



استخراج ضرایب هیدرودینامیک با استفاده از مانور مکانیزم حرکت صفحه‌ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

جواد امینی فروشانی^۱ و محمد گندم‌کار^{۲*}

^۱ پژوهشگر مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری‌های زیردریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، ایران

^۲ استادیار دانشکده علوم و مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۵

چکیده

در این مقاله نحوه استخراج برخی از ضرایب هیدرودینامیک یک رونده زیرسطحی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، ارائه شده و نتایج آن با نتایج تجربی مدل هندسی دارپا سابوف موجود در مراجع مقایسه شده است. در این روش با استفاده از شبیه‌سازی برخی مانورهای دینامیک استاندارد، مانند مانور یاو خالص و سوای خالص، تعدادی از ضرایب هیدرودینامیک شامل، ضرایب خطی Y_v ، Y_ψ ، N_v و N_ψ و ضرایب Y_r ، Y_f ، N_r ، N_f در صفحه یاو قابل استخراج هستند. با تغییر صفحه مانور از یاو به پیچ، هشت ضریب دیگر نیز قابل استحصال خواهد بود. تحلیل عددی مطابق با شرایط ذکر شده برای تست تجربی مدل سابوف، در مراجع انجام گرفته و نمودارهای نیرو و ممان به صورت تابعی از زمان ارائه شده‌اند. با به کار بردن معادلات دینامیکی حرکت متناظر با نقاط خاص شامل، نقاط صفر شدن سرعت و یا شتاب جانبی وسیله، ضرایب هیدرودینامیک مربوط به هندسه مورد نظر استخراج می‌شود. نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج حاصل از تست تجربی، مقایسه و نشان داده شده است که از این روش برای استخراج ضرایب هیدرودینامیک با دقت مناسبی می‌توان بهره برد و تطابق خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی دیده می‌شود.

کلمات کلیدی: رونده زیرسطحی؛ ضرایب هیدرودینامیک؛ مانورهای دینامیکی؛ دینامیک سیالات محاسباتی.

Extraction of Hydrodynamic Coefficients Applying Planning Mechanism Motion Maneuver Using Computational Fluid Dynamics

J. Amini Foroushani¹, M. Gandomkar^{2,*}

¹ Researcher, Dept. Marine Sci. and Eng., Malek-e Ashtar University of Technology., Isfahan, Iran.

² Assist. Prof., Dept. Marine Sci. and Eng., Malek-e Ashtar Uni. Tech., Isfahan, Iran.

Abstract

This article describes how to extract some hydrodynamic coefficients of an underwater vehicle using computational fluid dynamics, and has been implemented on DARPA Suboff geometric model. In this article, a procedure has been provided to efficiently extract hydrodynamic coefficients, without using mesh regeneration for each maneuver. In this method by using simulation of some standard dynamic maneuvers, such as pure yaw and pure sway, a number of hydrodynamic coefficients have been obtained such as Y_v , Y_ψ , N_v , N_ψ and Y_r , Y_f , N_r , N_f . The parameters, required for numerical analysis, are geometry, center of mass and velocity of underwater vehicle. Using numerical analysis, hydrodynamic forces and moments have been plotted as functions of time. Hydrodynamic coefficients in relevant to the desired geometry is derived by investigation on the equations of motion in sinusoidal maneuver at specific points such as zero lateral velocity or zero acceleration points. The results of the present procedure have been compared with the experimental results that reported in the literature and a good agreement between analytical and experimental results has been observed.

Keywords: Underwater Vehicle; Hydrodynamic Coefficients; Dynamic Maneuvers; Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

تعیین رفتار حرکتی و کنترل یک رونده زیر سطحی، تابع معادلات دینامیک حرکت حاکم بر آن جسم است که این معادلات دینامیک حرکت برای پیش‌بینی رفتار و مسیر حرکت جسم در شبیه‌سازی حرکت رونده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادلات دینامیک حرکت یک رونده، متشکل از معادلات کلی دینامیک و ضرایبی است که به ضرایب هیدرودینامیک رونده معروف هستند. این معادلات در یک طرف دارای جملات نیرو یا ممان هستند که از طرف سیال و سایر بارهای خارجی به جسم وارد می‌شوند و در طرف دیگر، بردارهای وضعیت سیستم مانند، سرعت‌ها و شتاب‌ها قرار دارند. برای شبیه‌سازی مسیر حرکت با استفاده از معادلات دینامیک، از روش پیشروی زمانی^۱ با روند صریح استفاده می‌شود که یکی از روش‌های حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای بوده، بر مبنای روش‌های تکرار است. در تحلیل حرکت دینامیک به روش تکرار، وضعیت اولیه سیستم به عنوان نقطه شروع حلقه تکرار انتخاب می‌شود. با استفاده از اطلاعات تکرار قبلی در تکرار بعدی مساله تا رسیدن به نتیجه مورد نظر دنبال می‌شود. در روش‌های صریح، عموماً تکرار در مورد پارامتر زمان صورت می‌گیرد که ممکن است، زمان واقعی یا یک بازه زمانی مجازی باشد. در مورد تکرار زمانی صریح^۲، شرایط زمان کنونی سیستم، مبنای حرکت سیستم در طول بازه زمانی بعدی است. این روش تحلیل در مسائل دینامیک، کاربرد فراوان دارد.

با داشتن نیرو و ممان وابسته به وضعیت جسم، می‌توان تحلیل را شروع و مقادیر سرعت و شتاب جسم را برای گام زمانی بعدی پیش‌بینی کرد. راه‌های مختلفی برای تعیین نیرو و ممان در هر لحظه و با توجه به وضعیت جسم وجود دارد که یکی از این روش‌ها، استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه مستقیم نیروها و ممان‌ها روی جسم است. پس از آن با حل معادلات دینامیک، وضعیت سیستم در گام فعلی بدست آمده است و دوباره با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی در شرایط جدید، نیروها و ممان‌ها بدست خواهند آمد. این روش مطمئن و کاراست؛

ولی برای مسائل شامل، تعداد زیاد گام زمانی و تغییرات همزمان سطوح کنترل به لحاظ زمان و هزینه به صرفه نیست و مدت زمان حل معمولاً بسته به امکانات سخت‌افزاری، از چند ساعت تا چند روز طول می‌کشد و تحلیل اجباراً باید به صورت پردازش موازی و ترجیحاً با استفاده از ابر رایانه انجام گیرد.

روش دیگر تعیین نیرو و ممان در هر لحظه، استفاده از بسط سری تیلور جملات نیرو و ممان بر اساس متغیرهای اثرگذار در آنهاست. این بسط به صورتی است که ترم‌های نیرو و ممان به صورت خطی یا غیر خطی، به متغیرهای سرعت و شتاب جسم وابسته می‌شود؛ بنابراین در این روش ضرایب به‌وجود می‌آید که به آن‌ها ضرایب هیدرودینامیک گفته می‌شود.

یکی از روش‌های تعیین ضرایب، استفاده از تست تجربی و آزمایش است که می‌تواند با دقت بالایی ضرایب را تعیین کند. تست حرکت موج اغتشاشی^۳، تست بازوی چرخان^۴، تست یاو خالص^۵، تست سوای خالص^۶ و تست حرکت مخروطی^۷، از جمله تست‌های تجربی هستند که در این زمینه انجام می‌شود.

روش دیگر برای استخراج ضرایب هیدرودینامیک، استفاده از نرم افزارهای موجود تخمین ضرایب، مانند میسایل دات کام^۸ و پارامارین^۹ است که بر اساس بانک‌های اطلاعاتی برگرفته از تست‌های تجربی و استفاده از روابط نیمه تجربی ضرایب را ارائه می‌دهند. در این میان، نرم افزار پارامارین به طور خاص در حوزه دریا است؛ ولی هندسه‌هایی که می‌تواند توسط آن تحلیل شود، باید دارای شرایط خاص باشد تا خطای محاسبات در حد قابل قبول واقع شود و این موضوع برای طراح محدودیت ایجاد می‌کند.

