تعیین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحیها به روش تست مدل

بهنام صادقزاده پراپری'*، محمد سعید سیف'، حمید مهدیقلی"

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

چکیدہ

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 2-SUT 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 2-SUT 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 Parapari¹, M. S. Seif², H. Mahdigholi³

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

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

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 وحضچه کشش برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی وسیله استفاده نمود. روش دیگر ساخت نمونه اصلی و وسیله استفاده نمود. روش های 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[†] (۱۹۸۱)، میدا و تاتسوتا^۵ (۱۹۸۹)، ناهون^۲ (۱۹۹۳،۱۹۹۶)، بالمن^۷ (۱۹۹۱)، 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 2-SUT ارائه گردیده است. زیرسطحی SUT-2 در سالهای اخیر طراحی و ساخته شده است[۳]. طی دهههای اخیر وسیلههای بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا بسیار مورد بهرهبرداری قرار گرفتهاند. در مهندسی زیرسطحی و عمليات دريايي نيز اين موضوع اهميت ويژهاي يافته و بدلیل محدودیت در تأمین توان مورد نیاز برای رانش و تجهيزات جانبي وسيله زيرسطحي، تخمين دقيق نيروهاي مورد نياز براي انجام مأموريت امري ضروري است. بر این اساس تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیر سطحی هوشمند 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 دقيق اين ضرايب ضروري 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 می گردند. اخیراً با توجه به قابلیتهای کامپیوترهای قدرتمند، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ جهت شبیهسازی

در اکثر کانالهای کشش از ارابه (۲ جهت حرکت مدل استفاده می گردد. به صورت معمول ارابه به وسیله نیروی الکتریکی بر روی ریلهایی در بالای حوضچه رانده می شود 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 می گیرد. 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 ۶ m/s قابل تغییر بوده و توسط كاربر كنترل مىشود. انجام دقيق آزمايش با سرعت یکنواخت ارابه امکان پذیر میباشد. شکل ۲ نواحی مختلف سرعت ارابه را نشان میدهد. در این شكل نواحى مختلف شتاب گيرى، تنظيم سرعت، ناحيه اندازه گیری، کاهش سرعت و متوقف شدن ارابه نشان داده شده است.



در سیستم کشش دانشگاه شریف، امکان اندازه گیری پارامترهایی مانند نیروی مقاوم در مقابل حرکت، تغییرات زاویهای^{۱۲}، نیروی عرضی^{۱۳}، 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 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 بی بعد 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 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 شدهاند. اما هنوز روشهای عددی با تکیه بر شبیهسازی تجربی شوند بلکه به عنوان مکمل در کنار آنها میتوانند مفید باشند.



شکل ۱- حوضچه کشش مرکز پژوهشی مهندسی دریا

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

1/T×T/&×T&	طول × عرض × عمق کانال (متر)
Carriage + Electromotor (4kw)	نوع سيستم كشش
$\frac{\varphi m}{s}$	بيشينه سرعت كشش
$\gamma \frac{m}{s^2}$	بيشينه شتاب كشش

۳- اصول تشابه

همانگونه که اشاره شد، امروزه با اینکه روشهای عـددی در تحلیل هیـدرودینامیکی رفتار شـناورها پیشرفت قابل توجهی داشته است اما هنوز تست مـدل از اجزای ضروری طراحی وسیلههای دریایی بـه شـمار میرود. معمولاً تست مـدل توسط وسیلهای در ابعاد کوچکتر انجام می گیرد. برای اینکه بتوان نتایج حاصل از تست مدل را به نمونه واقعی تعمیم داد بایـد تشابه کـاملی بـین مـدل و وسیله اصلی برقـرار کـرد و ایـن هنگـامی رخ مـیدهـد کـه از سـه لحـاظ هندسـی، 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: (معمولاً به دو صورت تعریف میشود: $Fn = \frac{V}{\sqrt{g.L}}$ و $Fn_{\nabla} = \frac{V}{\sqrt{g.\nabla^{\frac{1}{3}}}}$) 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

رينولدز $(\frac{VL}{v} = \frac{VL}{v})$ و كاويتاسيون $(R_e = \frac{VL}{v})$ و كاويتاسيون $(\sigma = \frac{P - P_v}{\rho V^2})$ يكسان باشد. در صورتى كه تنش سطحى آب هم اهميت داشته باشد بايد عدد وبر $(\frac{L}{\gamma})^2 = \frac{\rho V^2 L}{\gamma}$ مدل و نمونه اصلى هم برابر شود. در اينجا فرض شده است اثر كاويتاسيون و تنش سطحى ناچيزند. پس از برقرارى تشابههاى لازم بين مدل و نمونه اصلى، به كمك نتايج آزمايش مدل و تحليل ابعادى مىتوان نيروهاى وارد به وسيله را محاسبه و رفتار نمونه اصلى كرد.

