

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

نوروز محمد نوری^{۱*}، کریم مصطفی پور^۲، سیدحسن حسن پور^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

چکیده

اطلاعات مقاله

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 هیدرولب ۵۰۰ با استفاده از ترکیب روش عددی و نیمه تجربی تخمین زده شده 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. به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل ارائه شده، 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.

ناریخچه 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

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

Norouz Mohammad Nouri^{1*}, Karim Mostafapour², Seyed Hassan Hassanpour³¹ Professor of Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology; mnouri@iust.ac.ir² PhD Student of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; mostafapour@iust.ac.ir³ 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

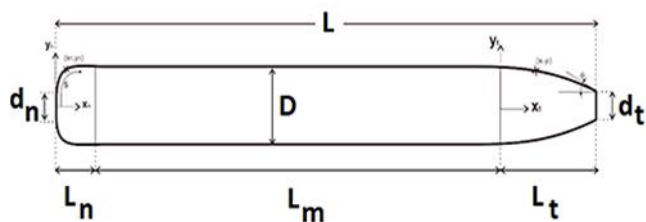
ABSTRACT

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.

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 قابل انتظار از این وسایل به‌مرور زمان 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 هزینه‌های 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 پرهزینه 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 نگه‌داری 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 می‌باشند 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-اِپسیلون^۷ برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی مکانی و روش کی-اومگا^۸ برای ضرایب چرخشی و سایر ضرایب کوبله 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} محاسبه شده 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

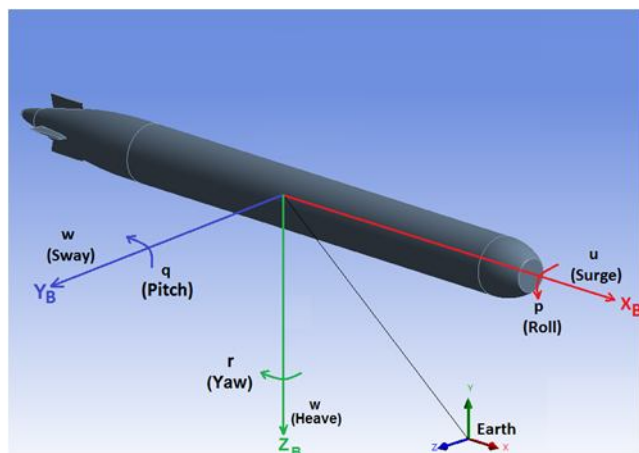


شکل ۲ - بدنه هیدرولب ۵۰۰ به همراه پارامترهای طولی

جدول ۱ - پارامترهای بی بعد طولی زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰

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

در شکل ۳ نام گذاری انواع مانورهای زیرسطحی به همراه دستگاه مختصات متصل به بدنه^{۱۸} و متصل به زمین^{۱۹} آورده شده است. در جدول ۲ پارامترهای بی بعد مربوط به مشتقات هیدرودینامیکی بکار رفته در مطالعه حاضر لیست شده است.



شکل ۳ - معرفی انواع مانورها و دستگاه مختصات

جدول ۲ - روابط بی بعد مشتقات هیدرودینامیکی

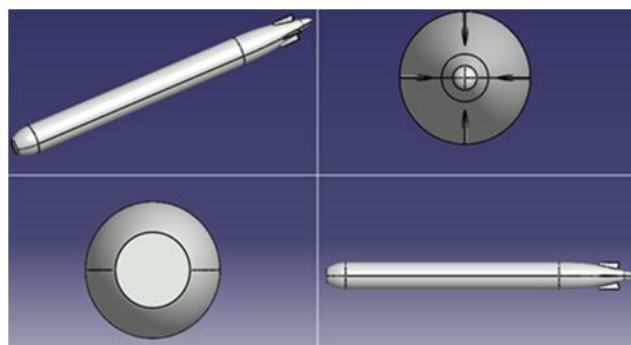
ضرایب بی بعد هیو خالص	رابطه	ضرایب بی بعد پیچ خالص	رابطه
Z'_w	$\frac{2 Z_w}{\rho L^3}$	Z'_q	$\frac{2 Z_q}{\rho L^4}$
Z_w	$\frac{2 Z_w}{\rho U_0 L^2}$	Z_q	$\frac{2 Z_q}{\rho U_0 L^3}$
M'_w	$\frac{2 M_v}{\rho L^4}$	M'_q	$\frac{2 M_q}{\rho L^5}$
M_w	$\frac{2 M_v}{\rho U_0 L^3}$	M_q	$\frac{2 M_q}{\rho U_0 L^4}$