روش دیگر برای استخراج ضرایب دینامیک، استفاده از روش‌های عددی و در این میان استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی است که در آن از شبیه‌سازی مانورهای دینامیکی و استخراج ضرایب استفاده شده، می‌تواند جایگزین مناسبی

³ Perturbed Surge Motion

⁴ Rotating Arm Test

⁵ Pure Yaw Test

⁶ Pure Sway Test

⁷ Coning Motion

⁸ Missile DATCOM

⁹ Paramarine

¹ Time marching

² Explicit Time Integration

معادلات خطی نیز زیر مجموعه آن قرار می‌گیرند [۸]. در یک پژوهش تجربی آقای آذرسینا با استفاده از مانورهای نوسانی روی یک مدل رونده زیرسطحی و انجام تجربی، مانورها دینامیک نیروهای وارد بر رونده را نسبت به زمان ثبت کرد و با استفاده از روابط معادلات دینامیک، اقدام به استخراج ضرایب دینامیک رونده کرد و نشان داد که در مانورهای دینامیک مختلف ممکن است، ضرایب یکسان با یکدیگر تفاوت داشته باشند [۹]. پن^۵ و همکاران، با مدل‌سازی مانورهای نوسانی ضرایب هیدرو دینامیکی سابوف را محاسبه کردند. در این تحقیق از شبکه دینامیک برای ایجاد حرکت نوسانی استفاده شده است. زمان مورد نیاز جهت کامل شدن هر تحلیل عددی، حدود ۱۰۰ ساعت گزارش شده است [۱۰]. هی^۶ و همکاران، از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های تجربی برای بدست آوردن ضرایب هیدرو دینامیک استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده صرف از دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل رفتار حرکتی یک رونده، زمان به نسبت بیشتری نسبت به روش ترکیبی می‌طلبد [۱۱]. در تحقیقی دیگر از آقای پن و همکاران، ضرایب هیدرو دینامیک سابوف با استفاده از مانورهای بر اساس چرخش^۷ بدست آمد. در این روش با استفاده از شبکه متحرک، مانور بازوی چرخان شبیه سازی شد [۱۲].

مزیت استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نسبت به سایر روش‌ها، محدودیت کمتر در هندسه جسم است. آزمایش مانور در حوضچه برای هندسه‌های بزرگ مانند یک رونده زیرسطحی عملاً قابلیت ندارد، لذا باید از مدل کوچک‌تر استفاده و با بی بعدسازی و اصل تشابه، ضرایب را به طور تجربی بدست آورد که می‌تواند خطاهایی در مساله وارد کند. نرم‌افزارهای استخراج ضریب نیز، به دلیل محدودیت در نوع هندسه ورودی و میزان خطای آن‌ها، معمولاً به عنوان تخمین اولیه برای استخراج ضرایب استفاده شده، نتایج آنها جهت شبیه‌سازی و کنترل وسیله مناسب نیستند؛ اما استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، محدودیت روش‌های دیگر را همراه ندارد و از طرف دیگر، نتایج حاصل و نتایج تجربی مدل‌های مناسب مانور در حوضچه، اطمینان لازم را جهت

در تخمین ضرایب به صورت تجربی باشد. در این زمینه فعالیت‌های گسترده‌ای انجام شده و در حال انجام است. جونز^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ در یک فعالیت جامع، روش‌های استخراج ضرایب دینامیک را بررسی کردند و با استفاده از مراجع دیگر، معادلات بسط یافته خطی را ساده-سازی کردند [۱]. آذرسینا و سیف، بررسی‌هایی جامع نسبت به استخراج روابط و اصول مدلسازی دینامیک زیردریایی در مقاله خود انجام دادند که در آن روابط معادلات دینامیک حرکت با تفکیک نیروهای هیدرو دینامیکی به ضرایب جرم افزوده و میرایی فرمول‌بندی شده‌اند [۲]. شادلانانی و همکاران، نحوه استخراج ضرایب میرایی غیرخطی را با استفاده از مانورهای پایا بدنه زیردریایی سابوف بدست آوردند و روشی جدید در استخراج ضرایب جرم افزوده خطی ارائه کردند [۳]. در پژوهشی دیگر، ساوت^۲ با بررسی معادلات دینامیک حرکت رونده زیرسطحی و ساده‌سازی معادلات برای مانورهای نوسانی، نحوه استخراج ضرایب از مانورهای دینامیک نوسانی را بیان کرد [۴]. در بررسی‌های آزمایشگاهی آقای صادق زاده و همکاران، آزمون مدل مقیاس شده از یک شناور ساخته شده را در مرکز پژوهشی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف، انجام داده و با استفاده از تست حوضچه کشش، ضرایب هیدرو دینامیک رونده را استخراج و جهت استفاده در مدل‌سازی دینامیکی استفاده کردند [۵]. آقای ریشه‌ری و همکاران با تست حوضچه کشش بدنه رونده ضرایب هیدرو دینامیک را استخراج و با نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه کردند و تطابق نتایج رضایت‌بخش اعلام شده است [۶]. در مورد رونده‌های زیر سطحی، آزمایش‌های تجربی با حمایت آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی آمریکا (دارپا) صورت گرفت که با استفاده از مانورهای دینامیک نوسانی، ضرایب دینامیک یک نمونه رونده زیرسطحی بدست آمد که برای صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی از آن‌ها استفاده شد [۷]. فوسن^۴ و همکارانش، در تحقیقی معادلات دینامیک حرکت شش درجه آزادی را در حالت غیرخطی بیان کردند که

¹ Jones

² Saout

³ DARPA-Deffence Advanced Research Projects Agency

⁴ Fossen

⁵ Pan

⁶ He

⁷ Rotary based

استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی فراهم کرده است.

در این مقاله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک برای یک مدل رونده زیرسطحی ارائه شده، با نتایج تجربی برگرفته از مقالات مقایسه شده است. در روش ارائه شده در این مقاله با داشتن هندسه و مرکز جرم آن و سرعت کاری وسیله، ضرایب هیدرودینامیک مدل مورد نظر استخراج می‌شود. این مانورها به صورت عددی شبیه‌سازی شده، رفتار نیرویی آن‌ها بدست می‌آید و با پردازش این نتایج، ضرایب هیدرودینامیک بدست می‌آید.

۲- تئوری انجام آزمایش

برای تعیین نیروها و ممان‌های وارد بر جسم از دستگاه مختصات متصل به بدنه استفاده می‌شود [۱۳]. در این دستگاه مختصات محور x در امتداد محور اصلی جسم و به سمت جلو، جهت محور y به سمت راست جسم و محور z در جهت پایین جسم قرار دارد که در آن مولفه‌های نیروهای خارجی F، به صورت حروف بزرگ (X, Y, Z) و ممان ناشی از نیروهای خارجی حول مبداء O (یک نقطه فرضی دلخواه بر روی بدنه)، به صورت (K, M, N) نوشته می‌شوند. معادلات حرکت شش درجه آزادی رونده، نسبت به دستگاه متصل به بدنه به صورت ذیل نوشته شوند [۷، ۸]:

حرکت سرج^۱

$$m \begin{bmatrix} \dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) \\ + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q}) \end{bmatrix} = X \quad (1)$$

حرکت سوای^۲

$$m \begin{bmatrix} \dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) \\ + z_G(pr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r}) \end{bmatrix} = Y \quad (2)$$

حرکت هیو^۳

$$m \begin{bmatrix} \dot{w} - up + vp - z_G(p^2 + q^2) \\ + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) \end{bmatrix} = Z \quad (3)$$

حرکت رول^۴

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wq + ur)] = K \quad (4)$$

حرکت پیچ^۵

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr - (\dot{p} + rq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (pq - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (5)$$

حرکت یاو^۶

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)qp - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N \quad (6)$$

در این روابط $\vec{\alpha} = (p, q, r)$ و $\vec{V} = (u, v, w)$ سرعت خطی و زاویه‌ای در دستگاه متصل به بدنه می‌باشند و اندیس G مربوط به مرکز جرم رونده است و x_G, y_G, z_G فاصله مرکز جرم جسم نسبت به نقطه O است. نیروها و ممان‌ها همگی در مختصات متصل به بدنه و حول نقطه O اندازه‌گیری شده‌اند.