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 می پردازد.

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]:

٣۴

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\overline{BG}_{y}Wc\theta c\phi + \overline{BG}_{z}Wc\theta s\phi \\ \overline{BG}_{z}Ws\theta + \overline{BG}_{x}Wc\theta c\phi \\ -\overline{BG}_{x}Wc\theta s\phi - \overline{BG}_{y}Ws\theta \end{bmatrix}$$
(7)

نهایتاً، ماتریس نیروها و ممانهای جلوبرنده (au) 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 مركــــز و كريـــوليس ($C_{A}(v)$) و ميرايــــ هیدرودینامیکی (D(v)v) را که در مجموع تعداد آنها ۱۰۸ ضریب مے باشد را ضرایب هیـدرودینامیکی بدنه مینامند. ضرایب هیدرودینامیکی تابعی از شکل بدنه بوده و بیانگر نیروها و ممان های هیدرودینامیکی وارد بـر وسـیله در محـیط زیـر آب هسـتند. بـا 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 * ضريب از ماتريس جرم افزوده (M_{i}, Y_{v}, M_{i}) و ض_____ م____ م____ میرای____ هی___درودینامیکی .[11] باقی میماند ($X_{d}, Y_{d}, K_{d}, M_{d}$)

X جرم افزوده در جهت X در اثر شتاب وسیله در جهت X در اثر شتاب وسیله در جهت X_{ii} مهت X در اثر شتاب وسیله در جهت Y_{ij} (ii) (ii) X جهت X در اثر شتاب وسیله در جهت Y (ij) و M_{ij} جرم افزوده در اثر شتاب دورانی ij مییاشد. X_{ij} میرایی در جهت X است و بقیه ضرایب میرایی هم به همین ترتیب تعریف می شوند.

با توجه به امکانات مرکز پژوهشی مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف، امکان محاسبه ۲ ضریب (X_{ii}, Y_{v}) از ۳ ضریب ماتریس جرم افزوده و ۲ ضریب (X_{ii}, Y_{v}) از ۲ ضریب ماتریس میرایی ضریب (X_{d}, Y_{d}) از ۲

جهت محاسبه ضرایب جرم افزوده از روابط زیر استفاده میشود:

$$\left(M_{RB} + M_{A} \right) v' + \left(C(v) + D(v) \right) v$$

$$+ g(\eta) = \tau$$
(1)

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].

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

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

$$M_{A} = -diag\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\}$$
(7)

$$C_{A}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{w}w & Y_{v}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{w}w & 0 & -X_{u}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{v}v & X_{u}u & 0 \\ 0 & -Z_{w}w & Y_{v}v & 0 & -N_{r}r & M_{q}q \\ Z_{w}w & 0 & -X_{u}u & N_{r}r & 0 & -K_{\rho}p \\ -Y_{v}v & X_{u}u & 0 & -M_{q}q & K_{\rho}p & 0 \end{bmatrix}$$

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].

$$D(v)v =$$

$$diag \left\{ X_{d}, Y_{d}, Z_{d}, K_{d}, M_{d}, N_{d} \right\}$$
(Δ)

ماتریس نیروها و ممانهای بازگرداننده ((g (η)) نیـز بـا معادله (۶) به دست مـی آیـد. مقـادیر مؤلفـههـای ایـن ماتریس با مشـخص بـودن موقعیـت مرکـز جـرم قابـل محاسبه خواهند بود [۸]، [۹].

سال هفتم/ شماره ۱۴/ پاییز و زمستان ۹۰

نشریه مهنــدسـی د*ریــا* ـ

میرایی در جهت Y:

$$Y_{d} = Y_{uv_{d}}uv + Y_{v|v}v|v| \qquad (1\cdot)$$

همچنین برخی از ضرایب وابسته به شکل زیر قابل محاسبه هستند: ضریب جرم افزوده در راستای محور Z بهدلیل شتاب

در جهت Z يعنى Ŵ : $Z_{v} = Y_{v}$ (11)

یرایی در جهت Z:

