توسعه مدل عددی-نیمه تجربی جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی یک AUV

نوروزمحمد نوری[۱*]، کریم مصطفی پور[۲]، سیدحسن حسن‌پور[۳]

[۱] استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، mnouri@iust.ac.ir
[۲] دانشجوی دکترا مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، mostafapour@iust.ac.ir
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، h_hassanpour@mecheng.iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
مشتقات هیدرودینامیکی
دینامیک سیالات محاسباتی
روش عددی-نیمه تجربی
تست PMM

چکیده

افزایش استفاده از وسایل زیرسطحی خودکنترل منجر به ایجاد حساسیت بیشتری در طراحی آن‌ها شده است. موضوع اکثر مطالعات طراحی زیرسطحی‌ها روی بحث کاهش درگ، فرمانپذیری مناسب و پایداری آن‌ها بوده است. طراحی مناسب و پیش‌بینی رفتار این وسایل مستلزم تخمین دقیق بارها از مشتقات هیدرودینامیکی مربوط به آن‌ها می‌باشد. در این مقاله مشتقات هیدرودینامیکی زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ با استفاده از ترکیب روش عددی و نیمه تجربی تخمین زده‌شده است. در این روش ابتدا مشتقات هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی با اعمال حرکات نوسانی اجباری هیو و پیچ خالص با استفاده از یک مدل عددی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی تخمین زده شده است و سپس به کمک فرمول‌های نیمه تجربی مقادیر مشتقات هیدرودینامیکی مربوط به بالک‌ها اضافه گشته است. به‌منظور اعتبار سنجی نتایج مدل ارائه‌شده، تست تجربی موسوم به تست PMM با استفاده از تست‌های تونل آب انجام گرفته است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که ترکیب روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش نیمه تجربی در محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی کارآمد بوده و قادر است با دقت مناسبی این ضرایب را تخمین بزند و همچنین استفاده از این روش هزینه محاسباتی در طراحی تفصیلی را کاهش می‌دهد.

Development of a Numerical-Semi Empirical Model to Estimate Hydrodynamic Derivatives of an AUV

Norouz Mohammad Nouri[1*], Karim Mostafapour[2], Seyed Hassan Hassanpour[3]

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

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Apr. 2015
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Hydrodynamic Derivatives
CFD
Numerical-Empirical Method
PMM Test

ABSTRACT

Increased use of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) caused an increase in their design sensitivity. The subject of most of AUV design studies was on drag reduction, ease of handling and their stability. Adequate design and prediction of the behavior of these vehicles requires an accurate estimation of corresponding hydrodynamic derivative loads. In this study, Hydrodynamic derivatives of the AUV have been estimated using numerical and semi empirical methods. First, using a numerical method based on CFD, hydrodynamic derivatives related to the body of the Hydrolab500 have been estimated by applying pure heave and pure pitch oscillatory movements, and then, with the aid of semi empirical formulas, hydrodynamic derivative values of hydrofoils have been added. To validate the results, Planar Motion Mechanism (PMM) experimental test has been carried out using water tunnel tests. The validation results show that combining CFD method and semi empirical method is efficient in the calculation of hydrodynamic derivatives and is able to estimate these coefficients with reasonable accuracy. Using this method, the computational cost of detailed design has been reduced.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

۱ - مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و با توجه به افزایش اهمیت منابع عمیق دریایی، کاربرد وسایل زیرسطحی خودکنترل[۱] در حوزه‌های وسیعی همچون صنعت دفاعی، محافظت و نگهبانی محلی، کشف و استخراج مواد معدنی و هیدروکربنی، محافظت و نگه‌داری خطوط انتقال نفتی و همچنین نصب تجهیزات دریایی گسترش یافته است. لذا مأموریت‌های قابل‌انتظار از این وسایل به‌مرورزمان پیچیده‌تر و چالشی‌تر شده است. به‌منظور عملکرد مناسب این وسایل، اطمینان از مانورپذیری، کنترل و پایداری، در فرآیند طراحی یک زیرسطحی بسیار حائز اهمیت است. در عمل مانور شش درجه آزادی یک متحرک را می‌توان به ترکیبی از حرکت‌های افقی، عمودی و دورانی تقسیم کرد. حرکت کلی جسم را با چند معادله خطی ریاضی بیان کرد که در آنها نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد به رونده زیرسطحی را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای سینماتیکی و ضرایبی موسوم به ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی[۲] نیز بیان کرد. این مشتقات به سه دسته استاتیکی و چرخشی(مشتقات میراکننده[۳]) و مشتقات شتابی(مشتقات جرم افزوده[۴]) تقسیم بندی می‌شوند. مشتقات استاتیکی ناشی از سرعت خطی وسیله هستند، مشتقات چرخشی ناشی از سرعت دورانی و مشتقات شتابی ناشی از شتاب خطی و دورانی وسیله می‌باشند. تخمین مشتقات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی با چهار روش تحلیلی، نیمه تجربی، تجربی و عددی انجام می‌شود. بکارگیری روش مطمئن در تخمین مشتقات هیدرودینامیکی ضروریست چراکه منجر به کاهش هزینه-های طراحی و همچنین بهبود ویژگی‌های عملکردی زیرسطحی قبل از ساخت آن می‌شود. روش تحلیلی مشتقات هیدرودینامیکی مربوط به شتاب را به خوبی پیش‌بینی می‌کند ولی در محاسبه مشتقات مربوط به سرعت به دلیل حذف اثرات لزجت جواب درستی نمی‌دهد. روش نیمه تجربی نیز برای هندسه‌هایی با پیچیدگی زیاد بکار گرفته نمی‌شود و اغلب با فرض جریان پتانسیل می‌باشد. در روش تجربی، تست مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM)[۵] موثرترین راه برای محاسبه مشتقات می‌باشد ولی مستلزم ابزارها و امکانات خاص آزمایشگاهی است که زمانبر و پر هزینه هستند و لذا برای طراحی مقدماتی صرفه اقتصادی ندارد. روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)[۶] یا عددی سختی، هزینه و زمانبری روش آزمایشگاهی را ندارند و همچنین نیازمند ابزارهایی برای نگه داری مدل نمی‌باشد. همچنین روش دینامیک سیالات محاسباتی در مقایسه با روش‌های نیمه تجربی که از اثرات غیرخطی بودن صرفنظر کرده و اغلب با فرض جریان پتانسیل می-باشند نیز دقیقتر و کاربردی‌تر هستند.

