



شبیه‌سازی سازی شش درجه آزادی یک جسم خودگردان زیر آبی با جرم متغیر

بهروز رئیسی^{۱*}، مسعود خراتی کوپایی^۲ و محمد حسن خوبان^۳^۱ دکتری مخابرات، پژوهشکده مکانیک فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، شیراز، صندوق پستی ۷۱۵۵۵-۴۱۴^۲ استادیار دانشکده مکانیک و هوا فضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵

چکیده

در این تحقیق ابتدا معادلات حرکت برای یک جسم خودگردان زیر آبی در حالت جرم متغیر استخراج شده، معادلات مزبور به معادلات فضای حالت تبدیل گردیده و سپس نحوه انجام شبیه‌سازی عددی به کمک حل این دسته معادلات تشریح شده است. از ملزومات شبیه‌سازی، محاسبه نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی می‌باشند که این کمیت‌ها خود تابعی غیر خطی از متغیرهای سیستم هستند. این وابستگی به کمک ضرایب نیرو و گشتاور نشان داده می‌شود که محاسبه آن‌ها در این مطالعه به کمک نرم افزار میسپیل دت کام انجام می‌پذیرد. علاوه بر آن اثرات حرکت شتاب‌دار جسم در سیال نیز با کمک جملات جرم افزوده لحاظ می‌گردد. برای صحت‌سنجی نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی با موارد قابل پیش‌بینی از لحاظ کیفی و در برخی موارد کمی مقایسه شده‌اند که مشاهده می‌گردد برنامه شبیه‌سازی از صحت مناسبی برخوردار است. مجموعه تعریف شکل سامانه، انجام شبیه‌سازی، محاسبه ضرایب، رسم منحنی‌های کمیت‌های خروجی بر حسب زمان و انیمیشن پرتاب در یک نرم افزار جامع مجتمع شده‌اند که در نهایت این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی حرکت یک جسم خودگردان زیر آبی که مجهز به تعدادی بالک ثابت و یک سری بالک متحرک می‌باشد را برای کاربر مهیا نموده است.

کلمات کلیدی: جرم متغیر؛ معادلات حرکت؛ شبیه‌سازی حرکت؛ ضرایب هیدرودینامیکی؛ میسپیل دت کام.

Six Degree of Freedom Simulation of a Variable Mass Autonomous Underwater Vehicle

Behrooz Raeisy^{1,*}, Masoud Kharati-Koopae², Mohammad Hassan Khooban³¹ Ph.D. of communications, Institute of Mechanics, Iranian Space Research Center, Shiraz, Iran² Assis. Prof., Dept. of Mech. and Aerospace Eng., Shiraz Univ. of technology, Shiraz, Iran³ Ph.D. Student, Dept. of Electrical & Electronic Eng., Shiraz Univ. of technology, Shiraz, Iran

Abstract

In this research, the general form of the governing equations that could be accounted as an essential prerequisite for simulation of a body is derived for an underwater varying mass body. In this study, the appropriate form of the aforementioned equations in the state space is presented and the procedure of motion simulation is illustrated. The hydrodynamic forces and moments, which could be viewed as the main inputs for simulation process, are generally nonlinear functions of system variables and are calculated with their respective coefficients. These coefficients, in turn, are associated with different system variables (such as control variables) and are calculated utilizing the MISSILE DATCOM code. Comparison of results associated to the current work and those of existing simple cases quantifies the accuracy of simulation procedure. The definition of body shape, simulation process, post processing and animating the body trajectory are all carried out in a general prepared software which is capable of simulating arbitrary underwater bodies consist of fixed wings and moving flaps.

Keywords: variable mass; equation of motion; simulation of motion; hydrodynamic coefficients; Missile DatCOM; AUV;

۱- مقدمه

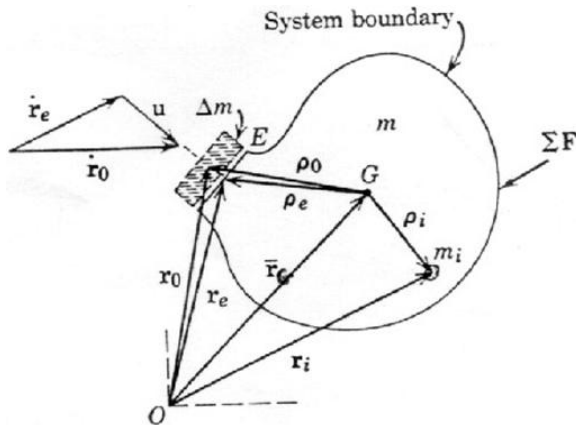
اولین قدم در انجام شبیه‌سازی یک جسم استخراج معادلات حرکت آن می‌باشد. این معادلات در حالت کلی شامل شش معادله می‌باشند. حل این معادلات با معلوم بودن پارامترهای ورودی که شامل جرم افزوده، نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی می‌باشند مسیر حرکت جسم را مشخص می‌سازد. استخراج معادلات حرکت جسم بر پایه قوانین نیوتن استوار بوده و در منابع زیادی شکل این معادلات برای حالت جرم ثابت یافت می‌شوند [۱-۵] اما برای جرم متغیر در زیر آب موضوعی است که در این تحقیق بدان پرداخته می‌شود. در حالتی که جرم جسم ثابت است می‌توان معادلات را حول مرکز جرم نوشت. در این تحقیق جهت کلی‌نگری جسمی که دارای جرم متغیری در طول حرکت باشد در نظر گرفته شده و در نتیجه معادلات حرکت حول مرکز بویانسی استخراج می‌گردد [۶]. بعد از معلوم شدن معادلات حرکت جسم، می‌بایست پارامترهای ورودی مشخص گردند. جرم افزوده که به عنوان یکی از ورودی‌های حل معادلات در نظر گرفته می‌شود هنگامی اهمیت می‌یابد که جسم در سیال حرکتی شتابدار داشته باشد. در این صورت سیال اطراف جسم نیز به همراه جسم شتاب گرفته و بنابراین جسم، جرم اضافه‌ای را به همراه خود حرکت می‌دهد که در مقابل شتاب گرفتن مقاومت می‌نماید. محاسبه این مقادیر بر روش‌های مبتنی بر تئوری پتانسیل استوار است. طبق این تئوری جرم اضافه فقط به شکل هندسی وسیله و جهت حرکت بستگی دارد. نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی در اثر وزن و نیروی وارد شده از آب بر روی آن که به عنوان شناوری شناخته می‌شود، ایجاد و جسم از آن تاثیر می‌پذیرد. نقطه اثر نیروی وزن مرکز جرم و نقطه اثر بویانسی مرکز بویانسی جسم می‌باشد که به علت ثابت بودن شکل ظاهری جسم در طول مسیر ثابت خواهد بود. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی نیز به کمک ضرائب هیدرودینامیکی محاسبه می‌گردند.

