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

نوروزمحمد نوری (*، کریم مصطفی پور ۲، سیدحسن حسن پور ۳

ا 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

طلاعات مقاله	چکیدہ
اریخچه مقاله:	افزایش استفاده از وسایل زیرسطحی خودکنترل منجر به ایجاد حساسیت بیشتری در طراحی آنها شده
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵	است. موضوع اکثر مطالعات طراحی زیرسطحیها روی بحث کاهش درگ، فرمانپذیری مناسب و پایداری
ناریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲	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
ئلمات كليدى:	با استفاده از ترکیب روش عددی و نیمه تجربی تخمین زدهشده است. در این روش ابتدا مشتقات
مشتقات هيدروديناميكي	هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی با اعمال حرکات نوسانی اجباری هیو و پیچ خالص با استفاده از یک مدل
دینامیک سیالات محاسباتی	عددی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی تخمین زده شده است و سپس به کمک فرمولهای نیمه
روش عددی-نیمه تجربی	تجربى مقادير مشتقات هيدروديناميكي مربوط به بالكها اضافه گشته است. بهمنظور اعتبار سنجى نتايج
نست PMM	مدل ارائهشده، تست تجربی موسوم به تست PMM با استفاده از تست.های 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 Mostafapour², Seyed Hassan Hassanpour³

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.

۱ – مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و با توجه به افزایش اهمیت منابع عمیق دریایی، کاربرد وسایل زیرسطحی خودکنترل^۱ در حوزههای وسیعی همچون صنعت دفاعي، محافظت و نگهباني محلي، كشف و استخراج مواد معدنی و هیدروکربنی، محافظت و نگهداری خط وط انتقال نفتی و همچنین نصب تجهیزات دریایی گسترش یافته است. لذا مأموريتهاى قابل انتظار از اين وسايل بهمرورزمان پيچيدهتر و چالشى تر شده است. بەمنظور عملكرد مناسب اين وسايل، اطمينان 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") و مشتقات شتابی(مشتقات جرم افزوده[†]) تقسیم بندی می شوند. مشتقات استاتیکی ناشی از سرعت خطی وسیله هستند، مشتقات چرخشی ناشی از سرعت دورانی و مشتقات شتابی ناشی از شتاب خطی و دورانی وسیله می باشند. تخمین مشتقات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی با چهار روش تحلیلی، نیمه تجربی، تجربی و عددی انجام می شود. 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 دليل حذف اثرات لزجت جواب درستی نمیدهد. روش نیمه تجربی نیز برای هندسههایی با پیچیدگی زیاد بکار گرفته نمی شود و اغلب با فرض جریان پتانسیل میاشد. در روش تجربی، تست مکانیزم حرکت صفحهای (PMM)^۵ موثرترین راه برای محاسبه مشتقات می اشد ولی مستلزم ابزارها و امکانات خاص آزمایشگاهی است کـه زمـانبر و یـر هزينه هستند و لذا براي طراحي مقدماتي صرفه اقتصادي ندارد. روشهای دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)² 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 کردہ 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 ديناميك سيالات محاسباتي براي محاسبه مشتقات هيدروديناميكي استفاده شده است. وو و همکارانش [۱] حرکت پایا مستقیم الخط 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 بهدست آمده را با دقت بالایی محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه کردهاند. زییا و همکارانش [۲] با استفاده از نرمافزار CFX به شبیه سازی مانور برای زیر سطحی CR-02 پرداختــهانــد. مــدل كــى⊣پسـيلون^۷ بـراى محاســبه مشــتقات هیدرودینامیکی مکانی و روش کی⊣ومگا^۸ برای ضرایب چرخشی و سایر ضرایب کوپله هیدرودینامیکی بکار گرفته شده است. نتایج حاصله از شبیه سازی عددی با نتایج موجود از تست دریاچه تجربی همخوانی داشته است. واز و همکارانش[۳] با تمرکز بر پیشبینی دقيق نيروهاي مانورينگ زيرسطحي 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 رضایت بخش بوده و با دادههای تجربی همخوانی داشته است. تیاگی و همکارانش [۴] به کمک CFD و با استفاده از معادلات ناویر - استوکس میانگین گیری شده رینولدز (RANS)^۱ در نرمافزار فلوئنت^۱ 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 بهدست آمده 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 بیضی گون با نسبت ابعادی ۶:۱ پرداختهاند و با استفاده از نرمافزار فلوئنت و قابلیت مش متحرك" و چند ناحيه كردن ميدان محاسباتي بهمنظ ور اعمال حرکتهای هیو^{۱۲} 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 مدل سازی معادلات ناپاياي ناوير - استوكس با ميانگين گيري رينولدز

(URANS) به شبیه سازی تست های PMM برای نمونه مدل زیرسطحی Autosub در حرکت سووی خالص به محاسبه مشتقات هيدروديناميكي پرداختهاند. محاسبه مشتقات هيدروديناميكي يك زيرسطحي به همراه بالک بروش عددي در جريان غير پايا پرهزينه و زمانبر است.