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در این حوزه از دهه ۹۰ میلادی بکار گرفته شده‌اند. کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در صنایع دریایی با پیشرفت تکنولوژی و افزایش سرعت و توان محاسباتی کامپیوترها در حال رشد است. در چند دهه اخیر از دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی استفاده شده است. وو و همکارانش[۱] حرکت پایا مستقیم‌الخط زیرسطحی مدل SUBOFF را در حالات با و بدون زاویه حمله در نزدیکی بستر سیال بینهایت شبیه‌سازی کرده‌اند و اثرات حرکت در نزدیکی بستر را روی مشتقات هیدرودینامیکی موردبررسی قرار داده‌اند و مشتقات به‌دست‌آمده را با دقت بالایی محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه کرده‌اند. زیبا و همکارانش[۲] با استفاده از نرم‌افزار CFX به شبیه‌سازی مانور برای زیرسطحی CR-02 پرداخته‌اند. مدل کی-اپسیلون[۷] برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی مکانی و روش کی-اومگا[۸] برای ضرایب چرخشی و سایر ضرایب کوپله هیدرودینامیکی بکار گرفته شده است. نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی با نتایج موجود از تست دریاچه تجربی همخوانی داشته است. واز و همکارانش[۳] با تمرکز بر پیش‌بینی دقیق نیروهای مانورینگ زیرسطحی DARPA SUBOFF به کمک CFD و با استفاده از کد توسعه داده شده در نرم‌افزار اختصاصی MARIN و همچنین نرم‌افزار تجاری AcuSolve به محاسبه نیروها و الگوی جریان حول زیرسطحی برای دو حالت بدون بدنه و بدنه کامل پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده رضایت‌بخش بوده و با داده‌های تجربی همخوانی داشته است. تیاگی و همکارانش [۴] به کمک CFD و با استفاده از معادلات ناویر- استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS)[۹] در نرم‌افزار فلوئنت[۱۰] به محاسبه ضرایب نیروها و گشتاورهای دمپینگ هیدرودینامیکی عرضی برای دو هندسه زیرسطحی پرداخته و نتایج را با نتایج نیمه تجربی موجود مقایسه کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت روش CFD داشته است و نشان می‌دادند که نیروها و گشتاورها با سرعت جانبی یک رابطه غیرخطی دارند. بروگلیا و همکارانش [۵] با استفاده از یک کد موازی CFD به بررسی جریان حول تانکر KVLCC2 در طی یک مانور سووی خالص[۱۱] با در نظر گرفتن اثرات سطح آزاد پرداخته‌اند. نیروهای جانبی و گشتاور یاوو[۱۲] محاسبه‌شده از این روش تطابق خوبی با داده‌های تجربی با خطای نسبی به ترتیب کمتر از ۵/۵ و ۲۰ درصد داشته‌اند. ملیک و همکارانش[۶] به شبیه‌سازی تست‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای به کمک CFD برای هندسه متقارن محوری بیضی‌گون با نسبت ابعادی ۶:۱ پرداخته‌اند و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و قابلیت مش متحرک[۱۳] و چند ناحیه کردن میدان محاسباتی به‌منظور اعمال حرکت‌های هیو[۱۴] و پیچ خالص[۱۵] توانسته‌اند نتایجی با دقت بالا در مقایسه با حل تحلیلی موجود به دست آورند. فیلیپس و همکارانش [۷] برای محاسبه مشتقات سرعت و شتاب با استفاده از مدل‌سازی معادلات ناپایای ناویر- استوکس با میانگین‌گیری رینولدز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

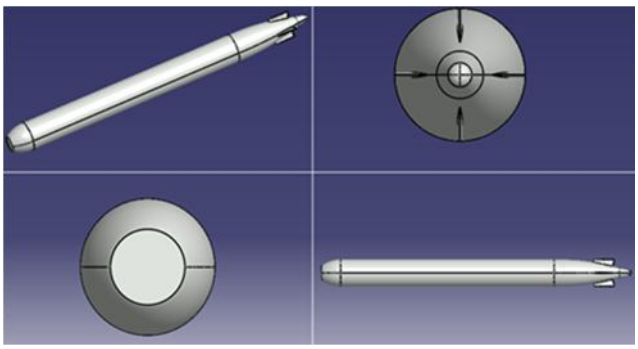
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

(URANS) به شبیه‌سازی تست‌های PMM برای نمونه مدل زیرسطحی Autosub در حرکت سووی خالص به محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی پرداخته‌اند. محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی به همراه بالک بروش عددی در جریان غیر پایا پرهزینه و زمان‌بر است.

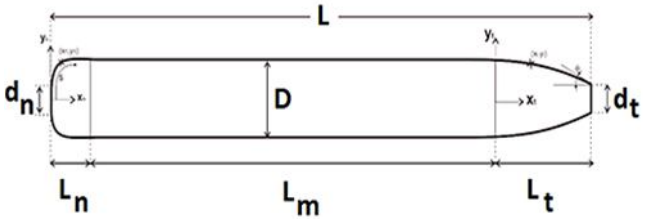
به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی، در این مقاله یک مدل عددی-نیمه تجربی جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ بر پایه مانورهای مکانیزم PMM ارائه‌شده است. این مقاله در سه بخش اصلی تدوین گشته است: بخش اول به معرفی مدل هیدرولب۵۰۰ و تئوری فرآیند محاسبه مشتقات پرداخته‌شده است، در بخش دوم به مدل‌سازی عددی مسئله پرداخته شده است و در بخش سوم به ارائه نتایج، تحلیل و اعتبارسنجی[16] اختصاص داده شده است. نتایج حرکت هیو خالص با نتایج تست‌های تجربی اعتبارسنجی شده است و همچنین روش حل عددی نیز صحت سنجی[17] گشته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت مطلوب این مدل دارند.

۲ - توصیف زیرسطحی هیدرولب۵۰۰

هندسه زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ یک هندسه بهینه‌شده به‌منظور انجام مأموریت‌های دریایی در قالب یک AUV می‌باشد که در پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه‌های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران طراحی و ساخته شده است. این زیرسطحی شامل یک بدنه کلی و چهار هیدروفویل می‌باشد. در طراحی هندسه هیدرولب۵۰۰ قیودی ازجمله قید عدم جدایش، عدم کاویتاسیون و همچنین کمینه بودن نیروی مقاوم سیال به همراه قید بیشینه بودن حجم زیرسطحی لحاظ گشته است. بهینه‌سازی روی تمامی پارامترهای طولی، پروفیل‌های دماغه و دم انجام شده است. در شکل۱ و ۲ نمایی کلی از هندسه هیدرولب۵۰۰ به همراه پارامترهای طولی آن نشان داده شده است. در جدول۱ مقادیر بی-بعد پارامترهای طولی هیدرولب۵۰۰ آورده شده است.