در این تحقیق در ادامه ابتدا در فصل دوم معادلات حرکت جسم جرم متغیر در حالت کلی استخراج شده و سپس با دسته بندی به معادلات حالت تبدیل می‌گردد. با حل این دسته معادلات با کمک روش‌های عددی نحوه حرکت سیستم شبیه‌سازی می‌گردد و در نهایت جهت اطمینان نسبی از نحوه عملکرد روش پیشنهاد شده،

شبیه‌سازی بر روی حالت‌هایی با پاسخ قابل حدس زدن پیاده گردیده و نتایج آن با پاسخ مورد نظر مقایسه خواهد گردید.

۲- معادلات حرکت جسم جرم متغیر

شکل (۱) نمای کلی یک جسم جرم متغیر و پارامترهای مورد نیاز جهت استخراج معادلات حرکت آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمای کلی یک سیستم جرم متغیر

در این شکل پارامترهای مختلف به قرار زیر می‌باشند:

جرم کل سیستم در زمان t	m
جرم ورودی به سیستم در زمان Δt	Δm
مکان مرکز جرم ورودی نسبت به مرکز جرم m در G	\vec{p}_0
مکان مرکز جرم ورودی نسبت به مرکز جرم m در نقطه O	\vec{r}_0
مکان نقطه ورود جرم به سیستم نسبت به مرکز جرم G	\vec{p}_e
مکان نقطه ورود جرم به سیستم نسبت به نقطه ثابت O	\vec{r}_e
فاصله مرکز جرم لحظه‌ای G نسبت به نقطه O	\vec{r}_G
فواصل هر نقطه از سیستم نسبت به G	\vec{p}_i
فواصل هر نقطه از سیستم نسبت به O	\vec{r}_i
جرم متمرکز شده در هر نقطه از سیستم	m_i

می‌دانیم اندازه حرکت جسم در لحظه t عبارتست از:

$$\vec{G} = \sum m_i \vec{r}_i \quad (1)$$

در لحظه $t + \Delta t$ اندازه حرکت به اندازه $\Delta \vec{G}$ تغییر می‌کند. این تغییر ناشی از تغییر سرعت اجزاء (\vec{r}_i) و نیز ناشی از ورود (یا خروج) جرم Δm می‌باشد. با محاسبه

$$\bar{\rho}_o^{CG} = \bar{\rho}_e^{CG} \quad (10)$$

با جایگذاری معادله (۵) در (۲) و با توجه به روابط (۹) و (۱۰) داریم:

$$F_e = m\ddot{r}_G^{CG} - 2\dot{m}\left(\frac{\partial \bar{\rho}_e^{CG}}{\partial t} + \bar{\omega}^{CG} \times \bar{\rho}_e^{CG}\right) - \ddot{m}\bar{\rho}_e^{CG} - \dot{m}\ddot{u}^{CG} \quad (11)$$

با توجه به اینکه حاصلضرب $\dot{m}\ddot{u}$ برابر نیروی پیش‌رانش (\ddot{T}) است داریم:

$$\bar{F}_e + \ddot{T} = m\ddot{r}_G^{CG} - 2\dot{m}\left(\frac{\partial \bar{\rho}_e^{CG}}{\partial t} + \bar{\omega}^{CG} \times \bar{\rho}_e^{CG}\right) - \ddot{m}\bar{\rho}_e^{CG} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن r_{eB}^{CG} , w^{CG} و r_B^{CG} بصورت زیر:

$$\bar{\rho}_{eB} = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix}, \bar{\omega}^{CG} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \dot{r}_B^{CG} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (13)$$

و با توجه به مولفه های \bar{F}_e و \ddot{T} در مرکز بویانسی:

$$\bar{F}_e^{CB} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \ddot{T}^{CB} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

و با در نظر گرفتن اینکه محورهای مختصات واقع در مراکز جرم و بویانسی موازی‌اند و نسبت به هم دوران ندارند شکل نهایی معادله‌ی نیرو در دستگاه بدنی که مرکز آن بر مرکز بویانسی منطبق است به صورت معادلات دیفرانسیل زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} m[\dot{u} + qw - rv + \ddot{x}_G + 2q\dot{z}_G - 2r\dot{y}_G \\ + \dot{q}z_G - \dot{r}y_G + p(qy_G + rz_G + rz_G) - \\ (q^2 + r^2)x_G] + 2\dot{m}[\dot{x}_G - \dot{x}_e + q(z_G \\ - z_e) - r(y_G - y_e)] + \ddot{m}(x_G - x_e) = \\ X + T_x \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} m[\dot{v} + ru - pw + \ddot{y}_G + 2r\dot{x}_G - 2p\dot{z}_G + \dot{r}x_G \\ - \dot{p}z_G + q(rz_G + px_G) - (r^2 + p^2)y_G] + \\ 2\dot{m}[\dot{y}_G - \dot{y}_e + r(x_G - x_e) + p(z_G - z_e)] \\ + \ddot{m}(y_G - y_e) = Y + T_y \end{cases} \quad (16)$$

