ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی AUV با استفاده از مدل سازی مانورهای پایه در تونل آب

نوروزمحمد نوری [۱*]، کریم مصطفی پور[۲]، یوسف حبیبی سوها [۳] ، سید حسن حسن پور [٤]

[۱] استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ mnouri@iust.ac.ir
[۲] دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ mostafapour@alumni.iust.ac.ir
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ habibisooha@mecheng.iust.ac.ir
[۴] کارشناس ارشد، دانشگاه علم وصنعت ایران؛ h_hassanpour@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۴

کلمات کلیدی:
مکانیزم حرکت صفحه ای
مشتقات هیدرودینامیکی
تونل آب
تست‌های دینامیکی و استاتیکی

چکیده

ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی وسایل زیرسطحی خودکنترل در توسعه آن‌ها نقش بسزایی دارند. مرسوم‌ترین روش تخمین این مشتقات، انجام تست‌های مدل کپتیو از قبیل تست‌های مستقیم‌الخط و تست‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای در تانک‌های کشش می‌باشد. هدف از این مقاله ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی وسایل زیرسطحی خودکنترل با استفاده از مدل سازی مانورهای پایه در تونل آب می باشد. اندازه‌گیری نیرو و گشتاورها در تست های مدلی با یک بالانس شش مولفه‌ای انجام شده است. پیاده سازی مانورهای پایه مورد نیاز جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی با استفاده از یک سیستم طراحی شده انجام شده است. با انجام تست های متفاوت، محدوده مناسب انتخاب پارامترها در تونل جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی ارایه شده است. همچنین با انجام این تست ها در تونل آب، خطای های ناشی از محدودیت دروه زمانی انجام تست ها و اثرات امواج سطحی در تانک کشش برای وسایل زیرسطحی خودکنترل باکاربرد در آبهای عمیق حذف می شود.

Investigation of Hydrodynamic Derivatives of an AUV Based on the Water Tunnel Testing Maneuvers

Norouz Mohammad Nouri[1*], Karim Mostafapour[2], Yousef Habibi Sooha[3], Seyyed Hassan Hassanpour[4]

[1] Professor of Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology; mnouri@iust.ac.ir
[2] PhD of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; mostafapour@iust.ac.ir
[3] MSc Student of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; habibisooha@mecheng.iust.ac.ir
[4] MSc of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; h_hassanpour@mecheng.iust.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Aug. 2016
Accepted: 4 Dec. 2016

Keywords:
Hydrodynamic Derivatives
planar motion mechanism
water tunnel
static and dynamic tests

ABSTRACT

Coefficients or hydrodynamic derivatives of autonomous underwater vehicles play a key role in their development. The most popular way for the estimation of coefficient is to implement captive model tests such as straight line tests and planar motion mechanism tests in towing tanks. In this paper, investigation of hydrodynamic derivatives was performed based on the water tunnel maneuvers. Forces and moments are measured by a six-component strain gauge balance. The developed apparatus was used for performing the planar motion mechanism tests of the water tunnel. By conducting such tests in a water tunnel, the appropriate range of parameters to estimate the hydrodynamic derivatives was provided. Also, by doing such tests in water tunnel, errors related to the time limitation of tests and the effects of surface waves in towing tank of autonomous underwater vehicles, applied in deep seas, are eliminated.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

۱ - مقدمه

تمایل به تحقیق و توسعه در زمینه وسایل زیرسطحی خودکنترل (AUV)[۱] به دلیل کاربرد این وسایل در اکتشافات دریایی، بررسی هیدروگرافی و عملیات دفاعی در سالهای اخیر افزایش یافته است. مشخصات کنترل و پایداری AUV ها بوسیله حل کردن معادلات مانورینگ حرکت فهمیده می شود. در این معادلات نیروها و گشتاورها هیدرودینامیکی با استفاده از بسط تیلور بصورت تابعی از پارامترهای سینماتیکی AUV و یک سری ثوابت تحت عنوان ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی بیان می شوند. این ثوابت به دو دسته مشتقات ناشی از سرعت و شتاب حرکت AUV تقسیم بندی می شوند. مشتقات مربوط به سرعت و شتاب، نیروها و گشتاوری های هیدرودینامیکی را به ترتیب به سرعت و شتاب زوایه ای و خطی AUV مربوط می کنند. تخمین دقیق و قابل اعتماد این مشتقات برای شبیه سازی عملکرد دینامیکی AUV مهم می باشند. قابل اعتمادترین روش برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی استفاده از روشهای تجربی می باشد. مرسوم‌ترین روش تخمین این مشتقات، انجام تست‌های مدل کپتیو[۲] از قبیل تست‌های مستقیم‌الخط[۳] و تست‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM) [۴] در تانک‌های کشش[۵] می‌باشد. [۱،۲]. این تست ها شامل تست های مستقیم خط، تست های بازوی چرخان[۶] و تست های مکانیزم حرکت صفحه ای هستند. تست های استاتیکی مستقیم الخط جهت تخمین مشتقات خطی و غیر خطی ناشی از سرعت خطی کاربرد دارند. در بین تست های مدل دینامیکی تست های هارمونیک PMM بیشترین مزیت به دلیل قابلیت فراهم آوردن داده های مناسب جهت تخمین همزمان مشتقات وابسته به سرعت و شتاب را دارند.