شکل ۱ - مدل کلی زیرسطحی هیدرولب۵۰۰

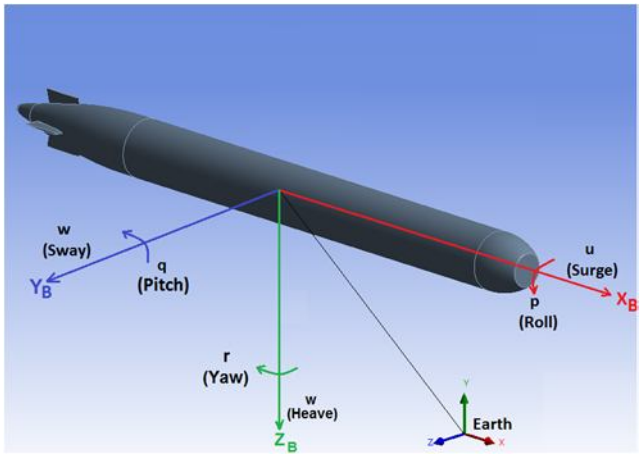


شکل ۲ - بدنه هیدرولب۵۰۰ به همراه پارامترهای طولی

جدول ۱ - پارامترهای بی‌بعد طولی زیرسطحی هیدرولب۵۰۰

طول بی‌بعد	L/D	Ln/D	Lm/D	Lt/D	dn/D	dt/D
مقدار	۱۰	۱	۶	۳	۰/۶	۰/۴

در شکل۳ نام‌گذاری انواع مانورهای زیرسطحی به همراه دستگاه مختصات متصل به بدنه[18] و متصل به زمین[19] آورده شده است. در جدول۲ پارامترهای بی‌بعد مربوط به مشتقات هیدرودینامیکی بکار رفته در مطالعه حاضر لیست شده است.



شکل ۳ - معرفی انواع مانورها و دستگاه مختصات

جدول ۲ – روابط بی‌بعد مشتقات هیدرودینامیکی

ضرایب بی‌بعد هیو خالص	رابطه	ضرایب بی‌بعد پیچ خالص	رابطه
$Z'_{\dot{w}}$	$\frac{2Z_{\dot{w}}}{\rho L^3}$	$Z'_{\dot{q}}$	$\frac{2Z_{\dot{q}}}{\rho L^4}$
Z'_{w}	$\frac{2Z_{w}}{\rho U_0 L^2}$	Z'_{q}	$\frac{2Z_{q}}{\rho U_0 L^3}$
$M'_{\dot{w}}$	$\frac{2M_{\dot{v}}}{\rho L^4}$	$M'_{\dot{q}}$	$\frac{2M_{\dot{q}}}{\rho L^5}$
M'_{w}	$\frac{2M_{v}}{\rho U_0 L^3}$	M'_{q}	$\frac{2M_{q}}{\rho U_0 L^4}$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

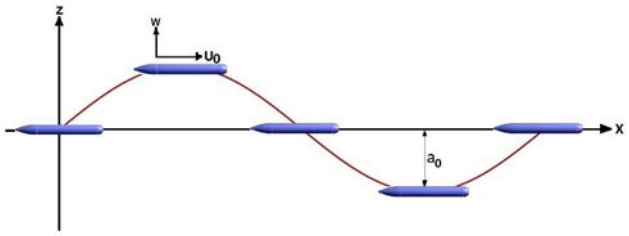
۳ - فرآیند تئوری تخمین مشتقات هیدرودینامیکی

به‌منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی می‌بایست معادلات حاکم بر دینامیک جسم صلب آن را استخراج کرد. این معادلات در سیستم مختصات متصل به بدنه نوشته‌می‌شوند و به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} Z &= (m - Z_{\dot w}).\dot{\mathrm{w}} + (m.x_G - Z_q).\dot{\mathrm{q}} - Z_w.\mathrm{w} + (\mathrm{m}.\mathrm{U}_0 - Z_q).\mathrm{q} \\ M &= (m\,x_G - M_{\dot w}).\dot{\mathrm{w}} + (I_z - M_{\dot q}).\dot{\mathrm{q}} - M_w.\mathrm{w} + (m.x_G U_0 - M_q).\mathrm{q} \end{aligned} \qquad (۱)$$

با حذف اثرات جرم و اینرسی بدنه($m, I = 0$) و قرار دادن دستگاه مختصات بدنی روی مرکز جرم زیرسطحی($x_G, y_G, z_G = 0$)، تنها نیروهای خالص وارده از طرف سیال به‌دست‌می‌آیند. در این مقاله هدف تخمین مشتقات هیدرودینامیکی با استفاده از شبیه‌سازی مانورهای مکانیزم PMM می‌باشد. مانورهای تست PMM به دو حرکت هیو خالص و پیچ خالص تقسیم‌بندی می‌شوند. در حرکت هیو خالص، همانطورکه در شکل۴ مشاهده می‌شود، از دید ناظر متصل به بدنه، جسم صرفاً در جهت عمود بر محور طولی خود نوسان می‌کند. در زیر معادلات دینامیکی حاکم بر این حرکت با توجه به اینکه $q = \dot q = 0$ آورده‌شده‌اند.

$$\begin{cases} Z = -\mathrm{Z}_{\dot w}.\dot{\mathrm{w}} - \mathrm{Z}_w.\mathrm{w} \\ M = -\mathrm{M}_{\dot w}.\dot{\mathrm{w}} - \mathrm{M}_w.\mathrm{w} \end{cases} \qquad (۲)$$



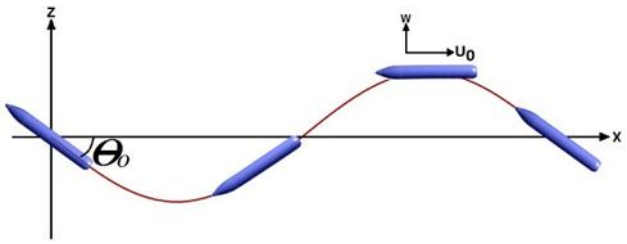
شکل ۴ –حرکت هیو خالص

در زیر معادلات مربوط به حرکت اجباری زیرسطحی برای حرکت هیو خالص آورده شده است:

$$\begin{aligned} z &= a_o \sin \omega t \\ w &= \dot z = a_o \omega \cos \omega t \\ \dot w &= \ddot z = -a_o \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \qquad (۳)$$