وقتی $\frac{\Delta \bar{G}}{\Delta t}$ بسمت صفر میل کند و با توجه به اینکه مجموع نیروهای خارجی \bar{F}_e (غیر از نیروی مربوط به اندازه حرکت جرم Δm) برابر $\sum m_i \ddot{r}_i$ می‌باشد خواهیم داشت:

$$\ddot{G} = \bar{F}_e + \dot{m}\ddot{r}_o \quad (2)$$

از طرفی با توجه به اینکه $m\ddot{r}_G = \sum m_i \ddot{r}_i$ مقدار مشتق $m\ddot{r}_G$ نسبت به زمان برابر خواهد بود با:

$$\frac{d}{dt}(m\ddot{r}_G) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(m\ddot{r}_G)}{\Delta t} = \sum m_i \ddot{r}_i + \dot{m}\ddot{r}_o \quad (3)$$

هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند داریم:

$$\ddot{r}_o - \ddot{r}_G = \ddot{\rho}_o - \ddot{\rho}_e \quad (4)$$

لذا داریم:

$$\ddot{G} = m\ddot{r}_G - \dot{m}\ddot{\rho}_e \quad (5)$$

رابطه (۵) در معادله (۲) استفاده شده و نهایتاً معادلات نیرو بدست می‌آیند. در این مرحله دستگاه مختصات بدنی روی مرکز جرم واقع شده در حالی که دستگاه مختصات اینرسی در یک نقطه از زمین ثابت می‌باشد. اگر موقعیت یک نقطه از جسم در دستگاه مختصات بدنی و اینرسی به ترتیب $\bar{\rho}_i$ و \bar{r}_i نامیده شود و موقعیت مرکز جرم در دستگاه مختصات اینرسی نامیده شود خواهیم داشت:

$$\bar{r}_i = \bar{r}_G + \bar{\rho}_i \quad (6)$$

با مشتق‌گیری از این رابطه خواهیم داشت:

$$\dot{\bar{r}}_i^{CG} = \dot{\bar{r}}_G^{CG} + \frac{\partial \bar{\rho}_i^{CG}}{\partial t} + \bar{\omega}^{CG} \times \bar{\rho}_i^{CG} \quad (7)$$

در این رابطه اندیس بالا نویسنده CG بیانگر این است که بردارها در دستگاه مختصات بدنی بیان شده‌اند و $\bar{\omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای سیستم مختصات بدنی می‌باشد. برای $\dot{\bar{r}}_o$ نیز خواهیم داشت:

$$\dot{\bar{r}}_o^{CG} = \dot{\bar{r}}_G^{CG} + \frac{\partial \bar{\rho}_o^{CG}}{\partial t} + \bar{\omega}^{CG} \times \bar{\rho}_o^{CG} \quad (8)$$

به همین ترتیب مشتقات دوم نیز قابل محاسبه می‌باشند. از طرفی داریم:

$$\frac{\partial \bar{\rho}_o^{CG}}{\partial t} = \ddot{u}^{CG} + \frac{\partial \bar{\rho}_e^{CG}}{\partial t} \quad (9)$$

که \vec{p}'_i بردار فاصله یک نقطه (جرم m_i) تا CB می‌باشد. حال اگر \vec{H}_B را با محاسبه نسبت $\frac{\Delta \vec{H}_B}{\Delta t}$ وقتی Δt به سمت صفر میل می‌کند محاسبه کنیم خواهیم داشت:

$$\vec{H}_B = \vec{M}_B + \vec{r}'_B \times \dot{m}\vec{p}'_e + \vec{r}'_B \times (-\dot{m}\vec{p}'_G - m\vec{p}'_G) + \vec{p}'_e \times \dot{m}\vec{r}'_0 \quad (24)$$

چون $\vec{r}'_0 = \vec{r}'_B + \vec{p}'_0$ لذا داریم:

$$\vec{H}_B = \vec{M}_B + \vec{p}'_e \times \dot{m}\vec{p}'_0 - \vec{r}'_B \times \frac{d}{dt}(m\vec{p}'_G) \quad (25)$$

بنابراین با توجه به معادله (۲۴) داریم:

$$\vec{M}_B^r = \vec{H}_B^r - \vec{r}'_e \cdot \vec{r}'_e \cdot m\vec{p}'_e + \vec{r}'_B \cdot \frac{d}{dt}(m\vec{r}'_G) \quad (26)$$

با توجه به معادله (۲۲):

$$\vec{H}_B^r = \frac{d}{dt}(m\vec{r}'_G) \cdot \vec{r}'_B + (m\vec{r}'_G) \cdot \vec{r}'_B + \frac{d}{dt}(I_{\sim B}^{CB} \vec{\omega}^{CB}) \quad (27)$$

و توجه به معادله (۲۶):

$$\vec{M}_B^{CB} = \frac{d}{dt}(m\vec{p}'_G^{CB}) \times \vec{r}'_B^{CB} + (m\vec{p}'_G^{CB}) \times \vec{r}'_B^{CB} - \vec{p}'_e^{CB} \times \dot{m}\vec{p}'_0^{CG} + \quad (28)$$

$$\vec{r}'_B^{CB} \times \frac{d}{dt}(m\vec{p}'_G^{CB}) + \frac{d}{dt}(I_{\sim B}^{CB} \vec{\omega}^{CB})$$