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

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

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho A u^2} \tag{17}$$

با فرض ثابت بودن عدد رینولدز، ضریب درگ را می توان به صورت تابعی درجـه دوم از زاویـه حملـه بـه صورت زیر در نظر گرفت [۱۲]:

$$C_D = a\alpha^2 + b\alpha + c \tag{14}$$

در این صورت با فرض کوچک بودن زاویه حمله :[17] به دست می آید ($\sin \alpha \approx \alpha$)

$$X_{u|u|} = -(\frac{1}{2}\rho A)c$$

$$X_{uw} = X_{uv} = -(\frac{1}{2}\rho A)b$$

$$Z_{uw_d} = -Y_{uv_d} = -(\frac{1}{2}\rho A)\left(a - \frac{c}{2}\right)$$

$$X_{v|v|} = X_{w|w|} = -(\frac{1}{2}\rho A_{ransverse})\left(C_L\right)_{Transverse}$$

$$(1\Delta)$$

جهت محاسبه ۲ ضریب ماتریس جرم افزوده نست مدل در حوضچه کشش با شتاب (Y_v, X_u) تست مدل در ثابت بصورت طولي و عرضي انجام مي شود.

جهت محاسبه ۲ ضریب ماتریس میرایی هیدرودینامیکی (X_d, Y_d)، تست مدل در زوایای ضریب جرم افزوده در راستای محور X بهدلیـل شـتاب در جهت X یعنی *ü*:

$$X_{ii} = \frac{(F_{ii})_{X} - (F_{s})_{X}}{ii} - m$$
(Y)

ضریب جرم افزوده در راستای محور Y بهدلیل شتاب در جهت Y يعنى ٧:

$$Y_{v} = \frac{\left(F_{u}\right)_{Y} - \left(F_{s}\right)_{Y}}{v} - m \qquad (\lambda)$$

انتظار میرود بدلیل فرض غیرلزج بودن سیال در (F_u) حرکت شتابدار، منحنی نیرو بر حسب سرعت (تقریباً درجه دو بوده و اختلاف آن بـا منحنـی نیـرو بـر حسب سرعت در حالت پایا 10 (F_{s}) در همه سـرعتهـا تقریباً مقدار ثابتی باشد. شکل تقریبی این منحنیها در شکل ۴ نشان داده شده و نحوه محاسبه X_{μ} در صورت وجود نتایج آزمایشگاهی مشخص شده است.





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 مي آيند [۳]: میرایی در جهت X:

$$X_{d} = X_{u|\mu} |\mu| + X_{uv} uv$$

$$+ X_{uw} uw + X_{v|\nu} |\nu|$$

$$+ X_{w|w} |w|$$
(9)

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 اندازه گیری شده توسط دینامومتر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نیروهای اندازه گیری شده توسط دینامومتر

تست سطوح کنترل نیز در حوضچه کشش انجام شده است. اندازه گیریها 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 اندازه گیری و از نتایج نهایی کم نمود.

۵- نتایج تجربی

همانگونه که اشاره شد طراحی و ساخت زیرسطحی هوشـمند SUT-2 در سـال ۱۳۸۷ آغـاز گردیـد [۳]. طراحی خطوط بدنه ایـن زیرسطحی بـر اسـاس بدنـه مایرینگ^{۱۶} انجام گرفت. این شـکل بدنـه در بسـیاری از مقالات علمی استفاده شده و به عنوان بهتـرین خطـوط بدنه از لحاظ کاهش ضریب درگ بدنه و جانمایی بهتـر نسبت به خطوط بدنه اژدری شکل دیگر شـناخته شـده

است.^{۱۷} شکل ۶ و جدول ۲ ابعاد اصلی SUT-2 را نشان میدهنـد. در شـکل ۷ جانمـایی تجهیـزات زیرسـطحی SUT-2 نشان داده شده است.

*. نشر*یه *مہنــدسـ*ی د*ریــا*



جدول ۲- ابعاد اصلی SUT-2 (میلیمتر)

1417	L	طول کل
۲۰۰	D	قطر
۲۳۵	а	طول دماغه
٧٠۶	b	طول استوانه میانی
471	c	طول دم



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.



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

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

مدل (میلیمتر)	نمونه اصلی (میلیمتر)		
۳۵۳	1417	L	طول کل
۵۰	۲۰۰	D	قطر
۵۹	۲۳۵	а	طول دماغه
178	۲۰۶	b	طول استوانه ميانى
۱۱۸	471	c	طول دم



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 ب- سطوح کنترل بر روی ارابه کنترل 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 ^۵ ۱۰ 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.