در کار حاضر مقدار دامنه نوسانات(a_o) برابر ۱ سانتیمتر می‌باشد. در حرکت پیچ خالص همانطورکه در شکل(۵) نشان داده شده است، جسم از دید ناظر متصل به بدنه صرفا حول محور y نوسان دورانی دارد و در جهت عمود بر جسم سرعتی را حس نمی‌کند. در این حرکت $w = \dot w = 0$ و معادلات دینامیکی به‌صورت زیر خلاصه‌می‌شوند.

$$\begin{cases} Z = Z_{\dot q}.\dot{\mathrm{q}} - Z_q.\mathrm{q} \\ M = -M_{\dot q}.\dot{\mathrm{q}} - M_q.\mathrm{q} \end{cases} \qquad (۴)$$



شکل ۵ –حرکت پیچ خالص

در زیر معادلات مربوط به حرکت اجباری زیرسطحی برای حرکت پیچ خالص آورده شده است:

$$\begin{aligned} &\theta = \theta_o \sin \omega t \quad ; \quad \theta_o = a\tan(\frac{a_0\omega}{U_0}) \approx \frac{a_0\omega}{U_0} \\ &q = \dot\theta = \theta_o \omega \cos \omega t \\ &\dot q = \ddot\theta = -\theta_o \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \qquad (۵)$$

مقدار دامنه نوسانات چرخشی(φ_o)برابر ۴/۳ درجه می‌باشد.

پس از محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه می‌بایست اثرات بالک را که از نتایج نیمه تجربی حاصل‌شده به نتایج مربوط به بدنه اضافه کرد. روابط نیمه تجربی مربوط به هیدروفویل‌های هیدرولب۵۰۰ با استفاده از کد توسعه داده‌شده در پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه‌های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران در زیر آورده شده است. این روابط مقادیر ضرایب درگ، لیفت و گشتاوری را برحسب زاویه حمله بالک می‌دهند. در محاسبه این ضرایب، توربولانس بودن جریان در ابتدای بالک به‌واسطه جریان متأثر از بدنه لحاظ گشته است.

$$\begin{cases} C_{D0005} = 0.00885 & \theta < 1.75 \deg \\ C_{D0005} = 0.0004 + 0.0068\theta(\deg) & 1.75 < \theta < 5 \deg \end{cases}$$
$$C_{L0005} = 0.1131\theta(\deg)$$
$$C_{m0005} = 0.0273\theta(\deg) \qquad (۶)$$

سمت چپ معادلات دینامیک جسم صلب(معادلات(۲و۴)) را با استفاده از خروجی حل عددی می‌توان ثبت کرد و به‌صورت ترکیبی از توابع سینوس(با ضریب A) و کسینوس(با ضریب B) تقریب زد و سپس ضرایب هر یک از توابع مثلثاتی دو طرف معادله را باهم برابر قرار داد.

مانور هیو خالص:

$$\begin{cases} Z_{\dot w} = \dfrac{A}{a_0\omega^2}, \mathrm{Z}_w = \dfrac{-B}{a_0\omega} \\ M_{\dot w} = \dfrac{A}{a_0\omega^2}, \mathrm{M}_w = \dfrac{-B}{a_0\omega} \end{cases} \qquad (۷)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

مانور پیچ خالص:

$$\begin{cases} Z_{\dot{q}} = \dfrac{A}{\theta_0 \omega^2}, Z_q = \dfrac{-B}{\theta_0 \omega} \\ M_{\dot{q}} = \dfrac{A}{\theta_0 \omega^2}, M_q = \dfrac{-B}{\theta_0 \omega} \end{cases} \quad (۸)$$

۴ - معادلات اساسی حاکم

در این مقاله به‌منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. بنابراین سیال تراکم ناپذیر اطراف بدنه زیرسطحی با روش حل عددی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. فرم کلی معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر شامل معادله بقای جرم و مومنتوم در زیر آورده شده است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۹)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (۱۰)$$

مقدار عدد رینولدز طولی برای جریان عبوری از روی مدل هیدرولب۵۰۰ برابر $2E(+6)$ می‌باشد لذا جریان توربولانس است. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، می‌توان به کمک عبارات میانگین‌گیری شده زمانی سرعت و فشار به نوع دیگری از معادلات ناویر-استوکس[۲۰] موسوم به معادلات RANS رسید:

$$\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}\right) + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\left(-\rho \overline{u_i' u_j'}\right)}{\partial x_j} \quad (۱۱)$$

در این معادلات ρ و u_i بترتیب مبین چگالی و مولفه سرعت i ام هستند درحالیکه $i = 1,2,3$ است. P، δ_{ij} و μ به‌ترتیب بیانگر فشار استاتیک، دلتا کرونکر و لزجت دینامیکی سیال غیر نیوتنی هستند. $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ مبین تنش رینولدز[۲۱] است که خود از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا μ_t مبین لزجت توربولانسی[۲۲] است که باتوجه به مدل توربولانسی انتخابی مدل‌سازی می‌شود. در این مقاله به‌منظور مدل‌سازی جریان توربولانس از مدل توربولانسی کی- اپسیلون ریئلایزیبل[۲۳] استفاده شده است. روش ریئلایزیبل توسعه‌یافته روش استاندارد کی- اپسیلون[۲۴] می‌باشد و دو تغییر اساسی نسبت به این روش یافته است. در این روش از معادله جدیدی برای محاسبه لزجت توربولانسی استفاده شده است و همچنین معادله انتقال نرخ ازمهلال[۲۵] از معادله‌ایی برای انتقال میانگین مربعات نوسانات ورتیسیتی اقتباس گشته است.

پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ گسترش جت‌های صفحه‌ایی و دوار، عملکرد بهتر در جریان‌های چرخشی، لایه مرزی‌های تحت گرادیان فشار معکوس قوی، جدایش جریان و جریان‌های گردشی از مزیت‌های روش $k-\varepsilon$ *Realizible* است.

معادلات مدل شده انتقال برای k و ε در روش *Realizible* در زیر آورده شده اند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_K \quad (۱۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon \quad (۱۴)$$

در این معادلات G_k مبین تولید انرژی جنبشی توربولانی ناشی از تغییرات سرعت متوسط است، G_b مبین تولید انرژی جنبشی توربولانی ناشی از بویانسی است و Y_M مبین تاخیر نوسانات در توربولانس تراکم پذیری است که در کل نرخ ازمهلال شرکت دارد. S_k و S_ε عبارات منبع می‌باشند که توسط کاربر تعریف می‌شوند. σ_k و σ_ε اعداد پرانتل توربولانی برای انرژی جنبشی توربولانی و ازمهلال آن هستند.