۲-۱- نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه جسم، تابع سرعت‌ها و شتاب‌های وارد بر جسم است. بر این اساس می‌توان با استفاده از بسط تیلور حول نقطه کاری وسیله، مقدار نیرو و ممان وارد شده بر جسم را در شرایط مختلف تخمین زد؛ در صورتی که تغییرات نیرو نسبت به متغیر موثر بر نیرو به صورت خطی قابل تقریب زدن باشد، لازم است که بسط تیلور تنها شامل، جمله اول و دوم باشد و مراتب بالاتر جملات در نظر گرفته نمی‌شوند. در نمونه زیر، نیروی X ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه، به صورت خطی بسط داده شده است.

$$X = X_0 + X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{v}} \dot{v} + X_{\dot{w}} \dot{w} + X_{\dot{p}} \dot{p} + X_{\dot{q}} \dot{q} + X_{\dot{r}} \dot{r} \quad (7)$$

بقیه نیروها در راستاهای دیگر و همچنین ممان‌ها نیز، به همین شکل بسط داده می‌شوند. مقدار X_0 در معادله فوق، مقدار نیروی هیدرودینامیکی وارد بر جسم بر اثر سرعت کاری وسیله یا به اصطلاح نیروی پسای^۷ وارد بر جسم در حالتی است که زاویه حمله^۸ و زاویه جانبی^۹ صفر باشند. بسط

⁵ Pitch Motion

⁶ Yaw Motion

⁷ Drag Force

⁸ Angle of Attack

⁹ Drift Angle

¹ Surge motion

² Sway Motion

³ Heave Motion

⁴ Roll Motion

و وقتی که $\dot{v} = 0$ ، بدین معنی است که $v = a_0\omega$ و نیروی اندازه‌گیری شده متناظر با رابطه (۱۱) است:

$$\left(\frac{Y_{\delta r}}{U_0} - Y_v\right)v = Y \Rightarrow Y_v = \left(\frac{Y}{a_0\omega} + \frac{Y_{\delta r}}{U_0}\right) \quad (11)$$

به همین صورت با نوشتن معادلات یاو و ساده کردن آن تحت فرضیات مشابه خواهیم داشت:

$$(mx_G - N_{\dot{v}}) + \left[\frac{N_{\delta r}}{U_0} + N_v\right]v = N \quad (12)$$

که N به عنوان ممان اندازه‌گیری شده متناظر این حالت است، نتایج با رابطه (۱۳) حاصل می‌شود:

$$N_{\dot{v}} = mx_G - \frac{N}{a_0\omega^2}, \quad N_v = \left(\frac{N}{a_0\omega} + \frac{N_{\delta r}}{U_0}\right) \quad (13)$$

در اینجا a_0 و ω به ترتیب، دامنه و فرکانس زاویه‌ای نوسان می‌باشند؛ بنابراین، این آزمایش امکان تعیین چهار ضریب هیدرودینامیکی با انجام دادن فقط یک بار آزمایش را فراهم می‌نماید. نیرو و ممان در حالت شبه پایا اندازه‌گیری می‌شوند؛ به این مفهوم که پس از شروع مانور نوسانی، باید نتایج از حالت اولیه مستقل شوند و معمولاً پس از یک الی دو نوسان، نیروها و ممان‌ها نیز نوسانی مستقل از حالت اولیه نشان خواهند داد. این آزمایش را به نام آزمایش $PSOM^2$ نام گذاری می‌کنند. روابط ارائه شده فوق، برای محاسبات این چهار ضریب هیدرودینامیکی در یک آزمایش حوضچه وقتی اعتبار دارد که تمام تشریحات هندسی و ایرسی، نیرویی و ممانی رعایت شده باشد؛ اما در مورد تست عددی، سناریو متفاوت است. نیروی محاسبه شده فقط نیروی هیدرودینامیکی است که فرم بدنه عامل ایجاد آن است؛ بنابراین در این مورد، برای بدست آوردن مشتقات هیدرودینامیکی، فقط به تجزیه کردن نیروی هیدرودینامیکی به صورت رابطه (۱۴) نیاز است:

$$\begin{aligned} Y &= vY_v + rY_r + \dot{v}Y_{\dot{v}} + \dot{r}Y_{\dot{r}} \\ N &= vN_v + rN_r + \dot{v}N_{\dot{v}} + \dot{r}N_{\dot{r}} \end{aligned} \quad (14)$$

همچنین در لحظاتی که r و \dot{r} صفر باشند، نیرو و ممان به صورت رابطه (۱۵) بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} Y &= vY_v + \dot{v}Y_{\dot{v}} \\ N &= vN_v + \dot{v}N_{\dot{v}} \end{aligned} \quad (15)$$

و ضرایب به صورت ذیل حاصل می‌گردند، در زمانی که مقدار v صفر می‌شود:

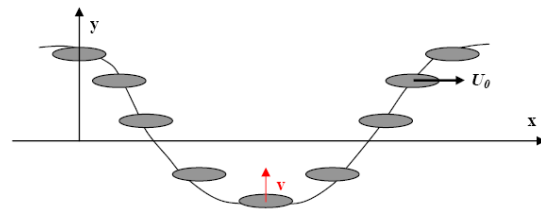
تیلور حول این نقطه انجام می‌شود؛ در صورتی که سناریوی حرکتی جسم دارای سرعت‌های بالا و مانورهای شدید باشد، به نحوی که زوایای حمله و جانبی بزرگ ایجاد کند که تا مرز واماندگی^۱ وسیله گسترش یابد، آنگاه لازم است در بسط تیلور تیلور جملات مراتب بالاتر در نظر گرفته شوند. در این صورت ترم‌های غیرخطی نیروها نیز در نظر گرفته می‌شوند و تحلیل دینامیک به صورت غیرخطی انجام می‌گیرد.

۳- مانورهای دینامیک استاندارد نوسانی

۳-۱- حرکت نوسانی صفحه‌ای سوای خالص

این روش یک آزمایش تست کششی است که شامل یک حرکت نوسانی سوای با یک سرعت ثابت پیشروی U_0 است (همان‌گونه که در شکل زیر نشان داده شده است). بوسیله یک حرکت نوسانی سوای سینوسی (آشفتنگی)، سرعت و شتاب به صورت ذیل نوشته می‌شود که a_0 دامنه نوسان است:

$$\begin{aligned} y &= -a_0 \sin \omega t \\ v &= \dot{y} = -a_0\omega \cos \omega t \\ \dot{v} &= \ddot{y} = a_0\omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۱- نمودار شماتیک مانور نوسانی سوای خالص

باید توجه کرد که در این آزمایش r و \dot{r} صفر هستند، بنابراین معادله حرکت سوای به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود [۴]:

$$(m - Y_v)\dot{v} + \left(\frac{Y_{\delta r}}{U_0} - Y_v\right)v = Y \quad (9)$$

در رابطه فوق Y نیروی وارد شده در جهت محور y مختصات متصل به بدنه در هر لحظه است؛ بنابراین در زمانی از نوسان که $v = 0$ است، بدین معنی می‌باشد که $\dot{v} = a_0\omega^2$ و نیروی اندازه‌گیری شده متناظر با رابطه (۱۰) است:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y \Rightarrow Y_{\dot{v}} = m - \frac{Y}{a_0\omega^2} \quad (10)$$

² Planer Sway Oscillating Motion

¹ Stall

۴- مشخصات و ابعاد هندسی مدل

هندسه بکار رفته در تحلیل حاضر، هندسه شناخته شده مدل رونده زیرسطحی با نام دارپا سابوف^۱ است که از حدود شصت سال پیش در آزمایش‌های هیدرودینامیک، مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه‌های گوناگونی از این مدل ساخته شده و آزمایش شده است. در آزمایش‌های انجام شده با این هندسه، حالت‌های بدنه تنها، بدنه و برجک، بدنه و الویتور^۲ و رادرها^۳، بدنه با برج و الویتور و رادرها و در نهایت بدنه کل رونده، مورد تحلیل قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، از نتایج آزمایش بدنه به همراه الویتورها و رادرها استفاده شده، این مدل برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شده است. اطلاعات در مورد جزئیات هندسه، برگرفته از مرجع [۱۴] است. در شکل ۵، مدل رونده زیرسطحی نشان داده شده است. طول جسم، ۴۳۶۵ میلی‌متر و قطر وسیله، ۵۰۸ میلی‌متر است و الویتورها و رادرها روی پاشنه قرار گرفته‌اند. مرجع مختصات روی محور طولی جسم در فاصله ۲۰۱۳ میلی‌متری از نوک دماغه قرار گرفته است. سرعت کاری حرکت این جسم، ۲٫۵ متر بر ثانیه است.