در تست‌های PMM، مدل در صفحه افقی با مدهای مختلف حرکت، نوسان می‌کند و همزمان با حرکت در صفحه افقی با سرعت ثابت در طول تانک کشیده می‌شود. در تست‌های PMM تانک کشش، حرکت اسوی خالص[۷] جهت تخمین مشتقات ناشی از سرعت و شتاب خطی و حرکت یاو خالص[۸] جهت تخمین مشتقات ناشی از سرعت و شتاب زاویه‌ای کاربرد دارند. ازنظر تاریخی اولین بار هورن و والینسکی[۹] [۳] یک جفت لنگ[۱۰] با قطر ۴۰ سانتی‌متر برای تولید حرکت‌های اسوی و یاو خالص مدل کشتی کپتیو در برلین استفاده کردند. بعد از آن‌ها گتلر و گودمن[۱۱] [۴] کلمه PMM برای نام‌گذاری نوسانگر لنگ لغزنده با قطر inch ۲ که برای تست‌های AUV در DTMB[۱۲] طراحی شده بود استفاده کردند [۵-۷]. در سال‌های اخیر تخمین تجربی مشتقات هیدرودینامیکی بر پایه تست‌های PMM [۸-۱۰] و همچنین تأثیرپذیری آن‌ها از مشخصات وسیله [۱۱-۱۶] موردتحقیق محققان متعددی بوده است. انجام تست های PMM برای AUV ها در تانک کشش دارای چندین محدودیت می باشد. از معایب این تست ها برای AUV باکاربرد در آبهای عمیق، دروه زمانی محدود برای انجام تست ها و اثرات امواج سطحی روی پامتراهای اندازه گیری را می توان نام برد. طول محدود تانک کشش فرکانس های تست های حرکت نوسانی را محدود می کند. هر دو سرعت های پایین و فرکانس های بالا جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی مورد نیاز می باشد. محدودیت زمان تست باعث کاهش دقت و افزایش زمان برنامه تست می شود. برای غلبه بر محدودیت دوره زمانی تست ها DSTO[۱۳] با همکاری AMERC[۱۴] یک نوع PMM را برای کانال آب چرخشی (CWC)[۱۵] توسعه داده اند [۱۷]. با توجه به اینکه در کانال آب ، جریان آب با فرض یکنواختی در مدت زمان تست بطور پیوسته از روی مدل عبور می کند. محدودیت زمانی برای تست وجود نخواهد داشت. از معایب این تست ها اثرات امواج سطحی، محدودیت ایجاد سرعت یکنواخت در مدت زمان تست می باشد. همچنین غیریکنواختی مکانی سرعت و قابل کنترل نبودن سطح توربولانس در جریان ورودی مشکلات بزرگی روی تست های PMM در CWC تحمیل می کند. برای غلبه بر این مشکلات تونل آب می تواند به عنوان یک گزینه مناسب مطرح باشد. تونل آب یکی از تجهیزات تجربی می باشد که برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی مدل های AUV کاربرد دارد. در تونل های آب به جای حرکت مدل در تانک کشش، جریان آب در یک مدار بسته سیرکوله می شود. به دلیل احاطه جریان توسط دیواره های تونل آب، از اثرات امواج سطحی صرف نظر می شود. ابعاد تونل آب نسبت به تانک کشش کوچک می باشد. بنابراین مدل های مقیاس شده کوچکتری نسب به تانک کشش و CWC استفاده می شود. از طرفی در مکانیزم های PMM تانک کشش از دو نوسانگر هارمونیک که یکی در جلو و دیگری در عقب نسبت به مرکز جرم مدل AUV قرار گرفته اند استفاده می شود. بنابراین تاثیری پذیری الگوی جریان مدل AUV از نوسانگر ها عملا استفاده از مکانیزم مشابه در تانک کشش و CWC را غیرممکن می سازد.

هدف از این مقاله ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی AUV با استفاده از مدل سازی مانورهای پایه در تونل آب می باشد. در این مقاله ابتدا معادلات ریاضی مانورهای مستقیم الخط و PMM در تونل آب جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی AUV ارایه شده است. در بخش دوم تجهیزات توسعه داده شده برای تونل آب جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی تشریح شده است. نهایتا نتایج مربوط به ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی یک مدل AUV در تونل آب ارایه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

۲ - مدل AUV و انواع تست ها

به منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک وسیله AUV می-بایست معادلات حاکم بر دینامیک جسم صلب آن را استخراج کرد [۱۸]. زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ یک AUV با طراحی بهینه می-باشد که بمنظور انجام کارهای تحقیقاتی در دانشگاه علم و صنعت ایران طراحی و ساخته شده است. هیدرولب ۵۰۰ بوسیله چهار رادار قرار گرفته شده به صورت صلیبی شکل در انتهای آن کنترل می شود. هیدرولب ۵۰۰ در شکل ۱ نشان شده است. برای توصیف معادلات دینامیکی مدل از دو سیستم مختصات ثابت فضا و ثابت به بدنه استفاده می شود. با فرض حرکت جسم فقط در صفحه X_B-Z_B معادلات حرکت به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۹] :

$$X = mu \qquad (۱)$$

$$Z = mw + m.x_G\dot{q} + (m.U)q \qquad (۲)$$

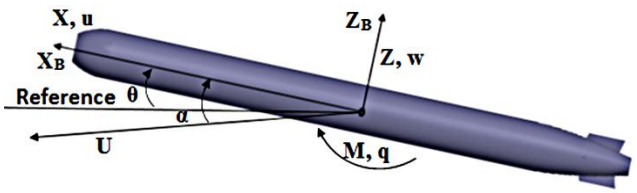
$$M = (m.x_G)\dot{w} + (I_y)\dot{q} + (m.x_G.U).q \qquad (۳)$$

w و $\dot{w}$ سرعت و شتاب خطی، q و $\dot{q}$ به ترتیب سرعت و شتاب زاویه‌ای می‌باشند. U سرعت اولیه، m جرم و I_{yy} اینرسی قطری حول محور اصلی قرارگرفته در مرکز گرانش AUV می‌باشد. X، Z و M نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر جسم در دستگاه راست‌گرد را نشان می‌دهد. این نیروها و گشتاورها به نیروها و گشتاورهای هیدرو استاتیک، کنترل، پیشرانش و هیدرودینامیک تقسیم‌بندی می‌شوند. در معادلات دینامیکی نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به کمک بسط تیلور به‌صورت تابعی از پارامترهای سینماتیکی و یک سری ثوابت تحت عنوان ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی می‌شوند. نیروی هیو و گشتاور پیچ ناشی از تأثیرات هیدرودینامیکی جریان برابر است با:

$$Z_H = Z_w w + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{w|w|}w\,|w| + Z_q q + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{q|q|}q\,|q| \qquad (۴)$$

$$M_H = M_w w + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{w|w|}w\,|w| + M_q q + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{q|q|}q\,|q| \qquad (۵)$$

مشتقات Z_w، $Z_{w|w|}$، M_w و $M_{w|w|}$ با استفاده از تست‌های مستقیم‌الخط و مشتقات $M_{\dot{w}}$، M_w، $Z_{\dot{w}}$، Z_w، $M_{\dot{q}}$، M_q، $Z_{\dot{q}}$، Z_q با استفاده از تست‌های PMM قابل تخمین می‌باشند.