مشابه سایر مدل‌های $k-\varepsilon$، لزجت گردابه‌ایی[۲۶] از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۵)$$

در مدل $k-\varepsilon$ *Realizible* ، C_μ دیگر ثابت نبوده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \dfrac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (۱۶)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (۱۷)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (۱۸)$$

در معادله بالا $\overline{\Omega_{ij}}$ مبین متوسط نرخ تانسور چرخشی است که در مرجع دواری با سرعت زاویه‌ایی Ω_k در حال چرخش است می‌باشد. A_0 و A_S ثابت های مدل انتخابی هستند که از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$A_0 = 4.04, \quad A_S = \sqrt{6}\cos\phi \quad (۱۹)$$

بقسمی که ϕ از رابطه زیر استخراج‌می‌شود:

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}\frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}\right)$$
$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (۲۰)$$

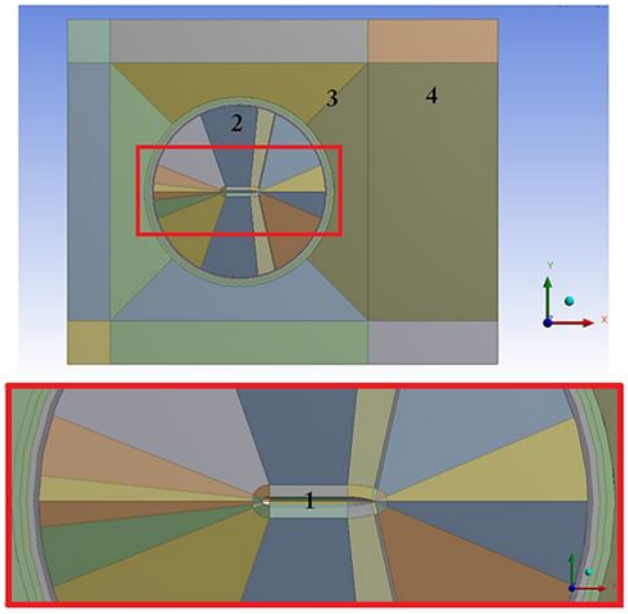
می‌توان نشان داد که C_μ تابعی از کرنش متوسط، نرخ چرخش، سرعت زاویه‌ایی سیستم دوار و انرژی جنبشی توربولانی و نرخ ازمهلال آن است. مقدار استاندارد C_μ در زیرلایه اینرسی لایه مرزی تعادلی برابر ۰/۰۹ است. مقادیر ثوابت مدل بشرح زیر است[8,9]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (۲۱)$$

۵- مدل سازی عددی

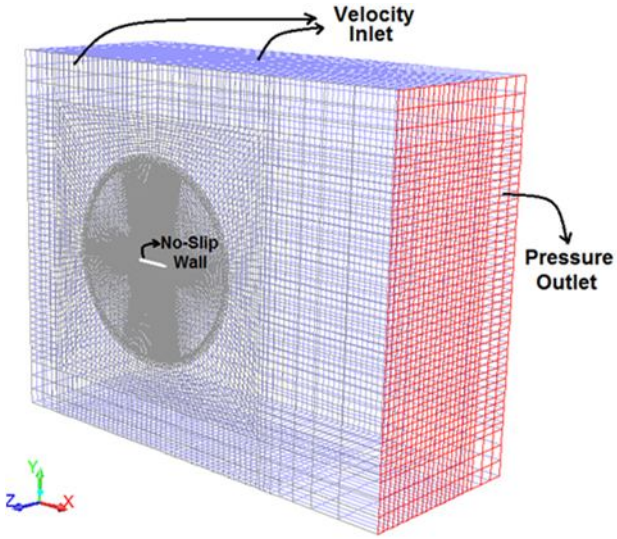
۵-۱- مدل سازی هندسی

مسئله حاضر یک مسئله سه‌بعدی غیر پایا به همراه شبکه‌بندی سازمان‌یافته می‌باشد که با کمک قابلیت مش متحرک حرکات اجباری هیو و پیچ خالص به‌صورت یک کد به زیرسطحی اعمال می‌گردد. هندسه و ناحیه بندی سیال به‌گونه‌ای است که زیرسطحی بتواند هر دو مانور هیو و پیچ خالص را انجام دهد. مطابق شکل۶ هندسه از چهار ناحیه اصلی تشکیل شده است: ناحیه اول ناحیه لایه مرزی حول جسم به‌منظور ارائه شبکه‌بندی مناسب جهت تخمین بهتر اثرات لایه مرزی است، ناحیه دوم موسوم به ناحیه نوسان چرخشی[۲۷] است که شامل یک کره در اطراف جسم می‌باشد، ناحیه سوم موسوم به ناحیه نوسان خطی[۲۸] است که یک هندسه مکعبی می‌باشد و نهایتاً ناحیه چهارم موسوم به ناحیه تغییر شکل دهنده[۲۹] در اثر حرکت دو ناحیه کروی و مکعبی می‌باشد که به منظور ایجاد فضای مورد نیاز برای ناحیه ویک[۳۰] پشت جسم می‌باشد.



شکل ۶ – هندسه و ناحیه بندی سیال اطراف

در شکل ۷ شرایط مرزی اعمالی نشان داده شده است. شرط مرزی بدنه زیرسطحی بعنوان دیوار عدم لغزش و شرایط مرزی اطراف به صورت ورودی سرعت و خروجی فشار تنظیم گشته است. با توجه به دور بودن محدوده سیال از اطراف جسم این شرایط مرزی به منظور کاهش زمان محاسبات، ورودی سرعت قرار داده شده‌اند. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و قراردهی توری‌ها در ورودی مقدار بعد طولی[۳۱] برابر ۱ میلیمتر و شدت توربولانسی[۳۲] در ورودی برابر ۰/۱ درصد جایگذاری گشته است.