(URANS) به شبیه سازی تست های PMM برای نمونه مدل زیرسطحی Autosub در حرکت سووی خالص به محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی پرداخته اند. محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی به همراه بالک بروش عددی در جریان غیر پایا پرهزینه و زمان بر است.

به منظور کاهش هزینه محاسباتی، در این مقاله یک مدل عددی- نیمه تجربی جهت تخمین مشتقات هیدرودینامیکی زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ بر پایه مانورهای مکانیزم PMM ارائه شده است. این مقاله در سه بخش اصلی تدوین گشته است: بخش اول به معرفی مدل هیدرولب ۵۰۰ و تئوری فرآیند محاسبه مشتقات پرداخته شده است، در بخش دوم به مدل سازی عددی مسئله پرداخته شده است و در بخش سوم به ارائه نتایج، تحلیل و اعتبارسنجی^{۱۶} اختصاص داده شده است. نتایج حرکت هیو خالص با نتایج تست های تجربی اعتبارسنجی شده است و همچنین روش حل عددی نیز صحت سنجی^{۱۷} گشته است. نتایج به دست آمده نشان از دقت مطلوب این مدل دارند.

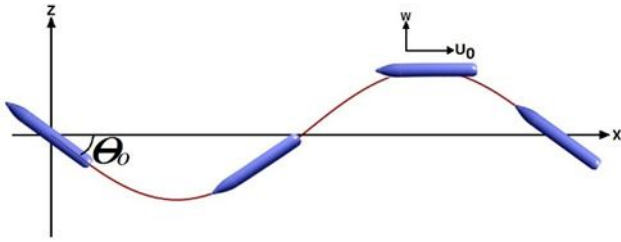
۲ - توصیف زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰

هندسه زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ یک هندسه بهینه شده به منظور انجام مأموریت های دریایی در قالب یک AUV می باشد که در پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران طراحی و ساخته شده است. این زیرسطحی شامل یک بدنه کلی و چهار هیدروفویل می باشد. در طراحی هندسه هیدرولب ۵۰۰ قیودی از جمله قید عدم جدایش، عدم کاویتاسیون و همچنین کمینه بودن نیروی مقاوم سیال به همراه قید بیشینه بودن حجم زیرسطحی لحاظ گشته است. بهینه سازی روی تمامی پارامترهای طولی، پروفیل های دماغه و دم انجام شده است. در شکل ۱ و ۲ نمایی کلی از هندسه هیدرولب ۵۰۰ به همراه پارامترهای طولی آن نشان داده شده است. در جدول ۱ مقادیر بی بعد پارامترهای طولی هیدرولب ۵۰۰ آورده شده است.



شکل ۱ - مدل کلی زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰

$$\begin{cases} Z = Z_{\dot{q}} \cdot \dot{q} - Z_q \cdot q \\ M = -M_{\dot{q}} \cdot \dot{q} - M_q \cdot q \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۵- حرکت پیچ خالص

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

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 \sin \omega t \quad ; \quad \theta_0 = a \tan\left(\frac{a_0 \omega}{U_0}\right) \approx \frac{a_0 \omega}{U_0} \\ q &= \dot{\theta} = \theta_0 \omega \cos \omega t \\ \dot{q} &= \ddot{\theta} = -\theta_0 \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