شکل ۱ – سیستم مختصات

۲-۱- تست‌های مستقیم‌الخط

در تست‌های مستقیم‌الخط (استاتیکی) مدل تحت زاویه مشخص نسبت به امتداد جریان قرار دارد. در تست‌های مستقیم‌الخط شتاب خطی و زاویه‌ای برابر با صفر می‌باشد؛ بنابراین معادلات (۶) و (۷) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$Z'_H = Z'_w w' + Z_{w'|w'|}w'|w'| \qquad (۶)$$

$$M_H{}' = M'_w w' + M'_{w'|w'|}w'|w'| \qquad (۷)$$

$w' = \sin\alpha = \frac{w}{U}$، Z'_H و M'_H فرم بی‌بعداز Z_H و M_H می‌باشند که به ترتیب به‌وسیله $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$ و $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$ بی‌بعد شده‌اند. L مشخصه طولی مدل هیدرولب ۵۰۰، U سرعت جریان و ρ چگالی جریان می‌باشد. با استفاده از تست‌های استاتیکی، مشتقات ناشی از سرعت خطی قابل‌محاسبه است.

۲-۲- تست‌های دینامیکی

مانورهای تست PMM به دو حرکت هیو خالص و پیچ خالص تقسیم‌بندی می‌شوند. در حرکت هیو خالص، همانطورکه شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک حرکت نوسانی با دامنه و فرکانس ثابت به مدل تحمیل می‌گردد. این حرکت از اعمال یک حرکت نوسانی در راستای محور z و یک سرعت پیشروی ثابت U تشکیل شده است. با فرض اینکه مدل یک مسیر سینوسی را طی کند، زاویه پیچ θ، سرعت زاویه‌ای q و شتاب زاویه‌ای $\dot{q}$ در تمام زمان‌ها صفر می‌باشد. جابجایی عمودی z، سرعت عمودی خطی w و شتاب عمودی خطی $\dot{w}$ برای حرکت هیو خالص، به ترتیب به‌صورت زیر بیان می-شوند:

$$\begin{aligned} z &= z_o \sin\omega t \\ w &= \dot{z} = z_o\omega\cos\omega t \\ \dot{w} &= \ddot{z} = -z_o\omega^2\sin\omega t \end{aligned} \qquad (۸)$$

z_o دامنه حرکت و ω فرکانس حرکت هیو خالص است. با توجه به شرایط حرکت هیو خالص($\theta = q = \dot{q} = 0$) و صرف‌نظر از اثرات غیرخطی، معادلات (۴) و (۵) برای این نوع حرکت به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$Z_H = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_w w \qquad (۹)$$

$$M_H = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_w w \qquad (۱۰)$$

با جایگزینی z، w و $\dot{w}$ از رابطه ۱۰ در رابطه ۸ و ۹ می‌توان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

نوشت:

$$Z_H = Z_{\dot{w}}\left(-z_o\omega^2 \sin\omega t\right) + Z_w\left(z_0\omega\cos\omega t\right) \quad (۱۱)$$

$$M_H = M_{\dot{w}}\left(-z_o\omega^2 \sin\omega t\right) + M_w\left(z_0\omega\cos\omega t\right) \quad (۱۲)$$

در تست پیچ خالص(شکل ۲)، حرکت از اعمال یک حرکت نوسانی در راستای محور z، یک سرعت پیشروی ثابت U و همچنین از یک حرکت نوسانی برای تغییرات زاویه تشکیل شده است. سرعت در راستای محور x برابر U و در راستای محور z در مختصات اینرسی برابر $\dot{z}'$ می‌باشد. مطابق شکل ۲ برآیند سرعت برابر w خواهد بود که بر راستای حرکت AUV مماس است. به‌عبارت‌دیگر در این حرکت زاویه‌ی پیچ بازمان تغییر می‌کند درحالی‌که زاویه‌ی حمله‌ی مرکز گرانش در تمام مدت برابر صفر می‌باشد. این حرکت می‌تواند به‌صورت یک حرکت پیچ خالص در دستگاه مختصات بدنه مشاهده شود. در این شرایط سرعت خطی عمودی و شتاب خطی عمودی برابر صفر خواهند بود. برای پیچ خالص می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_o \sin\omega t\\ q &= \dot{\theta} = \theta_o\omega\cos\omega t\\ \dot{q} &= \ddot{\theta} = -\theta_o\omega^2\sin\omega t\end{aligned} \quad (۱۳)$$

برای حرکت پیچ خالص ($w = \dot{w} = 0$) معادلات (۴) و (۵) به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$Z_H = \left(Z_{\dot{q}}\right)\dot{q} + \left(Z_q\right)q \quad (۱۴)$$

$$M_H = \left(M_{\dot{q}}\right)\dot{q} + \left(M_q\right)q \quad (۱۵)$$

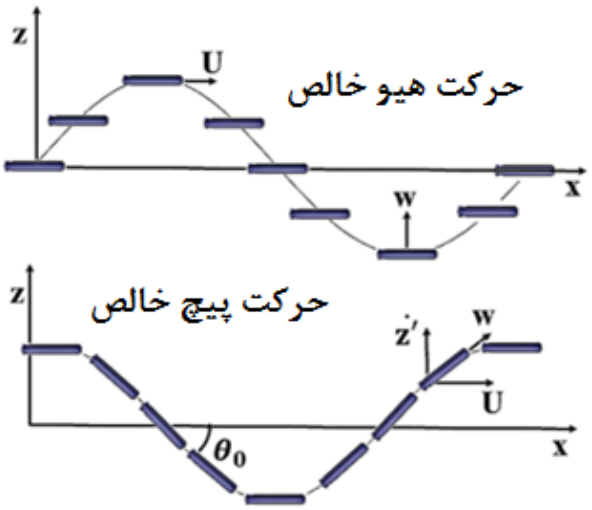
با جایگذاری θ، q و $\dot{q}$ از رابطه (۱۳) در معادلات (۱۴) و (۱۵) می‌توان نوشت:

$$Z_H = \left(Z_{\dot{q}}\right)\left(-\theta_o\omega^2\sin\omega t\right) + \left(Z_q\right)\left(\theta_o\omega\cos\omega t\right) \quad (۱۶)$$

$$M_H = \left(-\theta_o\omega^2\sin\omega t\right) + \left(M_q\right)\left(\theta_o\omega\cos\omega t\right) \quad (۱۷)$$

