779–811, 2003.

8-“Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle”, Ji-Hong Li et al., Ocean Engineering 32 (2005) 2165–2181, 2005.

9-“Planar trajectory planning and tracking control design for under actuated AUVs”, Filoktimon Repoulias, Evangelos Papadopoulos, Ocean Engineering 34-1650–1667, 2007.

10-“Navigation of an AUV for investigation of underwater structures”, Hayato Kondo et al., Control Engineering Practice 12 (2004) 1551–1559, 2004.

11-“On the Prediction of Maneuverability of the Autonomous Underwater Vehicle, AUV-HMI”, 0-7803-4273-9/98 IEEE, 1998.

12-“Submarine Dynamic Modeling”, Peter Ridley, Julien Fontan, Peter Corke

13-“Aerodynamic Characteristics of Seven Airfoil Sections Through 180 Degrees Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines”, Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., SAND80-2114, March 1981, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.5.7]