مقدار دامنه نوسانات چرخشی (θ_0) برابر $4/3$ درجه می باشد. پس از محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه می بایست اثرات بالک را که از نتایج نیمه تجربی حاصل شده به نتایج مربوط به بدنه اضافه کرد. روابط نیمه تجربی مربوط به هیدروفویل های هیدرولوب 50° با استفاده از کد توسعه داده شده در پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران در زیر آورده شده است. این روابط مقادیر ضرایب درگ، لیفت و گشتاوری را برحسب زاویه حمله بالک می دهند. در محاسبه این ضرایب، توربولانس بودن جریان در ابتدای بالک به واسطه جریان متأثر از بدنه لحاظ گشته است.

$$\begin{cases} C_{D0005} = 0.00885 & \theta < 1.75 \text{ deg} \\ C_{D0005} = 0.0004 + 0.0068\theta \text{ (deg)} & 1.75 < \theta < 5 \text{ deg} \\ C_{L0005} = 0.1131\theta \text{ (deg)} \\ C_{m0005} = 0.0273\theta \text{ (deg)} \end{cases} \quad (6)$$

سمت چپ معادلات دینامیک جسم صلب (معادلات (۴ و ۲)) را با استفاده از خروجی حل عددی می توان ثبت کرد و به صورت ترکیبی از توابع سینوس (با ضرایب A) و کسینوس (با ضرایب B) تقریب زد و سپس ضرایب هر یک از توابع مثلثاتی دو طرف معادله را باهم برابر قرار داد.
مانور هیو خالص:

$$\begin{cases} Z_w = \frac{A}{a_0 \omega^2}, Z_w = \frac{-B}{a_0 \omega} \\ M_w = \frac{A}{a_0 \omega^2}, M_w = \frac{-B}{a_0 \omega} \end{cases} \quad (7)$$

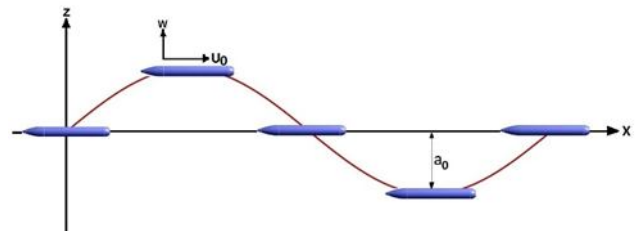
۳- فرآیند تئوری تخمین مشتقات هیدرودینامیکی

به منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی می بایست معادلات حاکم بر دینامیک جسم صلب آن را استخراج کرد. این معادلات در سیستم مختصات متصل به بدنه نوشته می شوند و به صورت زیر بیان می شوند:

$$\begin{aligned} Z &= (m - Z_w) \cdot \dot{w} + (m x_G - Z_q) \cdot \dot{q} - Z_w \cdot w + (m \cdot U_0 - Z_q) \cdot q \\ M &= (m x_G - M_w) \cdot \dot{w} + (I_z - M_q) \cdot \dot{q} - M_w \cdot w + (m x_G U_0 - M_q) \cdot q \end{aligned} \quad (1)$$

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 به دست می آیند. در این مقاله هدف تخمین مشتقات هیدرودینامیکی با استفاده از شبیه سازی مانورهای مکانیزم PMM می باشد. مانورهای تست PMM به دو حرکت هیو خالص و پیچ خالص تقسیم بندی می شوند. در حرکت هیو خالص، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، از دید ناظر متصل به بدنه، جسم صرفاً در جهت عمود بر محور طولی خود نوسان می کند. در زیر معادلات دینامیکی حاکم بر این حرکت با توجه به اینکه $q = \dot{q} = 0$ آورده شده اند.

$$\begin{cases} Z = -Z_w \cdot \dot{w} - Z_w \cdot w \\ M = -M_w \cdot \dot{w} - M_w \cdot w \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۴- حرکت هیو خالص

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

$$\begin{aligned} z &= a_0 \sin \omega t \\ w &= \dot{z} = a_0 \omega \cos \omega t \\ \dot{w} &= \ddot{z} = -a_0 \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

در کار حاضر مقدار دامنه نوسانات (a_0) برابر ۱ سانتیمتر می باشد. در حرکت پیچ خالص همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، جسم از دید ناظر متصل به بدنه صرفاً حول محور y نوسان دورانی دارد و در جهت عمود بر جسم سرعتی را حس نمی کند. در این حرکت $w = \dot{w} = 0$ و معادلات دینامیکی به صورت زیر خلاصه می شوند.