نیروی خارجی Z_H و گشتاور خارجی M_H که در طول تست هیو و پیچ خالص اندازه‌گیری می‌شوند را می‌توان به‌وسیله آنالیز فوریه به دو مؤلفه درون فاز و خارج فاز با حرکت تقسیم نمود:

$$Z_H = Z_{in}\sin\omega t + Z_{out}\cos\omega t \quad (۱۸)$$



شکل ۲ – مانور پیچ و هیو خالص

$$M_H = M_{in}\sin\omega t + M_{out}\cos\omega t \quad (۱۹)$$

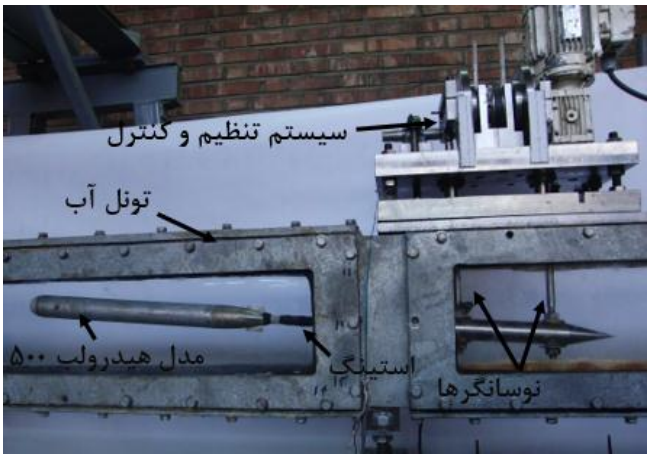
با معادل قرار دادن ضرایب توابع sin و cos در معادله (۱۸) و (۱۹) به ترتیب با معادلات (۱۱) و (۱۲) و استفاده از روش حداقل مربعات $M_{\dot{w}}$، M_w، $Z_{\dot{w}}$ و Z_w قابل تخمین می‌باشد. همچنین با معادل قرار دادن ضرایب توابع sin و cos در معادله (۱۸) و (۱۹) به ترتیب با معادلات (۱۶) و (۱۷) استفاده از روش حداقل مربعات مشتقات $M_{\dot{q}}$، M_q، $Z_{\dot{q}}$ و Z_q قابل تخمین می‌باشد.

۳- اندازه‌گیری نیرو و گشتاور

تجهیزات نصب شده در تونل آب جهت انجام تست های استاتیکی و دینامیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیستم می‌تواند انجام تست های استاتیکی شامل مستقیم خط و تست های دینامیکی شامل حرکت پیچ خالص، هیو خالص و ترکیب پیچ خالص و هیو خالص را در تونل آب فراهم کند. این سیستم برای تخمین مشتقات ناشی از سرعت، و مشتقات ناشی از شتاب قابل کاربرد است. مکانیزم *PMM* طراحی شده از سه بخش اصلی استینگ، میله‌های نوسانی استینگ و سیستم تنظیم جابه‌جایی و تغییر زاویه مدل تشکیل شده است. استینگ اتصال دهنده‌ی بین سنسور اندازه گیری و میله‌های نوسانگر می‌باشد و امکان نگهداری و جابه‌جایی و تغییر زاویه‌ی مدل را در تونل آب فراهم می‌کند. توابع حرکت مورد نیاز برای ایجاد انواع مانور توسط دو نوسان‌گر از سیستم تنظیم و کنترل به مدل انتقال پیدا می‌کند. این نوسانگرها یکی در جلو و دیگری در عقب استینگ قرار گرفته است. تغییر فرکانس های حرکت های هیو و پیچ خالص باتغییر ولتاژ تحریک کننده موتور سه فاز انجام می گیرد. آزمایش با مدل مقیاس شده ۱/۱۵ هیدرولب ۵۰۰ انجام شده است. مدل در داخل تونل آب به مکانیزم تست ثابت شده است. اندازه گیری نیروها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

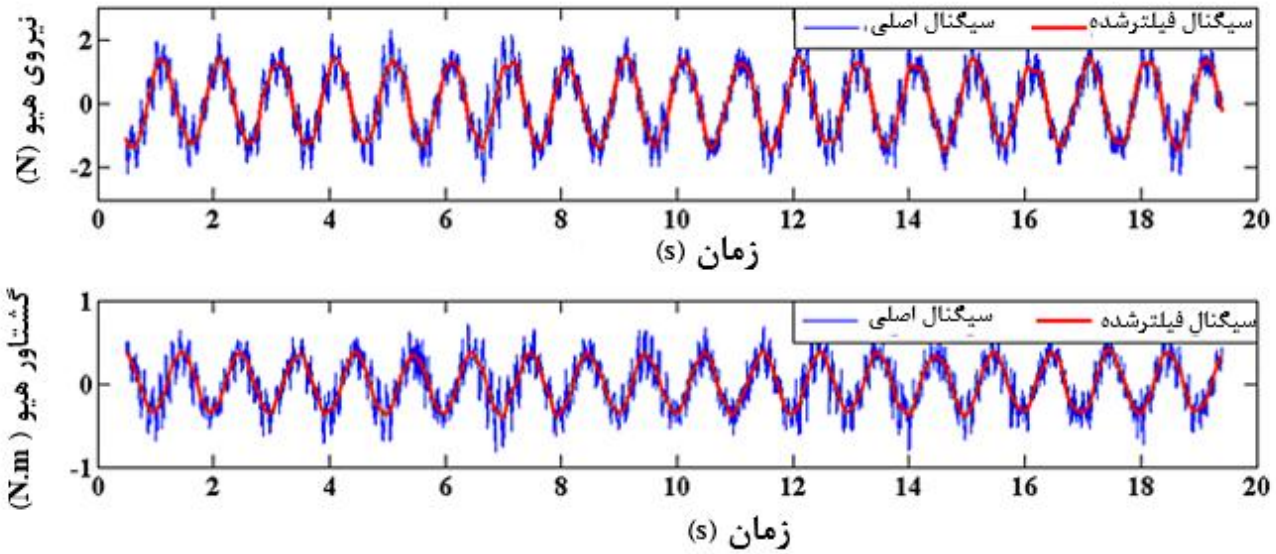
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]