با توجه به شکل ۴ و توضیحات ارائه شده، ضریب جرم افزوده X_{u} با استفاده از این نتایج قابل محاسبه میباشد. نتایج تست، مقدار عددی این ضریب برای مدل را $X_{u} = 0.017 \ (kg)$ 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 ۲۰ درجه) را در شتابهای مختلف نشان می دهد. 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_v با استفاده از آن محاسبه نمود. نتایج تست، مقدار عددی این ضریب برای مدل را $(kg) = 2_w = 0.682$ (



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

سال هفتم/ شماره ۱۴/ پاییز و زمستان ۹۰

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^{۱۸} 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 أنها

اختلاف (/)	REMUS	SUT-2	ضریب ب <i>ر</i> بعد	
١/٨٣	-•/••• \ \$\$	-•/•••YA•	X'_{i}	٨.
۶/۹۰	-•/•۲٩	-•/•٣١	Y'_{v}	رم افزو
۶/۹۰	-•/•۲٩	-•/•٣١	Z'_{w}	ŝ
۴/۰۷	-•/••٣۴۴	-•/••٣٣•	$X'_{u u }$	
۴/۰۰	-•/ \••	-•/• 9۶	$Y'_{v v }$	
۴/۰۰	-•/\••	-•/• 9۶	$Z'_{w w }$	فكراي
***	•	-•/•••1۴	X'_{uv}). متر
***	•	-•/•••1۴	X'_{uw}	يى ھىل
٣/٠٠	•/••)••	•/••١•٣	$X'_{v v }$	رودينام
٣/٠٠	•/••)••	•/••١•٣	$X'_{w w }$	کی
۴/۰۷	-•/••٣۴۴	-•/••٣٣•	Y'_{uv_d}	
۴/۰۷	-•/••٣۴۴	-•/••٣٣•	Z'_{uw_d}	

٣٩

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



شکل ۱۴- نمودار نیروی درگ 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 بـدون بعـد لیفـت ودرگ سـطوح کنتـرل زیرسـطحی SUT-2 بـر حسـب زاویـه حملـه را نشـان میدهد. نتایج حاصل از تست با نتایج تسـت آزمایشـگاه

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 2-SUT پس از اتمام مرحله طراحی
 جزئیات و بررسیهای هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی،
 مکانیکی و الکترونیکی وارد مرحله ساخت گردید. شکل
 مکانیکی و اقعی زیرسطحی2-SUT را در کنار مدل
 آن نشان میدهد.



 $\frac{1}{4}$ شکل ۱۷-زیرسطحی SUT-2 و مدل

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. 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 طراحی وسیلهای در ابعاد کوچکتر انجام میگیرد. با توبط وسیلهای در ابعاد کوچکتر انجام میگیرد. با دقت روش و اندازه گیریهای صورت گرفته قابل قبول بوده و میتوان از روش فوق در ارزیابی هیدرودینامیکی زیرسطحیهای مختلف استفاده کرد.

کليد 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 (سمت راست وسيله) 14- Starboard 15- Steady State 16- Myring, 1976 17- Jun, B.-H.,et al. 2008 18- REMUS, 2009



شکل ۱۸ - زیرسطحی SUT-2 در حال به آباندازی

بهدلیل محدودیت دینامومتر حوضچه کشش در اندازه گیری 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- جمع بندی و نتیجه گیری

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 می گیرند. فرایب هیدرودینامیکی وسیلههای زیرسطحی معمولاً می گردند. به منظور مطالعه و بررسی هیدرومکانیکی وسیلههای دریایی بجای تحلیل کامل آن توسط

	دريا.	ہنےدسے	نشریه م
--	-------	--------	---------

فهرست علاتم واحتصارات	رات	اختصا	9	علائم	ست	فهر
-----------------------	-----	-------	---	-------	----	-----