۵- فرضیات و روش حل عددی

جهت مدل‌سازی مانورهای سوای و یاو خالص، از روش شبکه متحرک استفاده شده است. ناحیه حل دارای دو قسمت است که یکی محصور کننده جسم است. جسم و شبکه این ناحیه به صورت صلب و به عنوان یک مجموعه نوسان و چرخش می‌کند و دیگری ناحیه بزرگتر است که مجموعه اول درون آن محصور شده است. ناحیه بیرونی، دارای شبکه منعطف بوده و با حرکت مجموعه داخلی تغییر شکل می‌دهد. شبکه فشرده و کشیده شده و نرم‌افزار در صورت پیچیدگی و کشیدگی بیش از حد با بازتولید شبکه آنرا اصلاح می‌کند. سرعت پیشروی جسم، به صورت شرط سرعت ورودی در مرز جریان ورودی اعمال شده است. سرعت جانبی با حرکت ناحیه داخلی به بالا و پایین (در مورد مانور

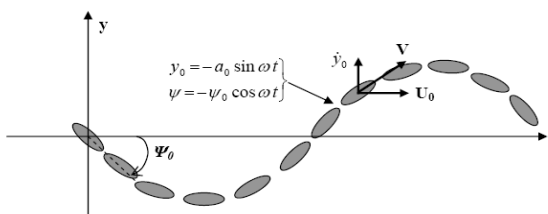
$$Y_v = \frac{Y}{a_0 \omega^2}, \quad N_v = \frac{N}{a_0 \omega^2} \quad (16)$$

و در زمانی از نوسان که مقدار \dot{v} صفر شود:

$$Y_v = \frac{Y}{a_0 \omega}, \quad N_v = \frac{N}{a_0 \omega} \quad (17)$$

۳-۲- حرکت نوسانی صفحه‌ای یاو خالص

آزمایش دیگر، شبیه به *PSOM* است که امکان محاسبه ضرایب Y_r و N_r و Y_f و N_f را فراهم می‌نماید. این آزمایش وابسته به سرعت و شتاب زاویه‌ای است. شکل زیر روشی را تشریح می‌کند که امکان محاسبه این مشتقات را فراهم می‌نماید.



شکل ۲- نمودار شماتیک مانور نوسانی یاو خالص

با نوشتن معادلات سوای و یاو در این آزمایش و اینکه در این مانور $v = \dot{v} = 0$ داریم:

$$\begin{aligned} (mx_G - Y_r)\dot{r} + (mU_0 - Y_r)r &= F \\ (I_z - N_r)\dot{r} + (mx_G U_0 - N_r)r &= M \end{aligned} \quad (18)$$

که در اینجا F و M ، نیرو و ممان اندازه‌گیری شده هستند. بوسیله جدا کردن دو مورد $r = 0$ و $\dot{r} = 0$ ، چهار ضریب به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} Y_r &= mx_G - \frac{Y}{\psi_0 \omega^2}, \quad N_r = I_z - \frac{N}{\psi_0 \omega^2} \\ Y_r &= mU_0 - \frac{Y}{\psi_0 \omega}, \quad N_r = mU_0 x_G - \frac{N}{\psi_0 \omega} \end{aligned} \quad (19)$$

با محاسبه این ضرایب به روش شبیه‌سازی عددی به دلیل عدم وجود اینرسی مربوط به جسم، ضرایب بالا به صورت رابطه (۲۰) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} Y_r &= \frac{Y}{\psi_0 \omega^2}, \quad N_r = \frac{N}{\psi_0 \omega^2} \\ Y_r &= \frac{Y}{\psi_0 \omega}, \quad N_r = \frac{N}{\psi_0 \omega} \end{aligned} \quad (20)$$

¹ DARPA Suboff

² Elevators

³ Rudders

۶- مطالعه استقلال تحلیل عددی از شبکه تولید شده

به منظور بررسی استقلال حل عددی از شبکه بکار رفته، شبکه‌های با تراکم کم، متوسط و زیاد و خیلی زیاد روی هندسه سابوف تولید شده که از لحاظ کیفیت با توجه به جدول ۱ در بازه عالی تا خوب قرار می‌گیرند.

کیفیت سلول‌های تولید شده بر اساس روش‌های بسیاری می‌تواند مورد سنجش قرار گیرد، یکی از مهمترین عوامل در کیفیت سلول، پیچش سلول است. پیچش سلول عبارت است از: میزان خارج شدگی نسبی سلول از شکل ایده‌آل و بازه‌ای بین صفر (سلول ایده‌آل) تا یک (پیچش غیر قابل قبول) را شامل می‌شود [۱۷]. جدول ۱ میزان کیفیت شبکه بر اساس پیچش سلول دسته‌بندی شده است. در شکل ۳، توزیع سلول‌های ایجاد شده در تحلیل عددی بر اساس پیچش نشان داده شده است. بر اساس ملاک ارائه شده در جدول ۱ شبکه تولید شده دارای کیفیت بین میزان عالی تا خوب قرار می‌گیرد.

به دلیل حجم سنگین تحلیل مانورهای نوسانی به صورت گذرا، مطالعه روی تحلیل‌های پایا در زاویه حمله انجام می‌گیرد. مدلسازی عددی در زاویه حمله ۸ درجه مطابق با آزمایش تجربی و برای هر چهار شبکه درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز انجام شده است. مقدار نیرو و گشتاور وارد بر وسیله در جهت‌های اصلی محورهای مختصات متصل به بدنه در صفحه پیچ (صفحه عمودی) با استفاده از تحلیل عددی بدست آمده و با نتایج تجربی آزمایش کشش در حوضچه در زاویه حمله مشابه مقایسه شده است [۷]. نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. سرعت وسیله در آزمایش تجربی، ۶/۵ گره دریایی^۱ بوده است بنابراین در تحلیل عددی نیز از سرعت مشابه استفاده می‌شود. نیروها و گشتاورها بر اساس روابط ارائه شده در مرجع [۱۸] بی‌بعد شده‌اند. مقدار افزایش تراکم شبکه در هر مرحله به طور متوسط، ۱/۲ برابر در هر جهت بوده است [۱۹]. با این حال تراکم لایه مرزی و ضخامت اولین سلول مجاور جسم ثابت نگه داشته شده است تا الزامات مدل توربولانسی (محدوده y^+) رعایت شود. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۲ می‌توان گفت که شبکه ریز نتایج قابل قبول و مستقل از شبکه، برای تحلیل عددی ارائه می‌کند.

یاو خالص همزمان چرخش این ناحیه نیز وجود دارد.) ایجاد می‌شود.

مدل توربولانسی مورد استفاده، $k-\epsilon$ است و از نوع Realizable آن مورد استفاده قرار گرفته که مقدار نسبت ویسکوزیته توربولانسی را به صورت دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند. استفاده از تابع دیوار استاندارد سبب می‌شود که با y^+ بزرگتری بتوان مسئله را تحلیل کرد. y^+ بزرگتر، به معنای شبکه درشت‌تر در اطراف جسم است و با توجه به گذرا و سه بعدی بودن مسئله بسیار اهمیت پیدا می‌کند. مقدار y^+ بایستی بین بازه ۳۰ تا ۳۰۰ یعنی درون لایه لگاریتمی لایه مرزی توربولانسی قرار داشته باشد تا تابع دیوار استاندارد بتواند نیروهای تنش برشی را به خوبی تقریب بزند [۱۵]. در شکل ۴، کانتورهای y^+ روی بدنه وسیله در سرعت کاری آن نشان داده شده است. که مقدار y^+ در بازه ۳۰ تا ۱۷۰ قرار دارد.

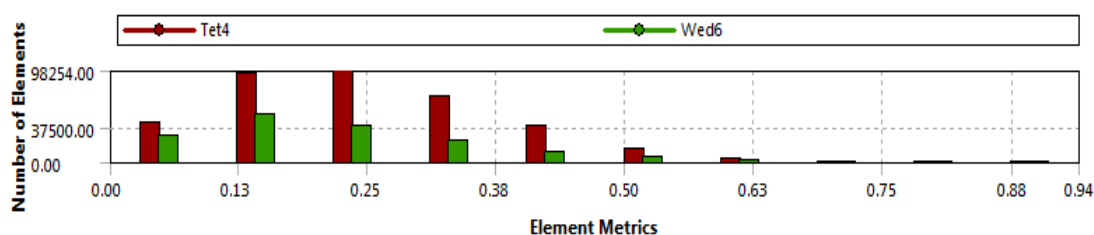
برای استخراج ضرایب هیدرودینامیک با استفاده از این مانورها بر اساس اطلاعات تجربی ارائه شده در [۱۶] باید وسیله در شروع حرکت از سکون، حداقل یک نوسان کامل انجام دهد تا جریان‌های گذرا ضعیف شده، به حالت شبه پایا در نوسانات دست یافت، سپس برداشت اطلاعات آغاز می‌شود.