بهمنظور کاهش هزینه محاسباتی، در این مقاله یک مدل عددی-نيمه تجربي جهت تخمين مشتقات هيدروديناميكي زيرسطحي 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 تستهای تجربی اعتبارسنجی شده است و همچنین روش حل عددی نیز صحت سنجی^{۱۷} گشته است. نتایج بهدستآمده نشان از دقت مطلوب این مدل دارند.

۲ – توصيف زير سطحي هيدرولب ۵۰۰

هندسه زيرسطحي هيدرولب ۵۰۰ يک هندسه بهينهشده بهمنظور انجام مأموریت های دریایی در قالب یک AUV مے باشد 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 هيدرولب ۵۰۰ قيودي ازجمله قيد عدم جدايش، عدم كاويتاسيون و همچنین کمینه بودن نیروی مقاوم سیال به همراه قید بیشینه بودن حجم زيرسطحي لحاظ گشته است. بهينهسازي روي تمامي پارامترهای طولی، پروفیلهای دماغه و دم انجام شده است. در شـکل۱ و ۲ نمـایی کلـی از هندسـه هیـدرولب۵۰۰ بـه همـراه 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 هیدرولب۵۰۰



۵.	هيدرولب.	ر سطحی ہ	د طولی ز ی	ِهای بیبع	– پارامتر	جدول ۱
dt/D	dn/D	Lt/D	Lm/D	Ln/D	L/D	طول بیبعد
٠/۴	• 8	٣	۶	١	١٠	مقدار

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 جدول۲ پارامترهای بی بعد مربوط به مشتقات هیدرودینامیکی بکار رفته در مطالعه حاضر لیست شده است.



شکل ۳ – معرفی انواع مانورها و دستگاه مختصات

	بالبيالي		ن ، روب ب بیب	JJ-- .
	رابطه	ضرایب بیبعد پیچ خالص	رابطه	ضرایب بیبعد هیو خالص
_	$\frac{2Z_{i}}{\rho L^{4}}$	$\mathbf{Z}'_{\dot{\mathbf{q}}}$	$\frac{2Z_{w}}{\rho L^{3}}$	$\mathbf{Z}'_{\dot{\mathbf{w}}}$
	$\frac{2Z_{q}}{\rho U_{0}L^{3}}$	$\mathbf{Z}_{\mathbf{q}}'$	$\frac{2Z_{w}}{\rho U_{0}L^{2}}$	$\mathbf{Z}_{\mathbf{w}}^{\prime}$
	$\frac{2M_{i}}{\rho L^{5}}$	$\mathbf{M}'_{\dot{\mathbf{q}}}$	$\frac{2M_{v}}{\rho L^{4}}$	$\mathbf{M}'_{\dot{\mathbf{w}}}$
-	$\frac{2M_{q}}{\rho U_{0}L^{4}}$	M′q	$\frac{2M_{v}}{\rho U_{0}L^{3}}$	$\mathbf{M}_{\mathbf{w}}'$

هيدروديناميكى	مشتقات	بىبعد	۲ – روابط	جدول

۳ – فرآیند تئوری تخمین مشتقات هیدرودینامیکی به منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی می ایست معادلات حاکم بر دینامیک جسم صلب آن را استخراج کرد. این معادلات در سیستم مختصات متصل به بدنه نوشتهمی-شوند و به صورت زیر بیان می شوند:

$$Z = (m - Z_w).\dot{w} + (m x_G - Z_q).\dot{q} - Z_w.w + (m. U_0 - Z_q).q$$
(1)

$$M = (m x_G - M_w).\dot{w} + (I_z - M_{\dot{q}}).\dot{q} - M_w.w + (m x_G U_0 - M_q).q$$