از طرفی می‌دانیم:

$$\dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times \dot{p}'_0^{CB} = \dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times (\vec{u}^{CB} + \vec{p}'_e^{CB}) \quad (29)$$

$$\dot{p}'_e^{CB} = \frac{\partial \vec{p}'_e^{CB}}{\partial t} + \vec{\omega}^{CB} \times \vec{p}'_e^{CB}$$

و چون می‌دانیم $\vec{T}^{CB} = \dot{m}\vec{u}^{CB}$ خواهیم داشت:

$$\dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times \dot{p}'_0^{CB} = \dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times \left(\vec{u}^{CB} + \frac{\partial \vec{p}'_e^{CB}}{\partial t} + \vec{\omega}^{CB} \times \vec{p}'_e^{CB} \right) = \vec{p}'_e^{CB} \times \vec{T}^{CB} + \quad (30)$$

$$\dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times \frac{\partial \vec{p}'_e^{CB}}{\partial t} + \dot{m}\vec{p}'_e^{CB} \times (\vec{\omega}^{CB} \times \vec{p}'_e^{CB})$$

با جایگذاری معادله (۳۰) در معادله (۲۸) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} m(\dot{w} + p v - q u + \ddot{z}_G + 2(p\dot{y}_G - q\dot{x}_G) + \\ \dot{p}y_G - \dot{q}x_G + r(px_G + qy_G) - (p^2 + q^2)z_G] \\ + 2\dot{m}[\dot{z}_G - \dot{z}_e + p(y_G - y_e) - q(x_G - x_e)] \\ + \dot{m}(z_G - z_e) = Z + T_z \end{cases} \quad (17)$$

جرم افزوده همواره در بحث حرکت اجسام در سیال یکی از پارامترهای مهم به حساب می‌آید. گرچه رفتار واقعی سیال باعث ایجاد انگیزه در برخی از محققین جهت برآورد دقیق پارامترهای مربوط به جرم افزوده شده است [۷] ولی به دلیل وجود جدایی جریان کم در حرکت اجسام، معمولاً محاسبه این جملات با توجه به جریان ایده‌آل هنوز هم از دقت مناسبی برخوردار است و از این طریق انجام می‌پذیرد [۸ و ۹] در این تحقیق، جملات جرم افزوده از طریق مرجع [۱ و ۲] در قسمت سمت راست معادلات در نظر گرفته می‌شوند.

برای بدست آوردن معادلات گشتاور در دستگاه بدنی منطبق بر مرکز بویانسی به شکل زیر عمل می‌کنیم. اگر \vec{p}'_i بردار فاصله جرم i تا مرکز بویانسی باشد، اندازه حرکت زاویه ای حول مرکز بویانسی عبارتست از:

$$\vec{H}_B = \sum \vec{p}'_i \times m_i \vec{r}'_i \quad (18)$$

داریم:

$$\dot{\vec{r}}_i^{CB} = \dot{\vec{r}}_B^{CB} + \frac{\partial \vec{p}'_i^{CB}}{\partial t} + \vec{\omega}^{CB} \times \vec{p}'_i^{CB} \quad (19)$$

نظر به اینکه $\sum \vec{p}'_i^{CB} \times m_i$ بردار فاصله جرم i تا CG (است) صفر بوده و چون شکل هندسی جسم ثابت

است ($\frac{\partial \vec{p}'_i^{CB}}{\partial t} = 0$) خواهیم داشت:

$$\vec{H}_B = m\vec{p}'_G^{CB} \times \dot{\vec{r}}_B^{CB} + \sum m_i \vec{p}'_i^{CB} \times (\vec{\omega}^{CB} \times \vec{p}'_i^{CB}) \quad (20)$$

اگر تعریف کنیم:

$$\vec{p}'_i^{CB} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \vec{\omega}^{CB} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (21)$$

خواهیم داشت:

$$\vec{H}_B^{CB} = m\vec{p}'_G^{CB} \times \dot{\vec{r}}_B^{CB} + I_{\sim B}^{CB} \vec{\omega}^{CB} \quad (22)$$

که منظور از $I_{\sim B}^{CB}$ ماتریس لختی حول B و بیان شده در CB می‌باشد.

اندازه حرکت زاویه ای حول مرکز بویانسی عبارتست از:

$$\vec{H}_B = \sum \vec{p}'_i \times (m_i \vec{r}'_i) \quad (23)$$

بصورت کلی زیر نوشت [۱۰]:

$$\begin{aligned} X_{HD} &= dp.S_{ref}.C_x \\ Y_{HD} &= dp.S_{ref}.C_y \\ Z_{HD} &= dp.S_{ref}.C_z \\ K_{HD} &= dp.S_{ref}.L_{ref}.C_l \\ M_{HD} &= dp.S_{ref}.L_{ref}.C_m \\ N_{HD} &= dp.S_{ref}.L_{ref}.C_n \end{aligned} \quad (۳۵)$$

در روابط فوق X, Y, Z نیرو در سه راستا و K, M, N اندازه‌های بردارهای گشتاور در سه محور می‌باشند. کمیت dp ، فشار دینامیکی^۱، S_{ref} سطح مرجع و L_{ref} طول مرجع نامیده می‌شوند که می‌توان سطح مقطع و قطر بدنه جسم را به عنوان سطح مرجع و طول مرجع تعریف نمود. این مقادیر جهت بی‌بعد نمودن ضرایب بکار رفته‌اند. $[C_x, C_y, C_z, C_l, C_m, C_n]$ نیز بیانگر ضرایب هیدرودینامیکی هستند. ضرایب هیدرودینامیکی بطور پیچیده‌ای با متغیرهای مختلف سیستم و از جمله متغیرهای کنترلی که بعداً تعریف می‌گردد مرتبط می‌باشند و عملاً اثر سطوح کنترلی یک وسیله متحرک زیر آب در این ضرایب ظاهر می‌گردد.