در تحلیل عددی نیز، از این الگو استفاده شده است. در کلیه تحلیل‌ها، اطلاعات در نوسان اول ثبت نشده، از شروع نوسان دوم، تغییرات نیرو و ممان وارد بر جسم نمایش داده شده است. در تحلیل عددی به دلیل اینکه هیچ گونه اتصال مکانیزم حرکت دهنده‌ای وجود ندارد، لزومی به اصلاح نتایج نیست مانند آنچه در آزمایش تجربی انجام می‌شود؛ همچنین ابعاد محیط برخلاف آزمون تجربی بدون هیچ محدودیتی می‌تواند بزرگ انتخاب شود؛ به طوری که عدم تاثیر دیوارهای حوضچه در نیروها و ممان‌ها وارد بر جسم تضمین شود. از طرف دیگر، جسم در واقعیت دارای جرم خشک است که باید در معادلات اصلاح شود، ولی در تحلیل عددی چنین اصلاحی نیاز نیست و خالص نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر وسیله مستقیماً با انتگرال‌گیری تنش‌های فشاری و برشی روی سطح جسم قابل محاسبه است.

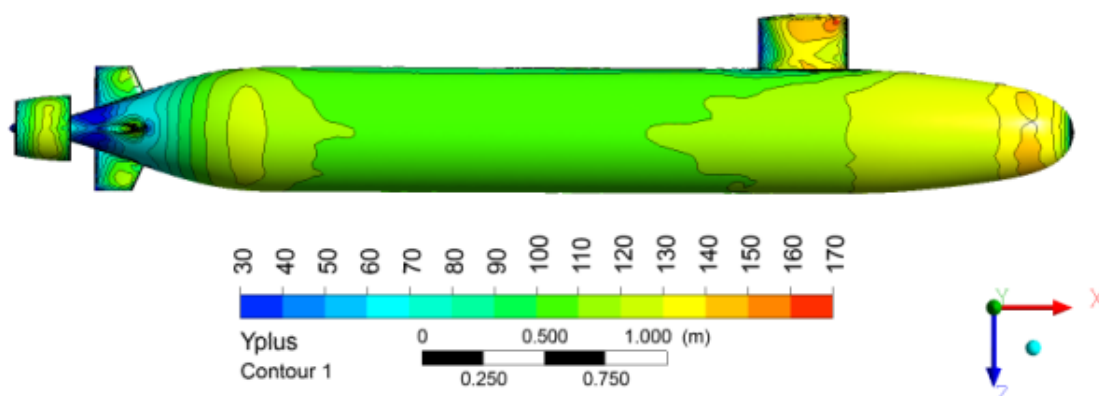
^۱ Knot

جدول ۱- میزان کیفیت شبکه بر اساس شدت پیچش سلول [۱۷]

۰-۰/۲۵	۰/۲۵-۰/۵۰	۰/۵۰-۰/۸۰	۰/۸۰-۰/۹۵	۰/۹۵-۰/۹۸	۰/۹۸-۰/۱۰۰
عالی	خیلی خوب	خوب	قابل قبول	بد	غیر قابل قبول



شکل ۳- کیفیت شبکه ایجاد شده بر روی جسم و اطراف آن بر اساس شدت پیچش سلول



شکل ۴- کانتور Y^+ بر روی هندسه سابوف با کلیه متعلقات در سرعت کاری وسیله

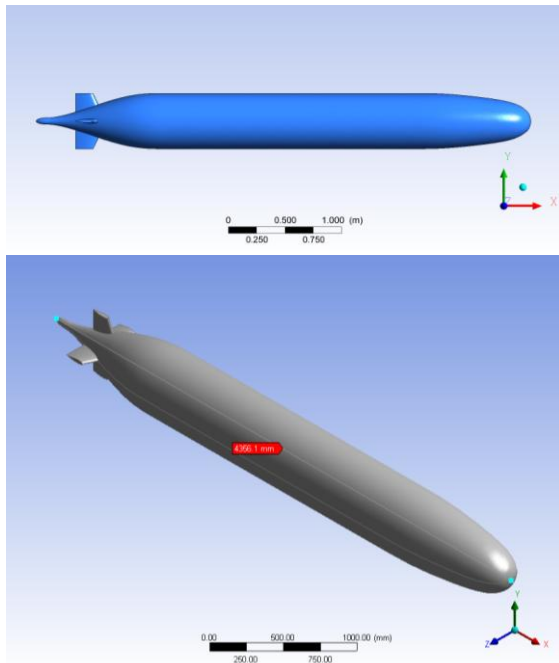
جدول ۲- نتایج تحلیل عددی و آزمایش تجربی حوضچه کشش در مورد شبکه‌های مختلف بر روی هندسه سابوف

Attack angle	Non-dimensional hydrodynamic forces	Numerical results				Experimental results
		Coarse mesh 614,000 cells	Medium mesh 840,000 cells	Fine mesh 1,332,000 cells	Very fine mesh 2,485,000 cells	
8.00°	X'	-0.0015068	-0.0014082	-0.0013726	-0.0013459	-0.001236
	Z'	-0.0029706	-0.0027538	-0.0027082	-0.0026724	-0.002525
	M'	0.0012591	0.0012386	0.0012278	0.0012339	0.001315

جدول ۳- درصد اختلاف تحلیل عددی به آزمایش تجربی حوضچه کشش در مورد شبکه‌های مختلف بر روی هندسه سابوف

Attack angle	Non-dimensional hydrodynamic forces	Coarse mesh (614,000 cells) %	Medium mesh (840,000 cells) %	Fine mesh (1,332,000 cells) %	Very fine mesh (2,485,000 cells) %
8.00°	X'	21.91	13.93	11.05	8.89
	Z'	17.65	9.06	7.26	5.84
	M'	4.25	5.81	6.63	6.17

توجه به مطالب ارائه شده در مرجع [۱۶] تعیین شد. برای مانور یاو خالص، فرکانس زاویه‌ای برابر ۱٫۵ رادیان بر ثانیه و دامنه حرکتی، برابر ۰٫۴ متر انتخاب شد و برای تست سوای خالص در فرکانس زاویه‌ای ۱/۱ رادیان بر ثانیه، دامنه حرکتی ۰٫۳ متر در نظر گرفته شد. در سرعت حرکت پیشروی ۲/۵ متر بر ثانیه جسم شروع به نوسان نموده و مانور شروع می‌شود. پس از طی مدت زمان معینی که گفته شود، حرکت جسم و میدان جریان به صورت شبه پایا در آمده است، نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی در هر گام زمانی ثبت می‌شوند. زمان شبه پایا شدن مانور، حدود طول مدت یک نوسان رونده است و از نوسان دوم می‌توان اطلاعات را ثبت نمود.



شکل ۵- نمای جانبی (بالا) و نمای ایزومتریک (پایین) هندسه مدل رونده زیرسطحی دارپا سابوف

۸- نتایج مدل‌سازی عددی و مقایسه با نتایج

تجربی

پس از تحلیل عددی و شبیه‌سازی مانورهای مذکور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین شبه پایا شدن حل عددی به ازای یک دوره نوسان، تغییرات نیرو و

۷- مدل‌سازی عددی مانورهای سوای خالص و یاو

خالص با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

مساله به صورت عددی و بر اساس مانورهای دینامیک نوسانی تحلیل می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلونت^۱ اقدام به شبیه‌سازی گردید. همچنین جهت ایجاد مانورهای اجباری از یک کد تابع تعریف شده توسط کاربر^۲ استفاده شده است.

در مدل‌سازی عددی چالش اساسی، در اجرای مانور و نحوه حرکت جسم رخ می‌دهد. با استفاده از تکنیک شبکه متحرک^۳ به اجرای مانور حرکت اجباری^۴ رونده اقدام می‌شود. شبکه بایستی با کیفیت مناسب تولید شده باشد تا حداکثر همگرایی ممکن ایجاد گردد. به جهت اینکه مانور به صورت گذرا^۵ مدل می‌شود و تعداد گام زمانی و مدت زمان همگرایی به ازای هر گام زمانی، عوامل تاثیرگذار روی مدت زمان حل هستند، همگرایی بهتر، به معنای کاهش چشم‌گیر مدت زمان حل عددی است.