مانور پیچ خالص:

ریئلازیبل^{۲۳} استفاده شده است. روش ریئلازیبل توسعه یافته روش استاندارد کی-اِپسیلون^{۲۴} می باشد و دو تغییر اساسی نسبت به این روش یافته است. در این روش از معادله جدیدی برای محاسبه لزجت توربولانی استفاده شده است و همچنین معادله انتقال نرخ ازمهلال^{۲۵} از معادله ایی برای انتقال میانگین مربعات نوسانات ورتیسیتی اقتباس گشته است.

پیش بینی دقیق تر نرخ گسترش جت های صفحه ایی و دوار، عملکرد بهتر در جریان های چرخشی، لایه مرزی های تحت گرادیان فشار معکوس قوی، جدایش جریان و جریان های گردشی از مزیت های روش $k - \varepsilon$ Realizable است.

معادلات مدل شده انتقال برای k و ε در روش $Realizable$ در زیر آورده شده اند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (14)$$

$$\rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

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 می باشند که توسط کاربر تعریف می شوند. σ_k و σ_ε اعداد پرانتل توربولانی برای انرژی جنبشی توربولانی و ازمهلال آن هستند.

مشابه سایر مدل های $k - \varepsilon$ ، لزجت گردابه ایی^{۲۶} از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

در مدل $k - \varepsilon$ Realizable، C_μ دیگر ثابت نبوده و از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (16)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} Z_q = \frac{A}{\theta_0 \omega^2}, Z_q = \frac{-B}{\theta_0 \omega} \\ M_q = \frac{A}{\theta_0 \omega^2}, M_q = \frac{-B}{\theta_0 \omega} \end{cases} \quad (8)$$

۴ - معادلات اساسی حاکم

در این مقاله به منظور محاسبه مشتقات هیدرو دینامیکی بدنه زیر سطحی هیدرولوب ۵۰۰ از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. بنابراین سیال تراکم ناپذیر اطراف بدنه زیر سطحی 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:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

مقدار عدد رینولدز طولی برای جریان عبوری از روی مدل هیدرولوب ۵۰۰ برابر $2E(+6)$ می باشد لذا جریان توربولانس است. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، می توان به کمک عبارات میانگین گیری شده زمانی سرعت و فشار به نوع دیگری از معادلات ناویر-استوکس^{۲۰} موسوم به معادلات RANS رسید:

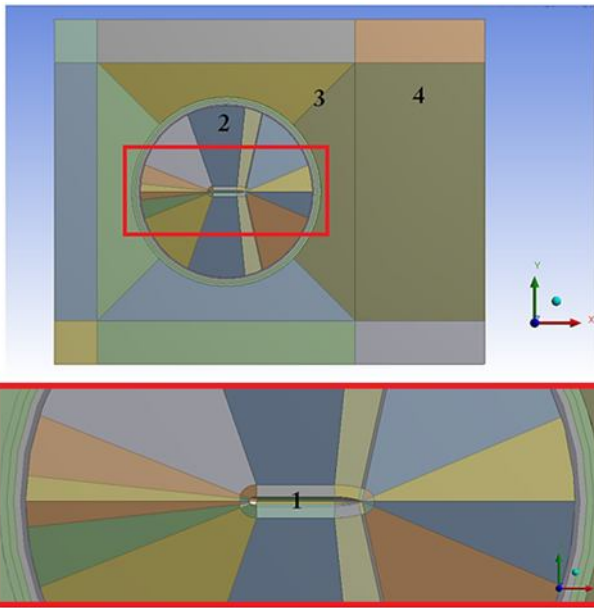
$$\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right) + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \quad (11)$$