شکل ۳ – تجهیزات نصب شده در تونل آب جهت انجام تست‌های دینامیکی و استاتیکی

و گشتاورها بوسیله یک بالانس شش مولفه ای قرار گرفته در داخل مدل AUV انجام می شود [۲۰]. راستای بارهای اندازه گیری توسط بالانس با راستای محورهای متصل به بدنه یکسان می باشد. بنابراین نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی در راستای مختصات ثابت به بدنه اندازه گیری می شوند. بالانس شش مولفه ای با خطای ماکزییم 0.1% بار ماکزییم (F=20 N, M=1N.m) کالیبره شده است. در تست های مستقیم الخط جهت تخمین نیروها و گشتاورهای خالص هیدرودینامیکی، اثرات نیروی گرانشی و بویانسی حذف می شوند.

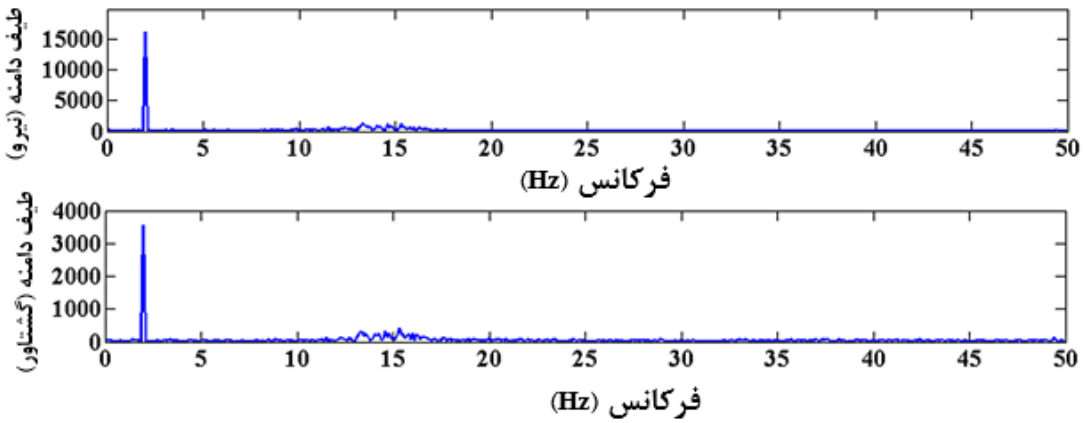
در تست های دینامیکی جهت تخمین نیروها و گشتاورهای خالص هیدرودینامیکی، اثرات گرانشی- بویانسی و اینرسی با اندازه گیری چند مرحله ای حذف می شوند. یک نمونه بارهای ثبت شده و فیلتر شده بر حسب سری زمانی برای مانور هیو خالص در شکل ۴ نشان داده شده است. در تست های تونل آب محدودیت زمانی برای انجام تست ها وجود ندارد. نمونه‌برداری نیرو و گشتاور با فرکانس Hz ۱۰۰۰ انجام می‌گیرد. بارها در بازه‌های ۲۰ ثانیه‌ای نمونه‌گیری شده اند. حذف نویز از طریق آنالیز طیف فرکانسی انجام گرفته است. تبدیل سریع فوریه (FFT) سیگنال اصلی در شکل ۵ نشان داده شده است. یک قله در فرکانس Hz ۲ در خروجی FFT سیگنال اصلی بارهای هیدرودینامیکی مشاهده می‌شود. فرکانس قله با فرکانس حرکت هیو خالص اعمال‌شده به‌وسیله مکانیزم PMM یکسان می‌باشد. در خروجی FFT قله‌های کوچک فرکانسی در محدوده Hz ۱۲-۱۷ مشاهده می‌شود. این قله‌های فرکانسی می‌تواند به‌وسیله ارتعاشات القاشده از انعطاف سیستم نگه‌دارنده و اغتشاشات جریان ناشی شود. بعد از تعیین فرکانس جداسازی نویز از سیگنال اصلی، فرکانس‌های مربوط به نویز با استفاده از فیلتر پایین‌گذر باتروث حذف شده‌اند. هر آزمایش سه بار تکرار شده است. هر آزمایش سه بار تکرار شده است. و مقادیر نیروها و گشتاورها از بین سه آزمایش میانگین گیری شده است.



شکل۴ – سگینال اصلی و فیلتر شده نیروی Z_H و گشتاور M_H برای مانور هیو خالص

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]



شکل۵ – تبدیل سری فوریه سیگنال اصلی

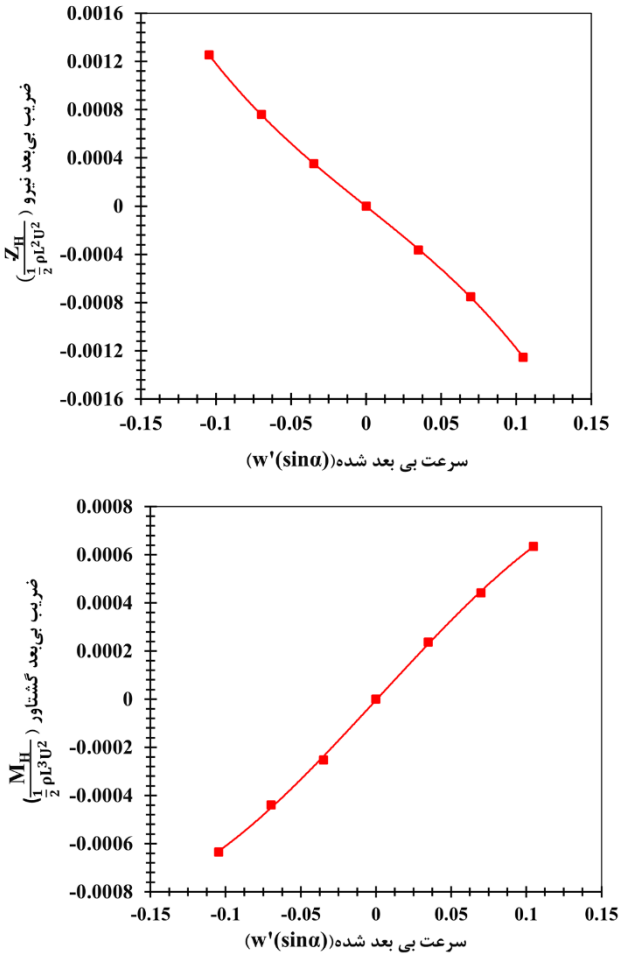
۴- نتایج ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی

۴-۱- تست های مستقیم الخط

هدف این تست ها، بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با سرعت خطی مدل در تونل آب می باشد. با استفاده از مکانیزم قرارگرفته روی تونل آب زاویه حمله مدل نسبت به جریان تغییر می‌کند. تست‌ها در زوایای پیچ از ۴- تا ۶ درجه در مراحل دو درجه-ای انجام‌شده‌اند. تمامی تست‌ها که در عدد رینولدز ۲×۱۰^{۶} انجام شده‌اند. شکل ۶ ضرایب نیروی عمودی $Z_H \Big/ \frac{\rho L^2U^2}{2}$ و گشتاور $M_H \Big/ \frac{\rho L^3U^2}{2}$ حول مرکز حجم بر حسب سرعت عمودی بی‌بعد $w'=w/U=\sin\alpha$ را نشان می‌دهد. با گذراندن معادله (۶) و (۷) به ترتیب روی داده‌های ضرایب نیرو و گشتاور در شکل۶ مقادیر مشتقات $Z'_{w'}$، $Z'_{w'|w'|}$، $M'_{w'}$ و $M'_{w'|w'|}$ تخمین زده شده‌اند. تقریب معادلات با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات انجام‌گرفته است. مؤلفه‌های خطی به‌عنوان تأثیرات جریان پتانسیل و مؤلفه‌های غیرخطی به‌عنوان تأثیرات لزجت تعریف می‌شود. مقادیر مشتقات خطی و غیرخطی مربوط به نیروی عمودی و گشتاور پیچ در جدول ۱ لیست شده‌اند.

جدول ۱ – مشتقات هیدرودینامیکی تخمین زده شده از تست های مستقیم الخط

ضرایب	مقادیر
$Z'_{w'}$	-۰/۰۱۰۹۶۲
$M'_{w'}$	۰/۰۰۵۶۵۱
$Z'_{w'\|w'\|}$	-۰/۰۰۹۹۸۳
$M'_{w'\|w'\|}$	-۰/۰۰۳۳۱۰



شکل۶ – ضریب نیروی عمودی و گشتاور پیچ حول در مختصات ثابت به بدنه برحسب سرعت بی بعد شده

۴-۲- تست های PPM

در یک مانور هیو خالص مرکز حجم مدل در یک مسیر سینوسی حرکت می‌کند و در تمام مسیر حرکت، محور طولی AUV با راستای جریان آب موازی می‌باشد؛ بنابراین نیروها و گشتاورهای اندازه‌گیری

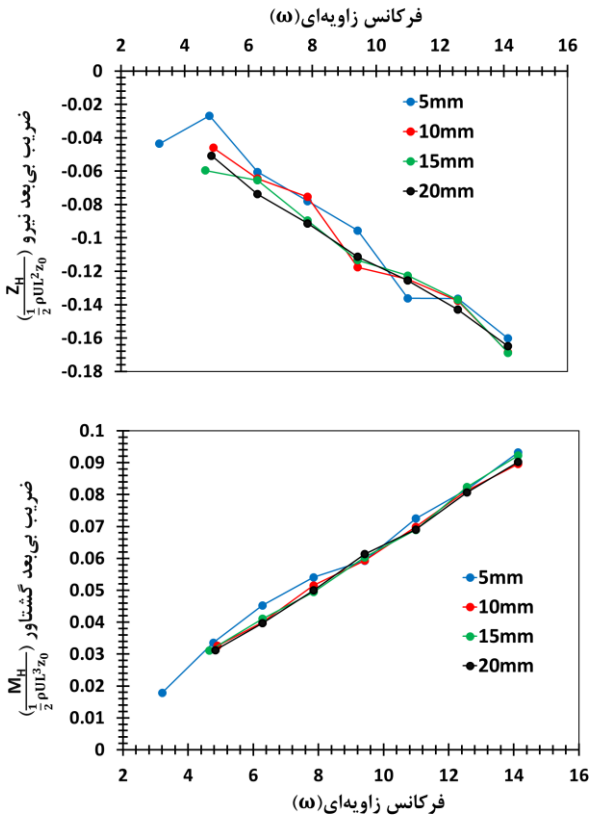
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

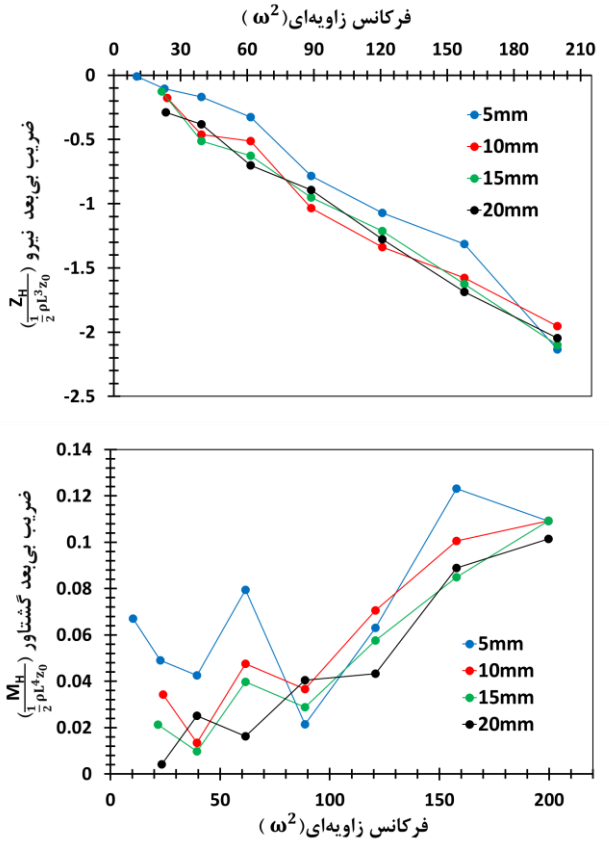
شده مستقل از حرکت دورانی می‌باشند. تست‌های هیوخالص با فرکانس‌های مختلف ۰/۵-۲/۲۵ Hz و دامنه‌های ۰/۵-۲ cm انجام شده‌اند. تست‌ها در عدد رینولدز ۲×۱۰^{۶} انجام شده‌اند. داده‌های ثبت‌شده یک سری نقاط گسسته می‌باشند.