با حذف اثرات جرم و اینرسی بدنه(m, I = 0) و قرار دادن دستگاه مختصات بدنی روی مرکز جرم زیرسطحی $(m, Z_G, y_G, z_G = 0)$ ، تنها نیروهای خالص وارده از طرف سیال به دست میآیند. در این مقاله هدف تخمین مشتقات هیدرودینامیکی با استفاده از شبیه سازی مانورهای مکانیزم PMM می باشد. مانورهای تست PMM به دو حرکت می و خالص و پیچ خالص تقسیم بندی می شوند. در حرکت هیو خالص، همانطورکه 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 نوسان می کند. در زیر معادلات دینامیکی حاکم بر این حرکت با توجه به اینکه q = q = 0 ورده شده اند.

$$\begin{cases} Z = -Z_{w} \cdot \dot{w} - Z_{w} \cdot w \\ M = -M_{w} \cdot \dot{w} - M_{w} \cdot w \end{cases}$$
(7)



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

$$z = a_o \sin \omega t$$

$$w = \dot{z} = a_o \omega \cos \omega t$$

$$\dot{w} = \dot{z} = -a_o \omega^2 \sin \omega t$$
(7)

در کار حاضر مقدار دامنه نوسانات (a_o) برابر ۱ سانتیمتر میباشد. در حرکت پیچ خالص همانطور که 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 نمی کند. در این حرکت w = w = 0 و معادلات دینامیکی به صورت زیر خلاصه می شوند.



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

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

مقدار دامنه نوسانات چرخشی (φ_0)برابر ۴/۳ درجه میباشد. پس از محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه میبایست اثرات بالک را که از نتایج نیمه تجربی حاصل شده به نتایج مربوط به بدنـه اضـافه کـرد. روابـط نیمـه تجربـی مربـوط بـه هیـدروفویلهـای هیدرولب ۵۰۰ با اسـتفاده از کـد توسعه دادهشـده 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 ایـن ضرایب، توربولانس بودن جریان در ابتدای بالک بـهواسـطه جریـان متأثر از بدنه لحاظ گشته است.

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

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.

$$\begin{bmatrix} Z_{w} = \frac{A}{a_0 \omega^2}, Z_w = \frac{-B}{a_0 \omega} \\ M_{w} = \frac{A}{a_0 \omega^2}, M_w = \frac{-B}{a_0 \omega} \end{bmatrix}$$
(Y)

مانور هيو خالص:

زير آورده شده اند:

مانور پيچ خالص:

$$\begin{cases} Z_{q} = \frac{A}{\theta_{0}\omega^{2}}, Z_{q} = \frac{-B}{\theta_{0}\omega} \\ M_{q} = \frac{A}{\theta_{0}\omega^{2}}, M_{q} = \frac{-B}{\theta_{0}\omega} \end{cases}$$
(A)

۴ - معادلات اساسی حاکم

در این مقاله به منظور محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ 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:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{9}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \qquad (1 \cdot)$$

مقدار عدد رینولدز طولی برای جریان عبوری از روی مدل هیدرولب ۵۰۰ برابر (6+)2E میباشد لذا جریان توربولانس است. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، میتوان به کمک عبارات میانگین گیری شده زمانی سرعت و فشار به نوع دیگری از معادلات ناویر استوکس ۲۰ موسوم به معادلات RANS رسید:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} \end{pmatrix} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} =$$

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

$$(11)$$

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

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_i \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$
(17)

در رابطه بالا µ_t مبین لزجت توربولانسی^{۲۲} است که باتوجه به مدل توربولانسی انتخابی مدلسازی میشود. در ایـن مقالـه بـهمنظـور مدل سازی جریان توربولانس از مـدل توربولانسـی کـی-اپسـیلون

ریئلایزیبل^{۳۲} استفاده شده است. روش ریئلایزیبل توسعهیافته روش استاندارد کی-اپسیلون^{۳۴} میباشد و دو تغییر اساسی نسبت به ایـن روش یافته است. در این روش از معادلـه جدیـدی بـرای محاسـبه لزجت توربولانی استفاده شده است و همچنین معادله انتقـال نـرخ ازمهلال^{۲۵} از معادلهایـی بـرای انتقـال میـانگین مربعـات نوسـانات ورتیسیتی اقتباس گشته است. پیش بینی دقیق تر نرخ گسترش جتهای صفحهایی و دوار، عملکرد پیش بینی دقیق تر نرخ گسترش جتهای صفحهایی و دوار، عملکرد معکوس قوی، جدایش جریان و جریانهای گردشی از مزیـتهـای روش $k - \varepsilon$ Realizible در روش Realizible در معادلات مدل شده انتقـال بـرای k و 3 در روش Realizible در