مؤلفه سرعت دورانى	rad	0
در راستای محور y	S	Ч
مؤلفه سرعت دوراني	rad	r
در راستای محور Z	S	I
مكانهاي اويلري	т	x,y,z
زواياي اويلري	rad	, $oldsymbol{ heta}$, $oldsymbol{\psi}$ ϕ
ماتریس جرم جسم		М
صلب		RB
ماتريس جرم افزوده		M_{A}
ماتریس گریز از مرکز		
و کريوليس		C(v)
هيدروديناميكي		
ماتریس میرایی		D(v)
هيدروديناميكي		- ()
ماتريس نيروها و		$g(\eta)$
ممانهای بازگرداننده		0 (1)
ماتريس نيروها و		au
ممان،های جلوبرنده	1	
جرم واقعى وسيله	kg	т
موقعيت مركز جرم	т	, $y_G x_G$
ممانھای اینرسی	$kg - m^2$	$I_{y} I_{xz}$ $I_{yz} I_{yx}$ $I_{zy} I_{zx}$
		Ι,
ضرایب جرم افزوده،		<i>I</i> _z
ضرایب جرم افزوده، به عنوان مثال X_u جرم افزوده در راستای محور X به راستای محور X یعنی <i>لا</i> است.	kg kg/m	$\begin{array}{c} \boldsymbol{I}_{z} \\ \boldsymbol{X}_{u}, \boldsymbol{Y}_{v} \\ \boldsymbol{Z}_{w} \\ \boldsymbol{K}_{\dot{p}}, \boldsymbol{M}_{\dot{q}} \\ \boldsymbol{N}_{\dot{r}} \end{array}$
ضرایب جرم افزوده، به عنوان مثال X_u به عنوان مثال جرم افزوده در راستای محور X به دلیل شتاب در راستای محور X یعنی لا است.	kg kg/m	
\dot{w}_{ll} w	$kg \\ kg \\ m \\ N \\ N - m$	$ \begin{array}{c} X_{ii}, Y_{ij} \\ Z_{ij} \\ Z_{ij}, M_{ij} \\ N_{i} \\ X_{d}, Y_{d}, Z_{d} \\ \\ X_{d}, Y_{d}, Z_{d} \\ \\ K_{d} \\ M_{d} \\ N_{d} \\ \end{array} $

عدد فرود	-	Fn
سرعت وسيله	<u>m</u>	V
شتاب گرانش زمین	$\frac{s}{\frac{m}{2}}$	g
	<i>s</i> ²	
قط میںاہ		
لعروسيه	m	D En
عدد فرود حجمی	-	Im_{∇}
حجم وسيله	m^3	∇
(جابجایی)		D
عدد رينولدز	-	R_{e}
لزجت سينماتيكي	$\frac{m^2}{s}$	V
عدد کاویتاسیون	-	σ
فشار	ра	p
فشار بخار اشباع	pa	p_{v}
چگالی	$\frac{kg}{m^3}$	ρ
کشش سطحی	$\frac{kg}{s^2}$	γ
مؤلفه نیرو در راستای محور x	Ν	Х
مؤلفه نیرو در راستای محور y	Ν	Y
مؤلفه نیرو در راستای محور z	Ν	Z
مؤلفه ممان در راستای محور X	N-m	К
مؤلفه ممان در راستای محور y	N-m	М
مؤلفه ممان در راستای محور z	N-m	Ν
مؤلفه سرعت در راستای محور X	$\frac{m}{s}$	u
مؤلفه سرعت در راستای محور y	$\frac{m}{s}$	V
مؤلفه سرعت در راستای محور Z	<u>m</u>	W
مؤلفه سرعت دورانی در راستای محور X	rad s	р

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.

وزن واقعى وسيله	Ν	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	$\frac{m}{s^2}$,v ,w u
زیرضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال _{الا} لا میرایی در جهت x به دلیل حرکت در جهت x با سرعت ثابت u است.	$\frac{kg}{m}$	$\begin{array}{c} X_{u u } \\ X_{uv}, X_{uw} \\ X_{v v }, X_{w w } \\ Y_{uv_d}, Y_{v v } \\ Z_{uw_d}, Z_{w w } \end{array}$
ض یب در گ	_	C_{D}
J 77.7-		5
ضريب ليفت	-	<i>C</i> _{<i>L</i>}
ضريب ليفت نيرو	- N	
ضریب لیفت ضریب لیفت نیرو وسیله، سطح رو به جریان	$\frac{1}{N}$	
ضریب لیفت ضریب لیفت نیرو وسیله، سطح رو به جریان زاویه حمله	- N m ² rad	
ضریب لیفت ضریب لیفت نیرو وسیله، سطح مو به جریان زاویه حمله ضرایب رگرسیون مرتبه دو ضریب درگ بر حسب زاویه حمله	- N m ² rad	
خریب لیفت ضریب لیفت نیرو وسیله، سطح موضی جریان زاویه حمله ضرایب رگرسیون مرتبه دو ضریب درگ بر حسب زاویه حمله ضریب درگ در حرکت عرضی	- N m ² rad	$\frac{C_L}{F}$ A α a,b,c $(C_D)_{Transverse}$
خریب ریفت ضریب لیفت نیرو وسیله، سطح موضی جریان زاویه حمله ضرایب رگرسیون ضرایب رگرسیون حمله حمله حرکت عرضی ضریب لیفت در حرکت عرضی	- N m ² rad -	$ \frac{C_L}{F} $ $ A $ $ \alpha $ $ a,b,c $ $ (C_D)_{Transverse} $ $ (C_L)_{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",