مدل توبولانسی استفاده شده در شبیه‌سازی عددی مانور، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ به همراه تابع استاندارد دیواره^۶ است. این مدل به لحاظ کاربرد در مورد هندسه رونده‌های زیرسطحی و تخمین نیروهای وارد بر جسم بسیار مناسب عمل کرده، در مسائل صنعتی کاربرد فراوان دارد [۱۵]. در شبکه تولید شده سعی شده که حداقل ده ردیف شبکه لایه مرزی برای دیده شدن پروفیل لایه مرزی سرعت وجود داشته باشد. حجم شبکه تولید شده، حدود ۵۲۰ هزار سلول شامل، المان‌های منشوری^۷ و چهاروجهی^۸ است.

یکی از سوالات مهم در اجرای این مانور، میزان دامنه نوسانات و فرکانس حرکتی آن است. بر اساس مطالعه آماری انجام شده روی حوضچه‌های کشش با قابلیت مانورهای دینامیکی، میزان مناسب این متغیرها بر اساس هندسه وسیله مورد بررسی، به صورت بدون بعد ارائه شده است [۱۶]. دامنه نوسان و فرکانس در تحلیل عددی انجام شده در این مقاله با

^۱ Ansys Fluent v.14.5

^۲ UDF, User Defined Function

^۳ Dynamic Mesh

^۴ Captive Motion

^۵ Transient

^۶ Standard Wall Function Treatment

^۷ Wedge Elements

^۸ Tetrahedral Elements

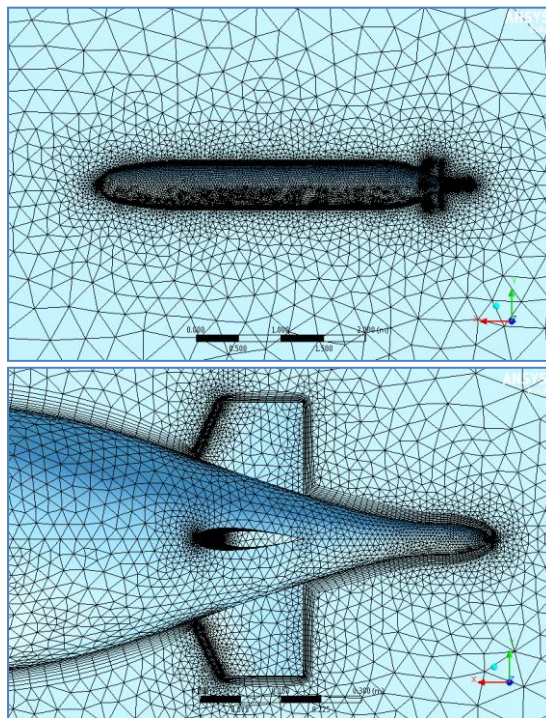
شده و میزان خطای ضرایب هیدرودینامیک عددی، نسبت به نتایج تجربی نیز ارائه شده است. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج موجود تجربی دیده می‌شود که در مدل‌سازی مانور نوسانی یاو خالص روش عددی با خطای کمتری توانسته است، ضرایب هیدرودینامیک را پیش‌بینی کند هر چند نتایج بدست آمده از مانور سوای خالص نیز به لحاظ کاربرد صنعتی در محدوده خطای قابل قبول قرار داشته و کاربردی هستند.

دقت بیشتر در استخراج ضرایب حاصل از مانور یاو خالص، نسبت به سوای خالص را می‌توان به زاویه دریافت ظاهری نسبت داد که جسم در حین نوسان با آن مواجه می‌شود. در مانور یاو خالص، تغییر زاویه یاو به نحوی تنظیم می‌شود که خط سیر مرکز جرم وسیله بر مسیر حرکت مماس باشد و لذا دماغه و دم جسم بسته به شدت دامنه مانور با زوایای دریافت کوچک موضعی و خلاف جهت یکدیگر مواجه می‌شوند که عامل ایجاد گشتاور میرایی مرتبط با حرکت یاو وسیله است؛ ولی در مورد مانور سوای خالص، امتداد جسم فارغ از دامنه نوسانات ثابت است؛ بنابراین جسم به طور کامل در معرض زاویه دریافت (ناشی از حرکت عرضی) قرار می‌گیرد. زاویه دریافت که در این پژوهش بین ۱۰ الی ۱۵ درجه در حالت پیشینه است، احتمال بروز جدایش را افزایش می‌دهد و از آنجا که مدل توربولانسی استفاده شده $k - \epsilon$ بوده و این مدل در پیش‌بینی جدایش ضعیف عمل می‌کند [۱۵]، بنابراین نتایج حاصل از این مانور نسبت به مانور یاو خالص، انحراف بیشتری از واقعیت خواهد داشت؛ ولی به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی عددی مانور، تطابق نسبتاً خوبی در استخراج ضرایب دینامیک در مقایسه با نتایج تجربی دارد.

جدول ۴- مقایسه ضرایب هیدرودینامیک حاصل از تحلیل عددی مانور سوای خالص و نتایج حاصل از تست تجربی و

میزان خطا				
$Y_v \times 10^{-4}$	$Y_v \times 10^{-4}$	$N_v \times 10^{-4}$	$N_v \times 10^{-4}$	
-۱۲۳/۷۰	-۱۷۳/۲۹	-۹۲/۵۰	۳/۷۱	تحلیل عددی
-۱۰۴/۹۴	-۱۴۷/۱۱	-۱۱۲/۵۴	۴/۱۵	نتایج تجربی
۱۷/۸	۱۷/۸	۱۷/۷	۱۰/۶	درصد خطا

ممان با زمان ثابت می‌شود. در نمودارهای زیر این تغییرات نشان داده شده است. نمودارهای بدست آمده از مانور سوای خالص، به صورت شکل ۷ و شکل ۸ هستند.

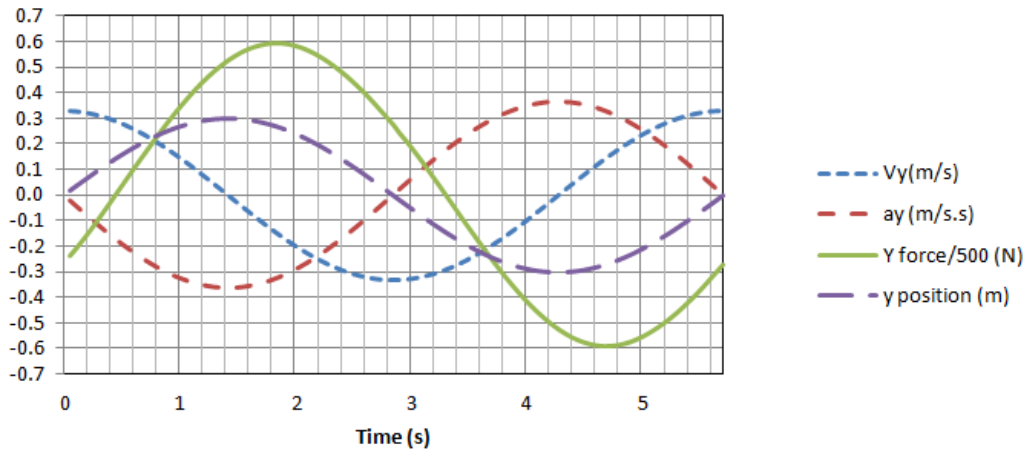


شکل ۶- شبکه تولید شده بر روی سطح رونده و در اطراف آن (بالا)، شبکه لایه مرز در اطراف پاشنه و بالک‌ها (پایین)