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

در این معادلات ρ و u_i بترتیب مبین چگالی و مولفه سرعت i ام هستند در حالیکه $i = 1, 2, 3$ ، P ، δ_{ij} و μ به ترتیب بیانگر فشار استاتیکی، دلتا کرونگر 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:

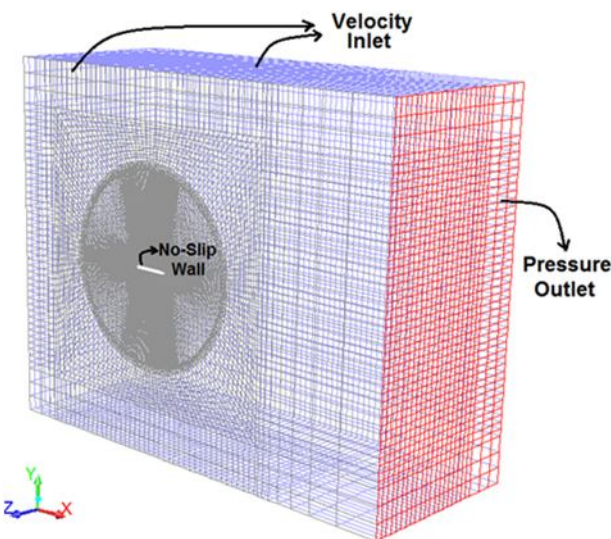
$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (12)$$

در رابطه بالا μ_t مبین لزجت توربولانسی^{۲۲} است که با توجه به مدل توربولانسی انتخابی مدل سازی می شود. در این مقاله به منظور مدل سازی جریان توربولانس از مدل توربولانسی کی-اِپسیلون



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 قراردعی 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

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (18)$$

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

$$A_0 = 4.04, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \phi \quad (19)$$

بقسمی که ϕ از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3} \right) \quad (20)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

می‌توان نشان داد که C_μ تابعی از کرنش متوسط، نرخ چرخش، سرعت زاویه‌ای 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 ثابت مدل بشرح زیر است [8,9]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (21)$$

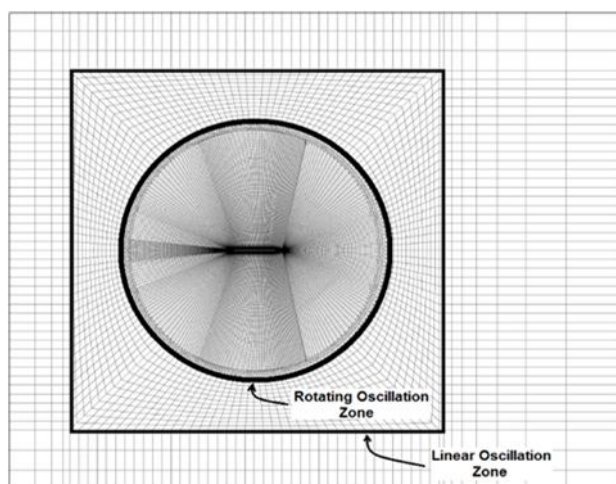
۵- مدل سازی عددی

۵-۱- مدل سازی هندسی

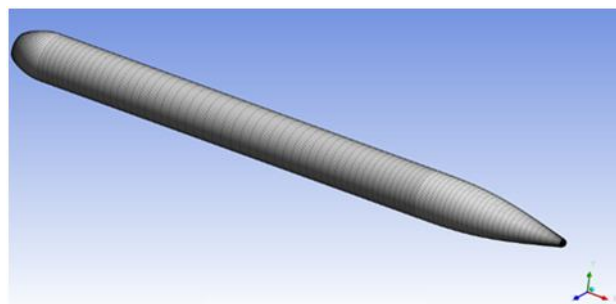
مسئله حاضر یک مسئله سه بعدی غیر پایا به همراه شبکه بندی سازمان یافته می‌باشد که با کمک قابلیت مش متحرک حرکات اجباری هیو و پیچ خالص به صورت یک کد به زیرسطحی اعمال می‌گردد. هندسه و ناحیه بندی سیال به گونه‌ای است که زیرسطحی بتواند هر دو مانور هیو و پیچ خالص را انجام دهد. مطابق شکل ۶ هندسه از چهار ناحیه اصلی تشکیل شده است: ناحیه اول ناحیه لایه مرزی حول جسم به منظور ارائه شبکه بندی مناسب جهت تخمین بهتر اثرات لایه مرزی است، ناحیه دوم موسوم به ناحیه نوسان چرخشی^{۳۷} است که شامل یک کره در اطراف جسم می‌باشد، ناحیه سوم موسوم به ناحیه نوسان خطی^{۳۸} است که یک هندسه مکعبی می‌باشد و نهایتاً ناحیه چهارم موسوم به ناحیه تغییر شکل دهنده^{۳۹} در اثر حرکت دو ناحیه کروی و مکعبی می‌باشد که به منظور ایجاد فضای مورد نیاز برای ناحیه ویک^{۳۰} پشت جسم می‌باشد.