قابل ذکر است که ضرایب هیدرودینامیکی در معادلات فوق از طریق منحنی‌های نیمه تجربی ارائه شده در بلوکی به نام دت کام^۲ برای رژیم‌های مختلف حرکت قابل محاسبه است. بلوک تجربی دت کام در نرم افزاری به نام میسایل دت کام^۳ با نام اختصاری MD گرد آوری شده است که به وسیله آن می‌توان ضرایب و در نتیجه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر جسم را یافت. برنامه کامپیوتری میسایل دت کام (MD) یکی از برنامه‌هایی شناخته شده‌ای است که امکان محاسبه این پارامترها را برای موشکها در اعداد رینولدز و نسبت سرعت جسم به صوت در محیط مورد مطالعه در حالت‌های مختلف را فراهم می‌نماید. هر چند که این نرم‌افزار برای موشک تهیه شده است اما این امکان وجود دارد که با توجه به شباهت زیاد نیروها در موشک با در نظر گرفتن عدد رینولدز و ماخ مربوط یا به عبارت دیگر تشابه هیدرودینامیکی پارامترهای فوق‌الذکر را برای این جسم به خصوص نیز توسط

$$\begin{aligned} \vec{M}_B^{CB} + \vec{\rho}_e^{CB} \times \vec{T}^{CB} = \\ \left(m\vec{\rho}_G^{CB} \right) \times \ddot{\vec{I}}_B^{CB} + \frac{\partial \vec{I}^{CB}}{\partial t} \vec{\omega}^{CB} + \vec{I}_{\sim B}^{CB} \frac{\partial \vec{\omega}^{CB}}{\partial t} + \\ \vec{\omega}^{CB} \times \left(\vec{I}_{\sim B}^{CB} \vec{\omega}^{CB} \right) - \dot{m}\vec{\rho}_e^{CB} \times \frac{\partial \vec{\rho}_e^{CB}}{\partial t} - \\ \dot{m}\vec{\rho}_e^{CB} \times \left(\vec{\omega}^{CB} \times \vec{\rho}_e^{CB} \right) \end{aligned} \quad (۳۱)$$

با بسط معادله (۳۱) معادلات گشتاور حول مرکز بویانسی مطابق زیر بدست می‌آیند.

$$\begin{cases} M_x + (y_e T_z - z_e T_y) = \\ p\dot{I}_{xx} - q\dot{I}_{xy} - r\dot{I}_{xz} + pI_{xx} - qI_{xy} - \\ rI_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + qr(I_{zz} - I_{yy}) - \\ qpI_{xz} + prI_{xy} - \dot{m}(y_e \dot{z}_e - z_e \dot{y}_e) - \\ \dot{m}(p(y^2 + z^2) - qxy - rzx) + \\ m(y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)) \end{cases} \quad (۳۲)$$

$$\begin{cases} M_y + (z_e T_x - x_e T_z) = \\ -p\dot{I}_{xy} + q\dot{I}_{yy} - r\dot{I}_{yz} - pI_{xy} + qI_{yy} - \\ rI_{yz} + (p^2 - r^2)I_{xz} + pr(I_{xx} - I_{zz}) - \\ qrI_{xy} + pqI_{yz} - \dot{m}(\dot{x}_e z_e - \dot{z}_e x_e) - \\ \dot{m}(q(x^2 + z^2) - rzy - pxy) + \\ m(z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)) \end{cases} \quad (۳۳)$$

$$\begin{cases} M_z + (x_e T_y - y_e T_x) = \\ -p\dot{I}_{xz} - q\dot{I}_{yz} + r\dot{I}_{zz} - pI_{xz} - qI_{yz} \\ + rI_{zz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + pq(I_{yy} - I_{xx}) \\ - prI_{yz} + qrI_{xz} - \dot{m}(x_e \dot{y}_e - y_e \dot{x}_e) \\ - \dot{m}(r(x^2 + y^2) - pxz - qzy) + \\ m(x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)) \end{cases} \quad (۳۴)$$

جملات جرم افزوده نیز از طریق مرجع [۱ و ۲] در قسمت سمت چپ معادلات در نظر گرفته می‌شوند.

۳- نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی

نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی توابعی غیر خطی پیچیده‌ای از متغیرهای سیستم می‌باشند و می‌توان آنها را

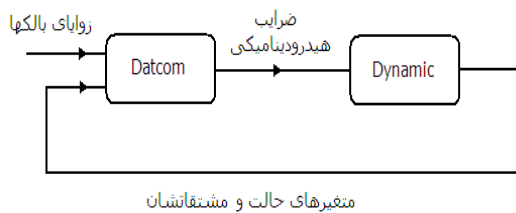
¹ dynamic pressure

² Datcom

³ missile Datcom

چرخشی مثبت در جسم شود. بنابر این با توجه به جهت قراردادی می‌توان عبارت $\delta_4 = -\delta_2$ را نوشت بنابراین در این جسم به خصوص سه کمیت به عنوان داده‌های مربوط به چهار بالک خواهیم داشت.