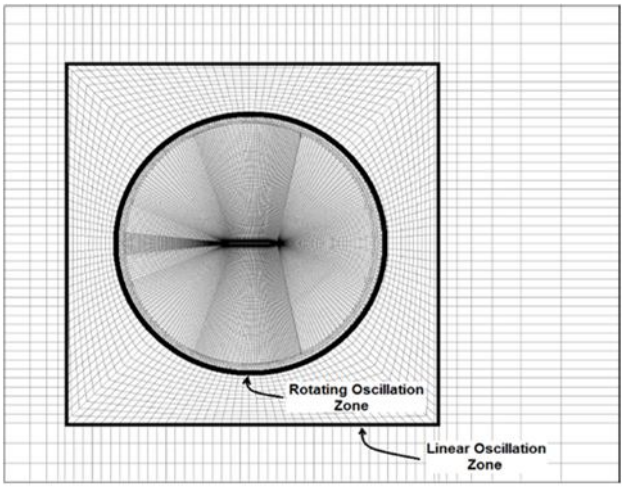
شکل ۷ –شرایط مرزی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

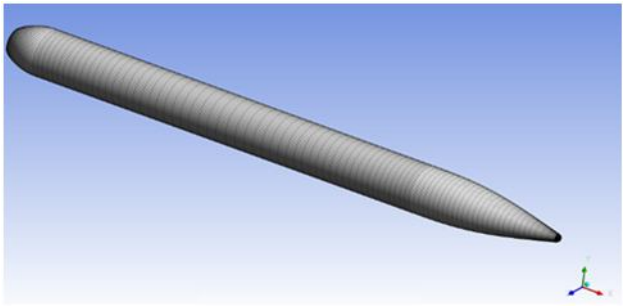
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

۵-۲- شبکه بندی و بررسی استقلال از مش

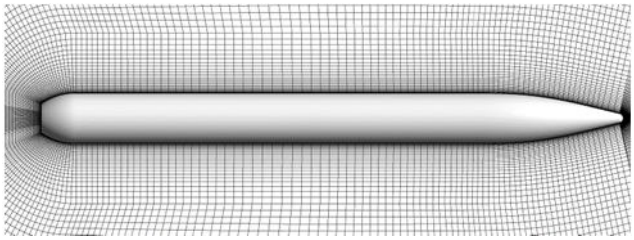
شبکه‌بندی این هندسه به‌صورت سازمان‌یافته چهاروجهی می‌باشد. به‌منظور تولید انواع مانورها شبکه‌بندی به دو ناحیه چرخشی و انتقالی تقسیم‌بندی شده است تا امکان انجام انواع مانورهای هیو و پیچ خالص، رول[۳۳] و مانور سرج[۳۴] را امکان‌پذیر کند. در شکل‌های۸ تا ۱۰ شبکه‌بندی اطراف زیرسطحی و روی دیواره آن نمایش داده شده است.



شکل ۸ - شبکه‌بندی سازمان‌یافته به همراه ناحیه بندی شبکه

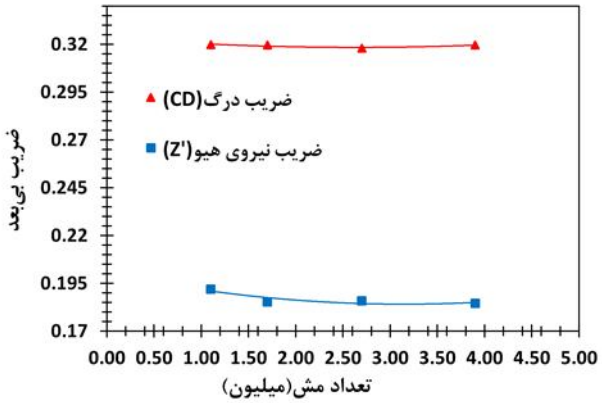


شکل ۹ - شبکه‌بندی روی بدنه زیرسطحی هیدرولب۵۰۰

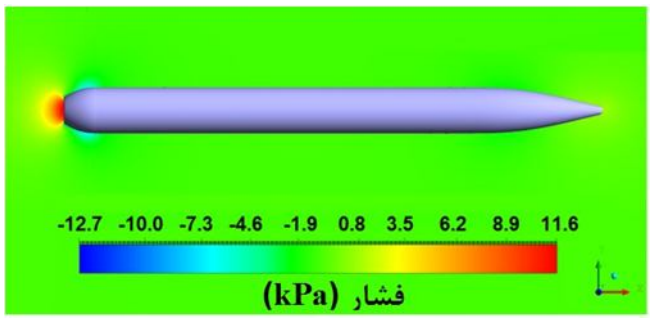


شکل ۱۰ - شبکه‌بندی منظم در ناحیه اطراف جسم

برای بررسی استقلال از وابستگی به شبکه، ۵ شبکه‌بندی انتخاب شده است. برای این منظور دو پارامتر ضریب درگ و مشتق هیدرودینامیکی Z_w موردبررسی قرارگرفته‌اند. به‌منظور حل جریان توربولانس از مدل $k-\varepsilon\ Realizible$ استفاده شده است. برای مشاهده اثرات دیواره از تابع دیواره استاندارد[۳۵] استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل[۳۶] به‌منظور محاسبه میدان فشار، تقریب مرتبه اول بالادستی[۳۷] برای تقریب معادله انتقال توربولانی و تقریب مرتبه دوم[۳۸] برای فشار و سرعت تنظیم گشته است. در شکل۱۱ نمودار استقلال از مش برای این دو پارامتر نمایش داده شده است. با توجه به نمودار، تعداد مش بهینه ۲/۷ میلیون انتخاب گشته است که مقدار y^+ آن برابر ۷۵ می‌باشد. در شکل‌های۱۲ و ۱۳ نمونه‌ایی از توزیع فشار و توزیع سرعت اطراف جسم نشان داده شده است. با توجه به شکل۱۲ توزیع فشار روی دماغه به علت شرایط نقطه سکون بیشینه بوده و به‌تدریج در طول دماغه جسم به فشار محیط اطراف می‌رسد. با توجه به اینکه جدایش جریان وجود ندارد، اغلب توزیع فشار حول جسم همان توزیع فشار بیرون لایه مرزی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۳ در حرکت هیو خالص با نوسان جسم ناحیه ویک همراه جسم نوسان می‌کند، این نوسان به‌گونه‌ای است که تاریخچه‌ای از خود ندارد و هم‌فاز با حرکت جسم و در راستای محور آن است. مقدار گام زمانی ۱ میلی‌ثانیه از بین گام‌های زمانی ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ ثانیه به‌عنوان گام زمانی مناسب انتخاب گشته است.