داده‌های منتج با استفاده از بسط فوریه به‌صورت معادله (۱۸) و (۱۹) تقریب زده می‌شوند. ضرایب نیروی‌ها $Z_H \Big/ \frac{\rho L^2 U z_0}{2}$ و گشتاورهای $M_H \Big/ \frac{\rho L^3 U z_0}{2}$ ناشی از سرعت برحسب فرکانس ω برای چهار دامنه در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. ضرایب نیروها $Z_H \Big/ \frac{\rho L^3}{2} z_0$ و گشتاورهای $M_H \Big/ \frac{\rho L^4}{2} z_0$ ناشی از شتاب برحسب ω^2 در شکل ۸ رسم شده‌اند.

با افزایش دامنه، پراکندگی داده‌ها به دلیل کاهش سیگنال به نویز کاهش پیدا می‌کند و نمودارها به یک نمودار خطی میل می‌کنند. در فرکانس‌های پایین به دلیل کوچک بودن سیگنال به نویز و همچنین غیریکنواختی حرکت مکانیزم PMM پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌باشد. با افزایش فرکانس پراکندگی داده‌ها کاهش می‌یابد. این دلالت بر این دارد که مقادیر پایاتری برای مشتقات در بازه‌ای از فرکانس که ازنقطه‌نظر شبه‌پایداری و تداخل ویک اجتناب شده‌اند، به دست می‌آید. نشانه‌هایی در نمودارها وجود دارد که نیروهای مستهلک شونده در فرکانس‌های بالاتر از اثرات حافظه که منسوب به تداخل ویک هستند، تأثیر می‌پذیرند. انجام تست در فرکانس‌های بالاتر ممکن است باعث پراکندگی نتایج در دامنه‌های بالاتر شود. در نمودار مربوط به ضرایب گشتاور پیچ که از شتاب ناشی می‌شود پراکندگی داده ها زیاد می‌باشد. در این نمودار به دلیل کوچک بودن سیگنال ناشی از گشتاور مربوط به شتاب، داده‌های مربوطه از نویز تأثیر زیادی می‌پذیرند. مقدار به‌دست‌آمده برای این ضریب با خطای زیادی همراه خواهد بود. بازه تست‌ها بایستی بر اساس ناحیه عملکرد حرکت مدل انتخاب شود. این امر در اصل برای بازه دامنه‌های سرعت و شتاب است اما فرکانس و دامنه حرکت بدون در نظر گرفتن هیچ محدودیتی با یکدیگر نمی‌توانند ترکیب شوند. ترکیب‌های شتاب و سرعت‌های به‌دست‌آمده بایستی واقع‌بینانه باشد بطوریکه آن‌ها قابل‌اجرا باشند و داده‌های قابل‌تحلیلی را ارائه دهند. برای مثال در نظر گرفتن حرکات با فرکانس پایین، باعث پراکندگی داده‌های ناشی از شتاب می‌شود و انتخاب دامنه پایین باعث پراکندگی داده‌های هم‌فاز با سرعت خواهد شد. انتخاب مانور با فرکانس‌های بالاتر منجر به تأثیرپذیری نیروها از تاریخچه می‌شوند. این تأثیرپذیری باعث پراکندگی نتایج در دامنه‌های بالاتر می‌شود.



شکل۷ –ضریب نیروی عمودی و گشتاور پیچ ناشی از سرعت



شکل ۸ – ضریب نیروی عمودی و گشتاور پیچ ناشی از شتاب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

شیب معادله مرتبه اول تقریب زده‌شده برای داده‌های رسم شده نشان‌دهنده مشتقات هیدرودینامیکی بی بعد شده $Z'_{w'}$، $Z'_{\dot{w}'}$، $M'_{w'}$ و $M'_{\dot{w}'}$ می‌باشند. برای تقریب معادله مرتبه اول از روش رگرسیون حداقل مربعات استفاده‌شده است. ضرایب به‌دست‌آمده در ۰نشان داده شده است. ضرایب $Z'_{w'}$ و $M'_{w'}$ به‌دست‌آمده از مانور هیو خالص با ضرایب تخمین زده‌شده از تست‌های مستقیم‌الخط مقایسه شده است. اختلاف $Z'_{w'}$ و $M'_{w'}$ تخمین زده‌شده از هیو خالص و تست‌های مستقیم‌الخط به ترتیب ٪ ۷ و ٪ ۶ می‌باشد. ضرایب بدست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. درتست های مستقیم الخط بار های هیدرودینامیکی تابعی از شرایط سرعت جریان وردی و زاویه حمله می باشند. در تست های مانور هیو خالص، بارهای هیدرودینامیکی تابعی از سرعت ورودی جریان و دامنه و فرکانس حرکت نوسانی می باشد. اختلاف از مقادیر $Z'_{w'}$ و $M'_{w'}$ بدست آمده از دو روش می تواند به دلیل وجود اثرات غیر خطی متفاوت از زاویه حمله در تست های استاتیکی و دامنه و فرکانس حرکت نوسانی در تست های دینامیکی باشد.