۵-۲- شبکه بندی و بررسی استقلال از مش

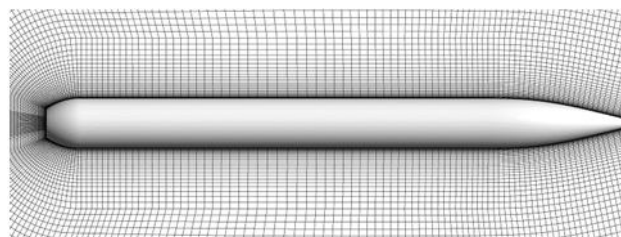
شبکه بندی این هندسه به صورت سازمان یافته چهاروجهی می باشد. به منظور تولید انواع مانورها شبکه بندی به دو ناحیه چرخشی و انتقالی تقسیم بندی شده است تا امکان انجام انواع مانورهای هیو و پیچ خالص، رول^{۳۳} و مانور سرچ^{۳۴} را امکان پذیر کند. در شکل های ۸ تا ۱۰ شبکه بندی اطراف زیرسطحی و روی دیواره آن نمایش داده شده است.



شکل ۸ - شبکه بندی سازمان یافته به همراه ناحیه بندی شبکه

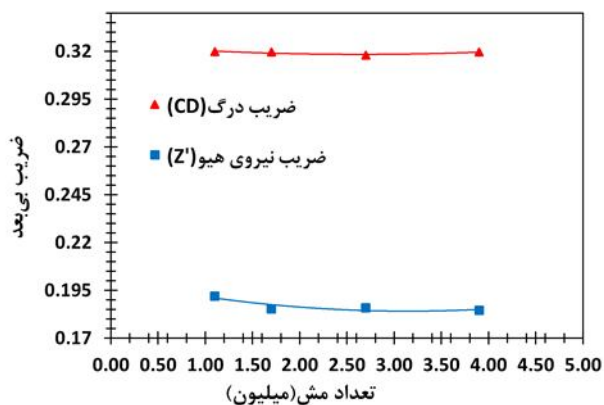


شکل ۹ - شبکه بندی روی بدنه زیرسطحی هیدرولوب ۵۰۰

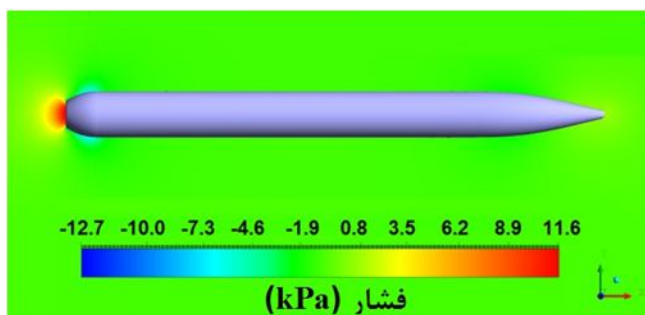


شکل ۱۰ - شبکه بندی منظم در ناحیه اطراف جسم

مشاهده اثرات دیواره از تابع دیواره استاندارد^{۳۵} استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل^{۳۶} به منظور 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 شکل ۱۱ 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 γ^+ آن برابر ۷۵ می باشد. در شکل های ۱۲ و ۱۳ نمونه ای از توزیع فشار و توزیع سرعت اطراف جسم نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ توزیع فشار روی دماغه به علت شرایط نقطه سکون بیشینه بوده و به تدریج در طول دماغه جسم به فشار محیط اطراف می رسد. با توجه به اینکه جدایش جریان وجود ندارد، اغلب توزیع فشار حول جسم همان توزیع فشار بیرون لایه مرزی می باشد. با توجه به شکل ۱۳ در حرکت هیو خالص با نوسان جسم ناحیه ویک همراه جسم نوسان می کند، این نوسان به گونه ای است که تاریخچه ای از خود ندارد و هم فاز با حرکت جسم و در راستای محور آن است. مقدار گام زمانی ۱ میلی ثانیه از بین گام های زمانی ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ ثانیه به عنوان گام زمانی مناسب انتخاب گشته است.



شکل ۱۱ - استقلال از مش

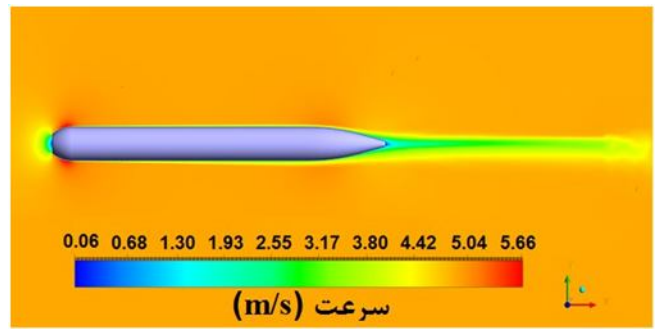