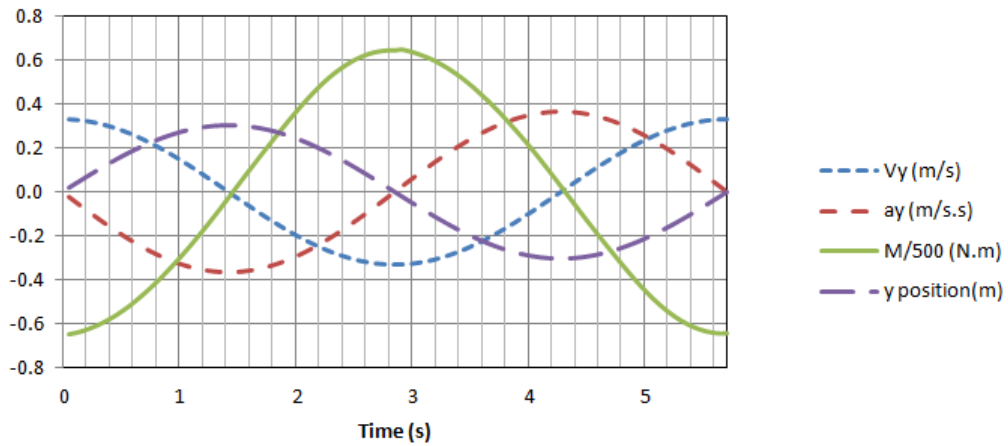
نمودارهای بدست آمده از مانور یاو خالص نیز، به صورت نمودارهای نشان داده شده در شکل ۹ و شکل ۱۰ بدست آمده است. بعد از پردازش نمودارهای فوق و با استفاده معادلات (۱۶) تا (۲۰) و بی‌بعدسازی ضرایب با استفاده از روابط زیر، ضرایب بی‌بعد شده در جدول ۴ و جدول ۵ ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \dot{Y}_r &= Y_r / \frac{1}{2} \rho L^4 & \dot{N}_r &= N_r / \frac{1}{2} \rho L^5 \\ \dot{Y}_r &= Y_r / \frac{1}{2} \rho L^3 U_0 & \dot{N}_r &= N_r / \frac{1}{2} \rho L^4 U_0 \\ \dot{Y}_v &= Y_v / \frac{1}{2} \rho L^3 & \dot{N}_v &= N_v / \frac{1}{2} \rho L^4 \\ \dot{Y}_v &= Y_v / \frac{1}{2} \rho L^2 U_0 & \dot{N}_v &= N_v / \frac{1}{2} \rho L^3 U_0 \end{aligned} \quad (21)$$

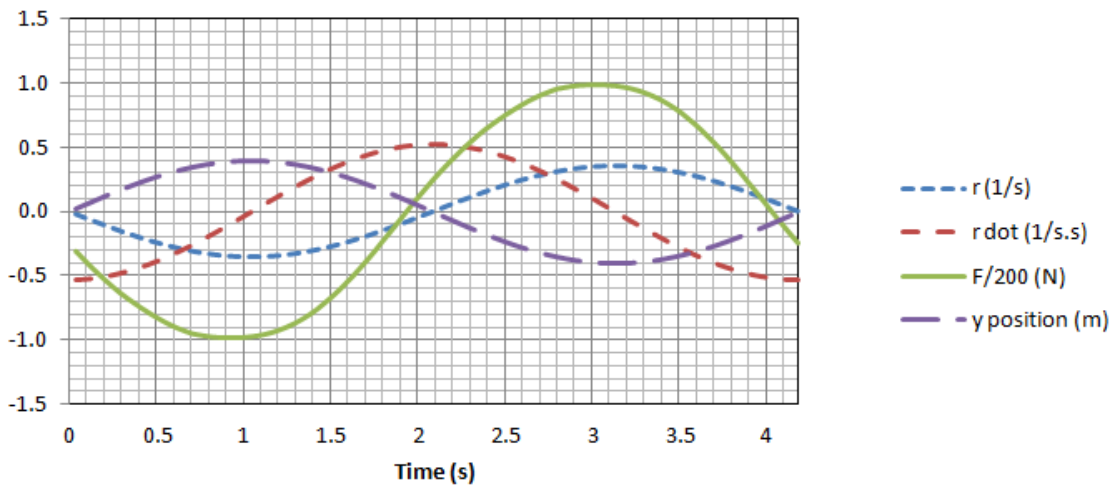
در مرجع [۷]، ضرایب هیدرودینامیک مدل دارپا سابوف به صورت تجربی با استفاده از حوضچه کشش و انجام مانورهای دینامیک سوای خالص و یاو خالص بدست آمده است. ضرایب بدست آمده در جدول زیر نشان داده شده‌اند. در این جداول، در کنار ضرایب تجربی، ضرایب عددی آورده



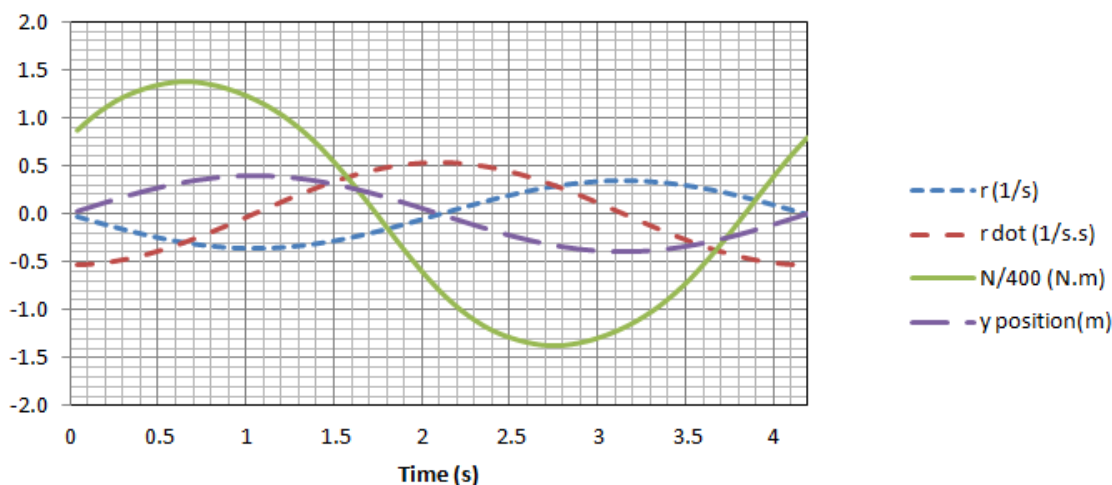
شکل ۷- تغییرات نیرو در مانور سوای خالص در مدت زمان یک نوسان



شکل ۸- تغییرات ممان در مانور سوای خالص در مدت زمان یک نوسان



شکل ۹- تغییرات نیرو در مانور یاو خالص در مدت زمان یک نوسان



شکل ۱۰- تغییرات ممان در مانور یابو خالص در مدت زمان یک نوسان

محدودتر باشد و از این رو میانمایی اطلاعات از شبکه قبل روی شبکه جدید با خطای کمتری صورت گیرد. از جهت دیگر، اگر از این استراتژی برای حل استفاده نشود، علاوه بر زمان بر شدن بازتولید شبکه در اطراف جسم که دارای شبکه ریز است، زمان تحلیل نیز به نحوی طولانی خواهد شد که در مسائل صنعتی قابل کاربرد نخواهد بود. از این رو نوآوری بکار رفته در این مقاله، ایجاد استراتژی حل و معرفی روشی از تحلیل عددی است که کاربردی بوده و زمان تحلیل منطقی باشد. با استفاده از یک کامپیوتر شخصی (PC) با پردازنده intel core i7-3770k با هشت پردازنده موازی با سرعت پردازش ۳/۵ گیگاهرتز و مقدار حافظه Ram برابر ۱۶ گیگا بایت، زمان مورد نیاز جهت انجام هر یک از مانورها برابر چهار ساعت بوده است.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله در مورد نحوه استخراج برخی از ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از مانورهای نوسانی استاندارد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بحث شد. معادلات دینامیک حاکم بر حرکت یک رونده ارائه شد و نحوه استخراج ضرایب از معادلات ساده‌سازی شده در مانورهای نوسانی نیز بیان گردید. چگونگی کاربرد این روابط، در استخراج ضرایب از تحلیل عددی نیز توضیح داده شد. بر اساس سناریوی تست در حوضچه کشش، اقدام به شبیه‌سازی همان مانورها در محیط نرم‌افزار گردید. با استفاده از یک

جدول ۵- مقایسه ضرایب هیدرودینامیک حاصل از تحلیل عددی مانور یابو خالص و نتایج حاصل از تست تجربی و