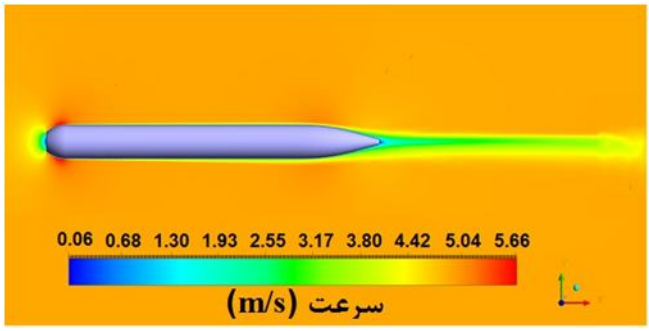
شکل ۱۱ - استقلال از مش



شکل ۱۲ -توزیع فشار اطراف زیرسطحی برای حرکت هیو خالص

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]



شکل ۱۳ – توزیع سرعت اطراف زیرسطحی برای حرکت هیو خالص

۵ –اعتبارسنجی

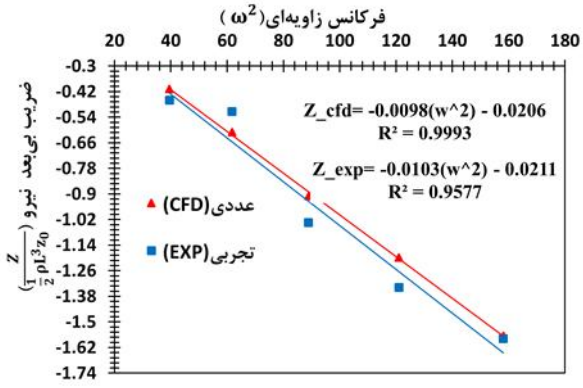
به‌منظور اعتبارسنجی داده‌های عددی تست‌های تجربی بر روی مدل زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ انجام گرفته است. تجهیزات نصب‌شده در تونل آب جهت انجام تست‌های استاتیکی و دینامیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دستگاه طراحی‌شده از سه بخش اصلی استینگ، نوسانگرها و سیستم کنترل جابه‌جایی و تغییر زاویه مدل تشکیل‌شده است. استینگ اتصال‌دهنده‌ی بین سنسور اندازه‌گیری و میله‌های نوسانگر می‌باشد و امکان نگهداری و جابه‌جایی و تغییر زاویه‌ی مدل را در تونل آب فراهم می‌کند. توابع حرکت موردنیاز 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 قرارگرفته است. همانطورکه در شکل۱۴ مشخص است مدل زیرسطحی هیدرولب۵۰۰ توسط یک میله نگه‌دارنده به مکانیزم حرکت صفحه‌ای(PMM) متصل شده است. یک نیروسنج شش‌مؤلفه‌ای موسوم به بالانس شش درجه آزادی درون جسم به‌منظور داده‌برداری لحظه‌ای نیروها و گشتاورها تعبیه گشته است. راستای بارهای اندازه‌گیری توسط بالانس با راستای محورهای متصل به بدنه یکسان می‌باشد. بنابراین نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی در راستای مختصات ثابت به بدنه اندازه‌گیری می‌شوند. بالانس شش‌مؤلفه‌ای با خطای ماکزیمم ۰/۱ درصد بار ماکزیمم (F=20 N, M=1N.m)کالیبره شده است. خروجی این نیروها و گشتاورها توسط سیستم‌های داده برداری جمع‌آوری شده و سپس داده‌های مفید استخراج می‌شوند. تست‌های تجربی هیو خالص در فرکانس-های نوسانی ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۲، ۲/۲۵ هرتز و با دامنه نوسانات ۱ سانتیمتر انجام گرفته است. لازم به ذکر است حرکت اجباری هیو و پیچ خالص در شبیه سازی عددی نیز با همین فرکانس‌ها مدل‌سازی گشته‌اند. تست‌های تجربی در تونل آب پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه‌های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است.



شکل ۱۴ - بخشی از تونل آب، مدل زیرسطحی و مکانیزم تولید مانورها

۶- نتایج و تحلیل

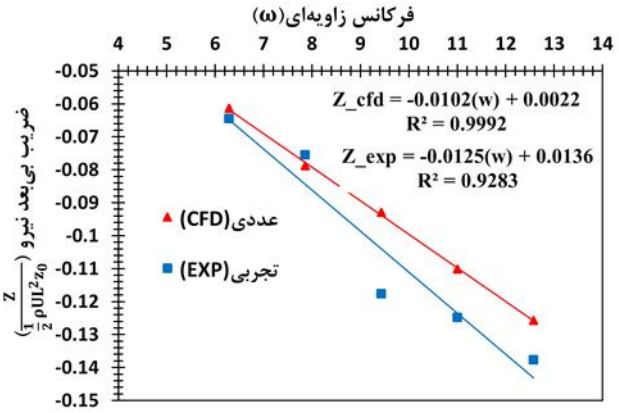
با توجه به روابط(۷و۸) در هر رابطه با رسم ضریب A/a_0 برحسب ω^2 می‌توان به مقدار $Z_{\dot{w}}$ و $M_{\dot{w}}$ رسید و با رسم $-B/a_0$ برحسب ω می‌توان به مقدار Z_w و M_w رسید. برای حرکت پیچ خالص نیز می‌توان مقادیر ضرایب را با رسم ضریب A/θ_0 برحسب ω^2 و رسم $-B/\theta_0$ برحسب ω به دست آورد. در شکل‌های(۱۵) تا (۱۸) برای حرکت هیو خالص این نمودارها رسم گشته‌اند. نمودارها گونه‌ای است که شیب آن‌ها بیانگر مقدار بی‌بعد مشتقات هیدرودینامیکی می‌باشد.



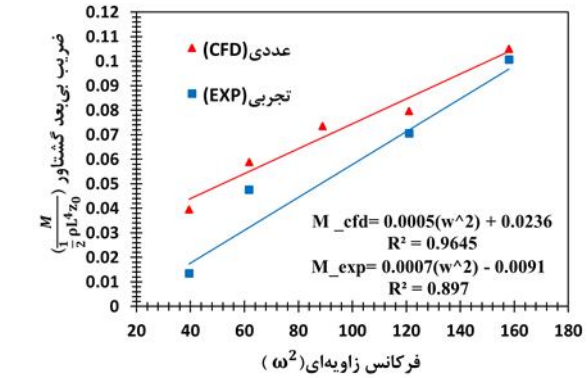
شکل ۱۵- نمودار مربوط به $Z'_{\dot{w}}$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

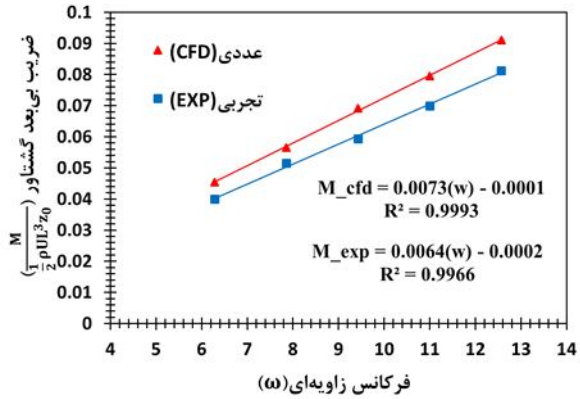
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]