شکل ۱۲ - توزیع فشار اطراف زیرسطحی برای حرکت هیو خالص

برای بررسی استقلال از وابستگی به شبکه، ۵ شبکه بندی انتخاب شده است. برای این منظور دو پارامتر ضریب درگ و مشتق هیدرودینامیکی Z_w مورد بررسی قرار گرفته اند. به منظور حل جریان توربولانس از مدل $k - \epsilon$ Realizable استفاده شده است. برای



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



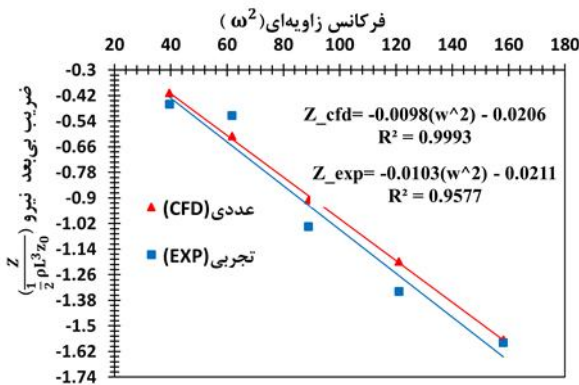
شکل ۱۳ - توزیع سرعت اطراف زیرسطحی برای حرکت هیو خالص

۵- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی داده‌های عددی تست‌های تجربی بر روی مدل زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ انجام گرفته است. تجهیزات نصب شده در تونل آب جهت انجام تست‌های استاتیکی و دینامیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دستگاه طراحی شده از سه بخش اصلی استینگ، نوسانگرها و سیستم کنترل جابه‌جایی و تغییر زاویه مدل تشکیل شده است. استینگ اتصال دهنده 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 قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است مدل زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ توسط یک میله نگه‌دارنده به مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM) متصل شده است. یک نیروسنج شش مؤلفه‌ای موسوم به بالانس شش درجه آزادی درون جسم به منظور داده برداری 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 شش مؤلفه‌ای با خطای ماکزیمم ۰/۱ درصد بار ماکزیمم (F=20) توسط سیستم‌های داده برداری جمع‌آوری شده و سپس داده‌های مفید استخراج می‌شوند. تست‌های تجربی هیو خالص در فرکانس‌های 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 مدل سازی گشته‌اند. تست‌های تجربی در تونل آب پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانه‌های دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است.