میزان خطا				
Y_r $\times 10^{-4}$	Y_r $\times 10^{-4}$	N_r $\times 10^{-4}$	N_r $\times 10^{-4}$	
۵۵/۲۳	۴/۷۹	-۳۱/۷	-۷/۱	تحلیل عددی
۶۳/۲۴	۴/۶۵	-۳۰/۶	-۷/۴	نتایج تجربی
۱۲/۶	۲/۹	۳/۳	۴/۲	درصد خطا

استفاده از شبکه یکسان برای هر دو مانور، باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان مورد نیاز برای تولید شبکه می‌شود. همچنین نوع مانور که با استفاده از تابع تعریف شده توسط کاربر^۱ انجام شده، تعیین می‌شود و با تغییرات جزئی در این تابع می‌توان دامنه و فرکانس نوسانات را کنترل کرد. استفاده از مدل $k - \epsilon$ به همراه تابع دیوار استاندارد، کاهش حجم شبکه را به دنبال دارد که برای تحلیل‌های گذرا و سه بعدی که زمان حل چالش اساسی است، بسیار اهمیت دارد و منجر به عملی شدن این روش در مسائل صنعتی می‌شود. تقسیم نمودن ناحیه حل عددی به دو ناحیه درونی (سلب) و بیرونی (منعطف)، باعث می‌شود تا ناحیه بازتولید شبکه در فاصله‌ای از جسم اتفاق افتد که سلول‌ها به نسبت اطراف جسم درشت بوده، بنابراین تعداد بازتولید سلول‌ها نیز

^۱ User Define Function (UDF)

m/s بردار سرعت جسم در مختصات بدنه،	\vec{V}
m/s مولفه y سرعت در مختصات متصل به بدنه،	v
m/s ² مولفه y شتاب در مختصات متصل به بدنه،	\dot{v}
m/s مولفه z سرعت در مختصات متصل به بدنه،	w
m/s ² مولفه z شتاب در مختصات متصل به بدنه،	\dot{w}
N مولفه x نیروی سیال وارد به جسم،	X
m مولفه x محل مرکز جرم در دستگاه بدنه،	x_G
N مولفه y نیروی سیال وارد به جسم،	Y
نیروی وارد شده به جسم در جهت y مختصات بدنه به علت چرخش بالک عمودی،	$Y_{\delta r}$
m موقعیت عرضی در دستگاه مختصات ساکن،	y
m مولفه y محل مرکز جرم در دستگاه بدنه،	y_G
m/s سرعت جانبی وسیله در دستگاه ساکن،	\dot{y}
m/s ² شتاب جانبی وسیله در دستگاه ساکن،	\ddot{y}
N مولفه z نیروی سیال وارد به جسم،	Z
m مولفه z محل مرکز جرم در دستگاه بدنه،	z_G
بردار سرعت زاویه ای در دستگاه بدنه،	$\vec{\alpha}$
بسامد زاویه نوسانات جسم،	ω
دامنه زاویه نوسانات مانور یاو خالص،	ψ_0
چگالی،	kg/m^3

۹- مراجع

- [1] Jones DA, Clarke DB (2002) The calculation of hydrodynamic coefficients for underwater vehicles. Australian Defense Sci Tech Org, Martine Platform Division, Public Releases, DSTO-1329.
- [۲] آذرسینا ف، سیف م س (۱۳۹۴) اصول مدلسازی دینامیک زیردریایی. هفدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش.
- [۳] شادلاقانی آ، منصورزاده ش، بدری محمدعلی، (۱۳۹۳) شبیه-سازی عددی ضرایب میرایی و جرم افزوده یک شناور زیرسطحی در آب عمیق. مجله روش‌های عددی در مهندسی ۳۳.
- [4] Saout O (2003) Computation of hydrodynamic coefficients and determination of dynamic stability characteristic of an underwater vehicle including free surface effects. Master of Science Thesis, Florida Atlantic University, USA.
- [۵] صادق‌زاده پراپری ب، سیف م س، مهدقلی ح (۱۳۹۰) تعیین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی‌ها به روش تست مدل. نشریه مهندسی دریا (۱۴) ۷.

شبکه مناسب و روش شبکه متحرک مانورهای سوای خالص و یاو خالص بازسازی شد و نیروها و ممان‌ها در حالت شبه پایا به صورت تابع زمان استخراج شد. با بررسی این نیروها و ممان‌ها و استفاده از روابط بیان شده، ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به این دو مانور بدست آمد. مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج گزارش شده از تست تجربی نشان می‌دهد که از این روش برای استفاده در صنعت می‌توان بهره برد و نتایج عددی، تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

ضرایب با خطای کمتر از ۲۰ درصد، قابل پیش‌بینی هستند. این تحقیق روش کاربردی در استخراج ضرایب در مسائل صنعتی ارائه نموده که در بازه زمانی منطقی قابل اجرا باشد؛ همچنین نیاز به تولید شبکه مجدد برای هر مانور دینامیکی وجود ندارد.

۸- علایم، نشانه‌ها

a_0	دامنه نوسان در مانورهای نوسانی،	m
F	نیروی وارد شده از سیال به جسم،	N
G	مرکز جرم	
I	ممان لختی جسم،	Kg m^2
K	ممان وارد شده به جسم در جهت رول،	$N.m$
L	طول وسیله، طول مشخصه،	m
M	ممان وارد شده به جسم در جهت پیچ،	$N.m$
m	جرم وسیله، جرم جسم،	Kg
N	ممان وارد شده به جسم در جهت یاو،	$N.m$
$N_{\delta r}$	ممان یاو وارد شده به جسم به علت چرخش بالک عمودی،	$N.m$
O	مرکز مختصات متصل به بدنه	
p	سرعت زاویه‌ای رول،	rad/s
\dot{p}	شتاب زاویه‌ای رول،	rad/s^2
q	سرعت زاویه‌ای پیچ،	rad/s
\dot{q}	شتاب زاویه‌ای پیچ،	rad/s^2
r	سرعت زاویه‌ای یاو،	rad/s
\dot{r}	شتاب زاویه‌ای یاو،	rad/s^2
t	زمان،	s
U_0	سرعت کاری وسیله،	m/s
u	مولفه x سرعت در مختصات متصل به بدنه،	m/s
\dot{u}	مولفه x شتاب در مختصات متصل به بدنه،	m/s^2

- submarine rotary derivatives. *J Hydrodynamics* 27: 68-75.
- [13] Fossen T (1994) Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- [14] Groves N (1989) Geometric characteristics of DARPA SUBOFF models. David Taylor Research Center. DTRC. Ship Hydrodynamics Dept.
- [15] Launder BE, Spalding DB (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Comp Method appl Mech Eng* 3: 269-289.
- [16] Vantorre M (1999) Captive maneuvering tests with ship models: A review of actual practices. 22nd International Towing Tank Conference, ITTC 22nd, Maneuvering Committee Questionnaire, University of Ghent, Belgium.
- [17] Ansys training manual (2009) ANSYS Meshing Application Introduction. ANSYS® is a registered trademark of SAS IP Inc.
- [18] Feldman J (1979) DTNSRDC Revised standard submarine equation of motion. David Taylor Research Center, DTRC, Ship Performance Dep.
- [19] Cengel YA, Cimbala JM (2006) Fluid mechanics, fundamentals and applications. McGraw-Hill, New York.
- [۶] ریشه‌ری م (۱۳۸۸) محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی مانور با استفاده از تست مدل و دینامیک سیالات محاسباتی. یازدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش.
- [7] Roddy RF (1990) Investigation of the stability and control characteristics of several configuration of the DARPA SUBOFF model from captive-model experiments. David Taylor Research Center. DTRC. Ship Hydrodynamics Dept.
- [8] Fossen TI, Fgellstad OE (1995) Nonlinear modeling of marine vehicles in six degree of freedom. *Int J Math Model Syst* 1(1).
- [9] Azarsina F (2009) Experimental hydrodynamics and simulation of maneuvering of an axisymmetric underwater vehicle. Doctor of Philosophy Thesis, Memorial University, Canada.
- [10] Pan Y, Zhang H, Zhou Q (2012) Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulations. *J hydrodynamics* 24(6): 840-847.
- [11] He S, Kellett P, Yuan Z, Incecik A, Turan O, Boulougouris E (2016) Maneuvering prediction based on CFD generated derivatives. *J Hydrodynamics* 28(2): 248-292.
- [12] Pan Y, Zhou Q, Zhang H (2015) Numerical simulation of rotating arm test for prediction of