شکل ۱۶ - نمودار مربوط به $Z'_{\dot{w}}$



شکل ۱۷ - نمودار مربوط به $M'_{\dot{w}}$



شکل ۱۸ - نمودار مربوط به M'_{w}

در جدول(۳) نتایج عددی مربوط به حرکت هیو خالص به همراه نتایج تجربی به‌منظور صحت‌سنجی داده‌های عددی آورده شده است. با توجه به این جدول، مقدار خطای تخمین $Z'_{\dot{w}}$ کمتر از مشتقات دیگر است چراکه این ضریب تأثیر بسیار کمی از اثرات لزجت و خطاهای مدل‌سازی مربوط به جریان توربولانس می‌پذیرد و بیشتر به توزیع فشار اطراف جسم وابسته است. مقدار خطای $M'_{\dot{w}}$ نسبت به ضرایب دیگر بیشتر است، چراکه این ضریب به دلیل کوچک بودن مدل هندسی و متناسب با آن کوچک بودن نیروها و گشتاورها تأثیر بیشتری از خطاهای عددی پذیرفته است. این ادعا با مشاهده به دو داده آخر نمودار شکل(۱۷) که نشان می‌دهند شیب نمودارهای عددی و تجربی در فرکانس‌های بالا به هم نزدیک‌تر می‌شوند اثبات کرد. و این به دلیل مقادیر بیشتر نیروها در فرکانس‌های بالاتر می‌باشد.

جدول ۳ –مشتقات هیدرودینامیکی بی‌بعد حرکت هیو خالص

ضرایب	CFD $a_0 = 1cm$	EXP $a_0 = 1cm$	%Error
$Z'_{\dot{w}}$	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۰۳	۴/۶
Z'_{w}	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۲۵	۱۸/۴
$M'_{\dot{w}}$	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	۲۸/۶
M'_{w}	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۶۴	۱۴/۱

با توجه به مقادیر خطاهای مشتقات و اعتبارسنجی روش پیشنهادی با داده‌های تجربی در حرکت هیو خالص و همچنین صحت روش حل عددی، از مدل ارائه‌شده برای محاسبه مشتقات حرکت پیچ خالص نیز استفاده شده است. مشتقات مربوط به حرکت پیچ خالص در جدول(۴) آورده شده‌اند.

جدول ۴ - مشتقات هیدرودینامیکی حرکت پیچ خالص

$Z'_{\dot{q}}$	Z'_{q}	$M'_{\dot{q}}$	M'_{q}
۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۵۵۴۵	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۰۲۰۲

۷ - جمع‌بندی

در این مقاله یک روش عددی-نیمه تجربی برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی بر پایه مانورهای هیو و پیچ خالص ارائه شد. در این روش مشتقات هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ به کمک کدهای دینامیک سیالات محاسباتی به‌دست‌آمده است و با نتایج به‌دست‌آمده برای بالک‌های زیرسطحی از روش نیمه تجربی ادغام گشته است. با ترکیب نتایج به‌دست‌آمده مشتقات هیدرودینامیکی مربوطه تخمین زده شد. مقایسه نتایج مدل ارائه‌شده با نتایج تست‌های تجربی PMM انجام‌شده در تونل آب نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی وجود دارد. استفاده از مدل ارائه‌شده هزینه محاسباتی برای تخمین پارامترهای موردنیاز مربوط به نیروها و گشتاورها در فرآیند طراحی تفصیلی AUV ها را می‌تواند کاهش دهد.

کلید واژگان

1- AUV: Autonomous Underwater Vehicle
2- Hydrodynamic Derivatives
3- Damping Coefficient
4- Added Mass Coefficient
5- PMM: Planar Motion Mechanism
6- CFD: Computational Fluid Dynamics
7- $k-\varepsilon$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]

8- $k-\omega$
9- RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes
10- Fluent
11- Pure Sway
12- Yaw
13- Dynamic Mesh
14- Pure Heave
15- Pure Pitch
16- Validation
17- Verification
18- Body-Fixed Coordinate
19- Earth-Fixed Coordinate
20- Navier-Stokes
21- Reynolds Stress
22- Turbulent Viscosity
23- Realizable $k-\varepsilon$
24- Standard $k-\varepsilon$
25- Dissipation Rate
26- Eddy Viscosity
27- Rotating Oscillation Zone
28- Linear Oscillation Zone
29- Deforming Zone
30- Wake
31- Length Scale
32- Turbulent Intensity
33- Roll
34- Surge
35- Standard Wall Function
36- SIMPLE
37- First Order Upwind
38- Second Order

۶ - مراجع

1- Wu, B.S., Fu, X., Kuang, X.F (2005), *Investigation of hydrodynamic characteristics of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods,* J. Ship Mech. , Vol. 9, p.14–17.
2- Zhia-quiang, H., Yang, L., Hai-Tao, G.U. (2007), *On Numerical computation of viscous hydrodynamics of unmanned underwater vehicle,* Robot, Vol. 29, p.145-150.
3- Vaz, G., Toxopeus, S., Holmes, S. (2010), *Calculation of maneuvering forces on submarines using two viscous-flow solvers,* ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
4- Tyagi, A., Sen, D. (2006), *Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach,* Journal of Ocean Engineering, Vol. 33, p. 798–809.
5- Broglia, R., Mascio, A. D. , Amati, G. A. (2007), *Parallel unsteady RANS code for the numerical simulations of free surface flows*, 2nd international Conference on Marine Reasearch and Transportation. Naples, Italy.
6- Malik, S.A., Guang, P. (2013), *Transient Numerical Simulation for Hydrodynamic Derivatives Prediction of an Axisymmetric Submersible Vehicle*, Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, Vol. 5, p. 5003-5011.
7- Phillips, A., Furlong, M., Turnock, S.R. (2007), *Virtual planar motion mechanism tests of the autonomous underwater vehicle Autosub,* STG-Conference/Lectureday "CFD in Ship Design", Hamburg, Germany.
8- Shih, T., Liou, W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. (1999), *A New K-Epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows*, Model Development and Validation. NASA STI/Recon Technical Report N. Vol. 95, p. 11442.
9- Launder., B.E, Spalding, D. B. (1974), *The numerical computation of turbulent flows*, Computer methods in applied mechanics and engineering.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.9.5]