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho k u_{j}) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] + G_{k} + G_{b} - \rho \varepsilon - Y_{M} + S_{K}$$

$$(17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho\varepsilon u_{j}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right] + \rho C_{1}S\varepsilon - \rho C_{2}\frac{\varepsilon^{2}}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_{b} + S_{\varepsilon}$$
(14)

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 عبارات منبع میباشند که توسط کاربر تعریف میشوند. σ_k و σ_b عبارات منبع میباشند که توسط کاربر تعریف میشوند. ازمهلال آن هستند. مشابه سایر مدلهای $\mathcal{F} = \mathcal{F}$ لزجت گردابهایی^{۲۶} از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{10}$$

در مدل C_{μ} ، $k - \varepsilon$ Realizible دیگر ثابت نبوده و از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{19}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \tag{1Y}$$

.22.9.5

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{11}$$

در معادله بالا $\overline{\Omega_{lJ}}$ 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:

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

بقسمی که
$${\Phi}$$
 از رابطه زیر استخراجمیشود:

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \, \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3} \right)$$
$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$
(7.)

میتوان نشان داد که \mathcal{C}_{μ} تابعی از کرنش متوسط، نـرخ چـرخش، سرعت زاویهایی سیسـتم دوار و انـرژی جنبشـی توربـولانی و نـرخ ازمهلال آن است. مقدار استاندارد \mathcal{C}_{μ} در زیرلایه اینرسی لایه مرزی تعادلی برابر ۰/۰۹ است. مقادیر ثوابت مدل بشرح زیر است[8,9]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.2$$
 (11)

۵- مدل سازی عددی

۵-۱-۵ مدل سازی هندسی

مسئله حاضر یک مسئله سهبعدی غیر پایا به همراه شبکهبندی سازمان یافته میباشد که با کمک قابلیت مش متحرک حرکات اجباری هیو و پیچ خالص به صورت یک کد به زیرسطحی اعمال می گردد. هندسه و ناحیه بندی سیال به گونه ای 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 شبکهبندی مناسب جهت تخمین بهتر اثرات لایه مرزی است، ناحیه دوم موسوم به ناحیه نوسان چرخشی^{۲۲} است که شامل یک کره در اطراف جسم می-باشد، ناحیه سوم موسوم به ناحیه نوسان خطی^{۲۸} است که یک هندسه مکعبی میباشد و نهایتاً ناحیه چهارم موسوم به ناحیه تغییر شکل دهنده^{۴۰} 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 منظور کاهش زمان محاسبات، ورودی سرعت قرار داده شدهاند. با بعد طولی^{۳۱} برابر ۱ میلیمتر و شدت توربولانسی^{۳۲} در ورودی برابر ۱/۰ درصد جایگذاری گشته است.



شکل ۷ –شرایط مرزی

۵-۲- شبکه بندی و بررسی استقلال از مش شبکهبندی این هندسه به صورت سازمان یافته چهاروجهی میباشد. به منظور تولید انواع مانورها شبکهبندی به دو ناحیه چرخشی و انتقالی تقسیم بندی شده است تا امکان انجام انواع مانورهای هیو و پیچ خالص، رول^{۳۳} و مانور سرج^{۳۴} را امکان پذیر کند. در شکلهای ۸ تا ۱۰ شبکهبندی اطراف زیر سطحی 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_{ik} موردبررسی قرار گرفتهاند. 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 سیمیل^{۳۶} بهمنظور محاسبه میدان فشار، تقریب مرتبه اول بالادستی^{۳۷} برای تقریب معادله انتقال توربولانی و تقریب مرتبه دوم^{۲۸} 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 شکلهای ۱۲ و ۱۳ نمونهایی از توزيع فشار و توزيع سرعت اطراف جسم نشان داده شده است. با توجه به شکل۱۲ توزیع فشار روی دماغه به علت شرایط نقطه سكون بیشینه بوده و بهتدریج در طول دماغه جسم به فشار محیط اطراف مىرسد. با توجه به اينكه جدايش جريان وجود ندارد، اغلب توزيع فشار حول جسم همان توزيع فشار بيرون لايه مرزى مى-باشد. با توجه به شکل ۱۳ در حرکت هیو خالص با نوسان جسم ناحیه ویک همراه جسم نوسان میکند، این نوسان به گونهای است که تاریخچهای از خود ندارد و همفاز با حرکت جسم و در راستای محور آن است. مقدار گام زمانی ۱ میلی ثانیه از بین گامهای زمانی ۰/۰۰۱ ، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۰۵ ثانیه بهعنوان گام زمانی مناسب انتخاب گشته است.