زوایای بالک‌ها که توسط آن مسیر حرکت جسم تصحیح می‌شود در معادلات حرکت جسم به صورت مستقیم ظاهر نمی‌شود، بلکه در هر لحظه اطلاعات مربوط به این زوایا، به همراه سایر اطلاعات شامل شرایط محیطی، شکل آیرودینامیکی، متغیرهای حالت و مشتقات آن به جدول جستجوی دت کام وارد، ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه و از روی آن نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی محاسبه و در معادلات جایگزین می‌شوند. شکل (۳) چگونگی تأثیر زاویه بالک‌ها را در شبیه‌سازی جسم متحرک نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه تأثیر گذاری زوایای بالک در شبیه‌سازی حرکت جسم

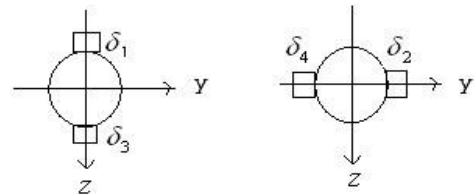
به عبارت دیگر نقش ضرایب هیدرودینامیکی در معادلات جسم عملاً حاکی از نقش عملکرد سطوح کنترلی است و با استفاده از MD در هر لحظه با داشتن زوایای سطوح کنترلی و متغیرهای حالت و شکل جسم می‌توان به این ضرایب دست یافت. برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی بایستی ورودی‌های زیر در به MD داده شود [۱۵]:

- شکل ظاهری جسم (بدنه و سطوح کنترلی)
- عدد رینولدز
- زاویه حمله^۳
- زاویه سرش جانبی^۴
- زاویه بالکها

این برنامه بدست آورد [۱، ۲ و ۱۱]. البته همانگونه که ذکر گردید اثر جرم مجازی موجود در آب (که در موشکها اثر قابل توجهی ندارند) باید به صورت جداگانه محاسبه و در شبیه‌سازی دخیل گردد [۱ و ۲] که این موضوع در شبیه‌سازی مورد استفاده در تحقیق اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

۴- ورودی‌های لازم برای محاسبه ضرایب توسط MD

اهمیت نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی از این جنبه است که از طریق آنها نحوه حرکت جسم در زیر آب کنترل می‌گردد. سامانه مورد بحث دارای چهار سطح کنترلی (بالک) به منظور کنترل و هدایت جسم می‌باشد. این بالکها به ترتیبی که در شکل (۲) نشان داده شده در انتهای جسم نصب شده‌اند.



شکل ۲- نمای صفحات کنترلی بالک‌های افقی و عمودی

به بالک‌های عمودی (δ_1 و δ_3) سکان^۱ و به بالک‌های افقی (δ_2 و δ_4) بالابر^۲ گفته می‌شود. در جسم مد نظر دو بالک سکان مستقل بوده و هم فرمان سمت و هم چرخش توسط آنها صادر می‌شود و در صورتی که چرخش جسم به نحو مناسبی توسط این دو بالک کنترل شود [۶ و ۱۲-۱۴] آنگاه می‌توان با کمک دو بالک بالابر، کنترل چرخه عمق را نیز انجام داد. بالابرها در این مورد به خصوص با یکدیگر کوپل مکانیکی هستند و در تمامی حالات دارای یک اندازه زاویه می‌باشند تا گشتاوری در کانال چرخش به سیستم اضافه نکنند و تنها در جهت تغییر زاویه پیچش و در نتیجه کنترل عمق از آنها استفاده شود. جهت قراردادی به گونه‌ای انتخاب شده است که زاویه مثبت هر بالک باعث زاویه

^۳ angle of attack

^۴ side slip angle

^۱ rudder

^۲ elevator

شاخصه‌های عملکرد داده شده ای طراحی کند. همچنین روش‌های فضای حالت طراح را قادر می‌سازند که شرایط اولیه را در طراحی منظور کند.

متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی کوچکترین دسته‌ای از متغیرهای سیستم هستند که رفتار سیستم دینامیکی را تعیین می‌کند. برداری را که شامل این متغیرهای حالت می‌باشد بردار حالت می‌نامند و معمولاً با $X(t)$ نشان می‌دهند. بدین معنا که، یک بردار حالت دسته متغیرهایی از یک سیستم است که با داشتن این متغیرها (بردار) در هر لحظه t_0 و معلوم بودن کنترل‌های اعمالی به سیستم $u(t)$ برای $t \geq t_0$ ، پاسخ سیستم در هر لحظه دلخواه t بطور یکتایی تعیین می‌گردد.

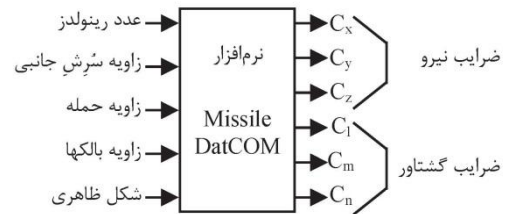
در مورد جسم زیر آبی مورد بحث در این گزارش بردار متغیرهای حالت X شامل بردارهای η_1 ، η_2 ، v_1 و v_2 می‌باشد. با دسته بندی مناسب و باز نویسی معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم که در بخش قبل ذکر شده و تعریف متغیرهای حالت X به صورت:

$$X = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ \phi \ \theta \ \psi \ x \ y \ z] \quad (36)$$

می‌توان معادلات حالت سیستم را به فرم کلی معادله (۳۷) نوشت که در آن M ماتریس جرم^۱ می‌باشد.