۶- نتایج و تحلیل

با توجه به روابط (۸ و ۷) در هر رابطه با رسم ضریب A/a_0 برحسب ω^2 می‌توان به مقدار Z_w و M_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'_w

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

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

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 ارائه شده 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

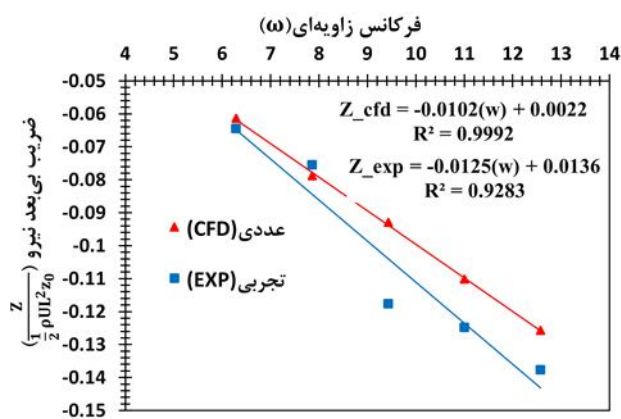
Z'_q	Z'_q	M'_q	M'_q
۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۵۵۴۵	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۰۲۰۲

۷ - جمع بندی

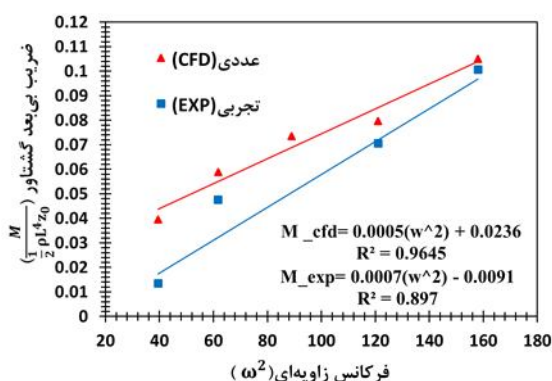
در این مقاله یک روش عددی-نیمه تجربی برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی بر پایه مانورهای هیو و پیچ خالص ارائه شد. در این روش مشتقات هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ به کمک کدهای دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده است و با نتایج به دست آمده برای بالک‌های زیرسطحی از روش نیمه تجربی ادغام گشته است. با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

کلید واژگان

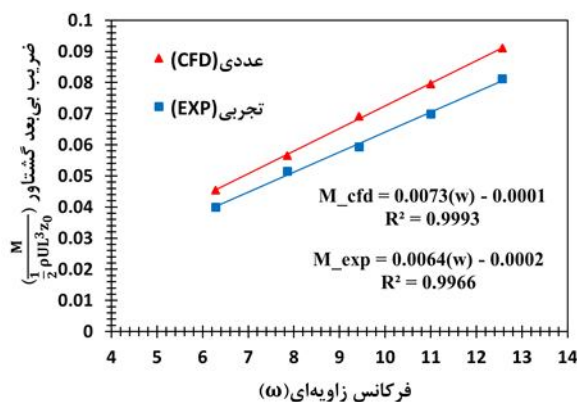
- 1- AUV: Autonomous Underwater Vehicle
- 2- Hydrodynamic Derivatives
- 3- Damping Coefficient
- 4- Added Mass Coefficient
- 5- PMM: Planar Motion Mechanism
- 6- CFD: Computational Fluid Dynamics
- 7- $k - \varepsilon$



شکل ۱۶ - نمودار مربوط به Z'_w



شکل ۱۷ - نمودار مربوط به M'_w



شکل ۱۸ - نمودار مربوط به M'_w

در جدول (۳) نتایج عددی مربوط به حرکت هیو خالص به همراه نتایج تجربی به منظور صحت‌سنجی داده‌های عددی آورده شده است. با توجه به این جدول، مقدار خطای تخمین Z'_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'_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

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 Research 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.

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 $k - \epsilon$

24- Standard $k - \epsilon$

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*