جدول ۲- مشتقات هیدرودینامیکی تخمین زده شده از مانور هیو خالص

ضرایب	مقادیر	اختلاف (٪)
$Z'_{w'}$	-۰/۰۱۱۷۴۱۷	۷/۱
$Z'_{\dot{w}'}$	۰/۰۱۰۳۴۱۵	
$M'_{w'}$	۰/۰۰۵۹۵۹	۵/۵
$M'_{\dot{w}'}$	۰/۰۰۶۴۱۰	

۵ - نتیجه گیری

در این مقاله مشتقات هیدرودینامیکی AUV با استفاده از مدل سازی مانورهای پایه در تونل آب ارزیابی شده است. مقایسه نتایج تست های استاتیکی با دینامیکی نشان می دهد مدل سازی تجربی مانورهای پایه جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی با استقاده از سیستم طراحی شده برای تونل قابل قبول می باشد. با استفاده از نتایج بدست آمده می توان محدوده مناسب پارامترهای تنظیم مانورهای پایه را جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی AUV اتنخاب کرد. قابلیت انجام این تست ها در تونل آب، خطای های ناشی از دروه زمانی محدود انجام تست ها و اثرات امواج سطحی روی پامتراهای اندازه گیری در تانک کشش را برای AUV باکاربرد در آبهای عمیق حذف می کند. جایگزینی ارزیابی مشتقات هیدرودینامیکی در تونل آب به جای تانک کشش می تواند منجر به کاهش خطاهای ناشی از تاثیرات تداخلی استینگ روی الگوی جریان شوند.

کلید واژگان

1- autonomous underwater vehicle
2- captive model
3- straight line
4- Planar Motion Mechanism
5- towing tank
6- rotating arm
7- pure sway
8- pure yaw
9- Horn and Walinski
10- crank
11- Goodman and Gertler
12- David Taylor Model Basin
13- Defense Science and Technology Organization
14- Australian Maritime Engineering Cooperative Research Centre
15- circulating water cannel

۶- مراجع

1- Constock, J. P., (1967), *Principles of naval architecture*, SNAME, New York.
2- ITTC RECOMMENDED PROCEDURES, (2002), *Maneuverability-captive model test procedures*, Proceedings of 23rd ITTC.14.
3- HORN, F., WALINSKI, E., (1959), Research *on Spiral Maneuvers and Course Stability of Ships*, Vol. 6, p. 9-33.
4- Gertler, M. and Hagen, G. R., (1967), *Standard Equations of Motion for Submarine Simulation*, Naval Ship Research and Development Center,
5- Rhee, K., Yoon, H., Sung, Y., Kim S. and Kang, (2000), J., *International Workshop on Ship Manoeuvrability-25 Years CPMC*, HSVA, Hamburg, Germany, 10-11 October.
6- Guo, J. and Chiu, F., (2001), *Maneuverability of a Flat-Streamlined Underwater Vehicle*, Proceedings of the IEEE, Vol. 1, p. 897.
7- Ankush, K. and Krishnankutty, P., (2012), *Design Options for Dynamic Captive Ship Model Test Facility*, International Conference on Technology of the Sea, Visakhapatnam, India, 6-8 December.
8- Avila, J. P. J., Adamowski, J. C., (2011), Experimental *Evaluation of the Hydrodynamic Coefficients of a Rov through Morison's Equation*, Ocean Engineering, Vol.38, p. 2162–2170.
9- Fan, S. B., Lian, L., Ren, P. and Huang, G. L., (2012), *Oblique towing test and maneuver simulation at low speed and large drift angle for deep sea open-framed remotely operated vehicle*, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, p. 280-286.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]

10- Julca Avila, J., Nishimoto, K., Adamowski, J. C. and Mueller Sampaio, C., (2012)., *Experimental investigation of the hydrodynamic coefficients of a remotely operated vehicle using a planar motion mechanism*, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 134, p. 021601.1-021601.6.

11- Zhang, X. G and Zou, Z.J., (2013*), Estimation of the hydrodynamic coefficients from captive model test results by using support vector machines*, *Ocean Engineering*,Vol.73 ,p.25–31.

12- Krishnankutty, P., Anantha S.V., Roni, F. , Prabhasudan, N. P. and Sudarsan, K., (2014), *Experimental and Numerical Studies on an Underwater Towed Body*, Proceedings of the ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA. June 08-13.

13- Rhee, K. P., Yoon, H. K. , Sung, Y. J. , Ahn, K. S. ,and Kang, J. N., (2000), *Experimental Study on the Effect of the Appendage Shape of Submersible on Hydrodynamic Coefficients*, the 3rd Seminar on Naval Weapon Systems Development, Chinhae (Korea), Jun.

14- Williams, C.D., Curtis, T.L., Doucet, J.M., Issac, M.T. and Azarsina, F., (2006), *Effects of Hull Length on the Hyrodynamic Loads on a Slender Underwater during Manoeuvres*, In Oceans'06 MTS/IEEE Conference, Boston, USA.

15- Azarsina, F., C.D. Williams, Issac, M.T., (2008), *Modelling The Hydrodynamic Sway Force Exerted On The Bare-Hull Of An Axis-Symmetric Underwater Vehicle In Lateral Acceleration Manoeuvres*, OCEANS.

16- . Heron, A., Woods, A., Anderson, B., (2000), *Determination of the Maneuvering Coefficients for a Triton ROV in a Circulating Water Channel*", AMECRC Report.

17- Fossen, T. I., (1994), *Guidance and control of ocean vehicles, Second Edition*, John Wiley and Sons Ltd., New York.

18- Phillips, A., Furlong, M., Turnock, S.R., (2007), *Virtual Planar Motion Mechanism Tests of the Autonomous Underwater Vehicle Autosub*, STG-Conference / Lecture day "CFD in Ship Design", Institute M-8 of Hamburg University of Technology.

19- Cyran, F.B., (1981), *Sting Interference Effects on the Static, Dynamic, and Base Pressure Measurements of the Standard Dynamics Model Aircraft at Mach Numbers 0.3 through1.3*, AEDC-TR-81-3, August.

20- Nouri, N.M., Mostafapour, K., Kamran, M., Bahadoori, R., (2014), *Design methodology of a six-component balance for measuring forces and moments in water tunnel tests*, Measurement, Vol. 58, p. 544–555.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.9.5]