همانطور که از معادلات مربوط به نیروها و گشتاورهای جرم اضافه برمی‌آید در این ترمها، مشتقات حالت در مختصات بدنه ظاهر می‌شوند. بنابراین لازم است که در تشکیل معادلات به فرم معادله (۳۷) آن دسته از جملات موجود در ترم‌های مربوط به معادلات نیروها و گشتاورهای جرم اضافه که در بردارنده مشتقات حالت می‌باشند به سمت چپ معادل انتقال داده شوند تا در سمت راست معادله هیچ ترم در بردارنده مشتق حالت باقی نماند. در همین جا لازم است اشاره شود که در مجموعه معادلات نیرو و گشتاور، ترمهایی که اندیس HS و HD دارند در بردارنده مشتقات حالت نمی‌باشند و می‌توانند تماماً در سمت راست معادلات

که این موضوع در شکل (۴) نیز نمایش داده شده است.



شکل ۴- ورودی های لازم برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی

هر چند که روش غالب در یافت ضرایب مورد بحث اجرای یک بار کد MD در نقطه کار و سپس استفاده از تکنیک‌های خطی سازی حول نقطه کار می‌باشد اما در این تحقیق کد MD به صورت زیر برنامه تغییر یافت و در هر گام شبیه سازی با صدا نمودن آن، ضرایب مجدداً محاسبه می‌گردید. با این ترفند حتی در زمان تغییرات شدید از نقطه تعادل و در زمان گذر نیز شبیه ساز دقت خود را حفظ می‌نماید.

۵- دسته بندی معادلات به صورت معادلات حالت

مدل ریاضی یک سیستم دینامیکی یک مجموعه معادله است که رفتار دینامیکی سیستم را دقیقاً یا حداقل به خوبی بیان می‌کند. توجه شود که برای یک سیستم معین، مدل ریاضی یکتا نیست بلکه با تعریف متغیرهای مختلف یک سیستم را می‌توان به صورت‌های متفاوتی نشان داد. تعیین مدل ریاضی دقیق به طور مناسب برای سیستم در تحلیل و طراحی کنترل اهمیت بسیاری دارد. روش فضای حالت بر اساس توصیف معادلات سیستم بر حسب تعدادی معادله تفاضلی یا دیفرانسیلی مرتبه اول قرار دارد. استفاده از طرز نمایش برداری-ماتریسی نمایش ریاضی معادلات سیستم را به مقدار زیادی ساده می‌کند. طراحی سیستم با استفاده از مفهوم فضای حالت، طراح را قادر می‌سازد که سیستم‌های کنترلی را نسبت به

¹ mass matrix

$$F_4 = -(r^2 - q^2)I_{yz} - qr(I_{zz} + I_{yy}) - prI_{xy} + pqI_{xz} - p\dot{I}_{xx} + q\dot{I}_{yy} + r\dot{I}_{xz} - m[y_g(pv - qu) - z_g(ru - pw)] + \dot{m}[y_e\dot{z}_e - z_e\dot{y}_e] - \dot{Z}_B[m(y_g + rx_g - pz_g) + \dot{m}y_g] + \dot{y}_B[m(\dot{z}_g + py_g - qx_g + \dot{m}z_g) + K_{HS} + K_{HD}(X, \dot{X}, u) + (Y_eT_z - Z_eT_y)] \quad (44)$$

$$F_5 = -(p^2 - r^2)I_{xz} - pr(I_{xx} + I_{zz}) + qrI_{xy} - pqI_{yz} + p\dot{I}_{xy} + q\dot{I}_{yz} + r\dot{I}_{xz} - m[z_g(qw - rv) - x_g(pv - qu)] + \dot{m}[z_e\dot{x}_e - x_e\dot{z}_e] - \dot{X}_B[m(\dot{z}_g + py_g - qx_g) + \dot{m}z_g] + \dot{z}_B[m(\dot{x}_g + qz_g - ry_g) + \dot{m}x_g] + (Z_w - X_u)uw - v pY_f + (K_p - N_f) r p - u q Z_q + M_{HS} + M_{HD}(X, \dot{X}, u) + (Z_eT_x - X_eT_z) - qJ_2 \quad (45)$$

$$F_6 = -(q^2 - p^2)I_{xy} - pq(I_{yy} + I_{xx}) + prI_{yz} - qrI_{xz} + p\dot{I}_{xz} + q\dot{I}_{yz} - r\dot{I}_{xz} - m[x_g(ru - pw) - y_g(qw - rv)] + \dot{m}[x_e\dot{y}_e - y_e\dot{x}_e] - \dot{y}_B[m(\dot{x}_g + qz_g - ry_g) + \dot{m}x_g] + \dot{x}_B[m(\dot{y}_g + rx_g - pz_g) + \dot{m}y_g] - (X_u - Y_v)uv - z q w p - u r Y_f - (K_p - M_q) p q + N_{HS} + N_{HD}(X, \dot{X}, u) + (X_eT_y - Y_eT_x) - rJ_2 \quad (46)$$

$$F_7 = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \quad (47)$$

$$F_8 = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (48)$$

$$F_9 = -q(\sin \phi / \cos \theta) + r(\cos \phi / \cos \theta) \quad (49)$$

$$F_{10} = u \times \cos \psi \cos \theta - v(\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \phi) + w(\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \quad (50)$$

$$F_{11} = u \times \sin \psi \cos \theta - v(\cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi) + w(-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \quad (51)$$

$$F_{12} = -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \sin \phi \quad (52)$$

باقی بمانند. لذا با بازنویسی معادلات (۱۵) تا (۱۷) و (۳۲) تا (۳۴) و جایگزینی روابط مربوط به نیروها و گشتاورهای جرم اضافه و سپس انتقال ترم‌هایی که حاوی مشتقات متغیرهای حالت می‌باشند به سمت چپ معادلات، دسته معادلات به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$M\dot{X} = \bar{F}(X, u, t) \quad (37)$$