شكل ١٣ – توزيع سرعت اطراف زيرسطحي براي حركت هيو خالص

۵ – اعتبار سنجی

بهمنظور اعتبارسنجی دادههای عددی تستهای تجربی بر روی مـدل زيرسـطحي هيـدرولب ٥٠٠ انجـام گرفتـه اسـت. تجهيـزات نصب شده در تونل آب جهت انجام تستهای استاتیکی و دینامیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دستگاه طراحی شده از سه بخش اصلى استينگ، نوسانگرها و سيستم كنترل جابهجايم، 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 می کند. توابع حرکت موردنیاز برای ایجاد انواع مانور توسط دو نوسانگر از سيستم تنظيم وكنترل به مدل انتقال پيدا مىكند. اين نوسانگرها یکی در جلو و دیگری در عقب استینگ قرارگرفته است. همانطورکیه در شیکل۱۴ مشیخص اسیت میدل زیرسیطحی هیدرولب ۵۰۰ توسط یک میله نگهدارنده به مکانیزم حرکت صفحهای(PMM) متصل شده است. یک نیروسنج شـشمؤلفهای موسوم به بالانس شش درجه آزادی درون جسم بهمنظور دادهبرداری لحظهای نیروها و گشتاورها تعبیه گشته است. راستای بارهای اندازه گیری توسط بالانس با راستای محورهای متصل به بدنه یکسان میباشد. بنابراین نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی در راستای مختصات ثابت به بدنه اندازه گیری می شوند. 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 جمع آوری شده و سپس دادههای مفید استخراج می شوند. 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 تونال آب پژوهشکده هیدرودینامیک کاربردی و سامانههای دریایی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است.



شکل ۱۴ – بخشی از تونل آب، مدل زیر سطحی و مکانیزم تولید مانورها

۶- نتایج و تحلیل

با توجه به روابط(V_{e}) در هر رابطه با رسم ضریب A/a_0 برحسب $^{0}M_{a_0}$ برحسب $^{0}M_{a_0}$ می توان به مقدار Z_{w} و M_{w} رسید و با رسم B/a_0 برحسب ω ω می توان به مقدار Z_{w} و M_w رسید. برای حرکت پیچ خالص نیز می توان 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 بی بعد مشتقات هیدرودینامیکی می باشد.



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





 M'_w شکل ۱۸ – نمودار مربوط به

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'_W کمتر از مشتقات دیگر است چراکه این ضریب تأثیر بسیار کمی از اثرات لزجت و خطاهای مدل سازی مربوط به جریان توربولانس می پذیرد 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 نیروها و گشتاورها تأثیر بیشتری از خطاهای عددی پذیرفته است. این ادعا با مشاهده به دو داده آخر نمودار شکل(۱۷) که نشان می دهند

شیب نمودارهای عـددی و تجربـی در فرکـانسهـای بـالا بـه هـم نزدیک تر میشوند اثبات کرد. و این به دلیل مقادیر بیشتر نیروها در فرکانسهای بالاتر میباشد.

کت هیو خالص	بنامیکی بیبعد حر آ	–مشتقات هيدرود	جدول ۳
%Error	$EXP \\ a_0 = 1cm$	$\begin{array}{c} \text{CFD} \\ a_0 = 1 cm \end{array}$	ضرايب
۴/۶	•/• ١•٣	۰/۰۰۹۸	$\mathbf{Z}'_{\dot{W}}$
۱۸/۴	۰/۰ ۱۲۵	•/• \ • ٢	$\mathbf{Z}'_{\mathbf{w}}$
۲۸/۶	•/•••¥	•/•••۵	Μ′ _{ẅ́}
14/1	•/•••\$4	•/•••٧٢	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 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'q	$\mathbf{Z}_{\mathbf{q}}'$	Μģ	M′q
•/•••*۶	•/••۵۵۴۵	•/•••٧١	•/••٢•٢

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 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 می دهد که تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی وجود دارد. استفاده از مدل ارائه شده هزینه محاسباتی برای تخمین پارامترهای موردنیاز مربوط به نیروها و گشتاورها در فرآیند طراحی تفصیلی AUV ها را می تواند کاهش دهد.

کليد 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- $k - \varepsilon$

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.

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