که در آن :

$$M = \begin{bmatrix} Mass_1 & Zeros [6 \times 6] \\ Zeros (6 \times 6) & I (6 \times 6) \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$Mass_1 = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m - Y_v & 0 & -mz_g & 0 & mx_g - Y_f \\ 0 & 0 & m - Z_w & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} - K_p & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -(mx_g + M_v) & -I_{xy} & I_{yy} - M_q & -I_{yz} \\ -my_g & (mx_g - N_v) & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} - N_f \end{bmatrix} \quad (39)$$

و بردار \bar{F} برداری از توابع با تعاریف زیر می‌باشند:

$$\bar{F} = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ \dots \ F_{10} \ F_{11} \ F_{12}]^T \quad (40)$$

$$F_1 = -m[qw - rv + \ddot{x}_g + 2q\dot{z}_g - 2r\dot{y}_g + p(qy_g + rz_g) - (q^2 + r^2)x_g] - 2\dot{m}[\dot{x}_g - \dot{x}_e + q(z_g - z_e) - r(y_g - y_e)] - \ddot{m}(x_g - x_e) + w q Z_w + q^2 Z_q - rv Y_v - r^2 Y_f + X_{HS} + X_{HD}(X, \dot{X}, u) + T_x \quad (41)$$

$$F_2 = -m[ru - pw + \ddot{y}_g + 2r\dot{x}_g - 2p\dot{z}_g + q(rz_g + px_g) - (r^2 + p^2)y_g] - 2\dot{m}[\dot{y}_g - \dot{y}_e + r(x_g - x_e) - p(z_g - z_e)] - \ddot{m}(y_g - y_e) + u r X_u - w p Z_w - p q Z_q + Y_{HS} + Y_{HD}(X, \dot{X}, u) + T_y - r J_1 \quad (42)$$

$$F_3 = -m[pv - qu + \dot{z}_g + 2p\dot{y}_g - 2q\dot{x}_g + r(px_g + qy_g) - (p^2 + q^2)z_g] - 2\dot{m}[\dot{z}_g - \dot{z}_e + p(y_g - y_e) - q(x_g - x_e)] - \ddot{m}(z_g - z_e) + u q X_u + v p Y_v + p r Y_f + Z_{HS} + Z_{HD}(X, \dot{X}, u) + T_z + q J_1 \quad (43)$$

۶- بررسی نتایج شبیه سازی در بعضی از حالات خاص و بررسی تطابق نتایج بدست آمده با رفتار فیزیکی قابل انتظار

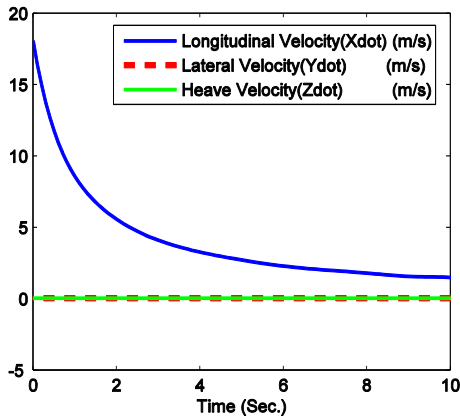
با توجه به نبود نتایج دقیق از مورد عملی در این زمینه، در این تحقیق سعی گردیده است که برای صحت سنجی روال تحقیق در حالت های مختلف که پاسخ آن قابل حدس زدن باشد، حل شبیه‌ساز ارائه گردد و بحث کیفی در نتایج به عمل آید. در حالت انتهایی نیز با توجه به نتایج دقیق مربوط به حرکت پرتابه، مقایسه ای بین نتایج حاصل از تحقیق جاری و نتایج تحلیلی صورت گرفته است.

در این مقایسه در مواردی که نیروی پیشرانش وجود دارد جهت بررسی بهتر کیفی، مقدار نیروی پیشرانش ثابت فرض شده است و راستای این نیرو همواره موازی محور جسم می‌باشد. مقدار نیروی وزن نیز در تمام موارد ثابت در نظر گرفته شده است. در تمام موارد نقطه اثر نیروی وزن و نیروی بویانسی روی محور جسم در نظر گرفته شده است و جرم و وزن نیز برابر در نظر گرفته می‌شود و شرایط اولیه در اندازه زاویه صفر در نظر گرفته می‌شود.

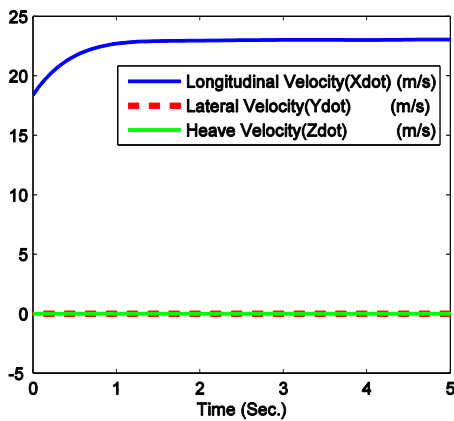
جهت مثبت محور X در این سیستم به سمت جلو و افقی بوده و جهت مثبت محور Z به سمت پایین (خلاف جهت شتاب ثقل) می‌باشد و نقطه $Z=0$ روی سطح آب قرار دارد. جهت محور Y با توجه به قانون دست راست مشخص می‌باشد.

در اولین حالت سرعت اولیه‌ای به جسم داده شده ولی نیروی پیشرانش صفر می‌باشد. نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرعت در جهت طولی روند کاهشی به سمت صفر را طی می‌کند که این موضوع نشان‌گر روند صحیح و در شکل (۵-الف) نیز نشان داده شده است.

در دومین حالت نیروی پیشرانش و سرعت اولیه هر دو مخالف صفر تنظیم گردیده است. همانگونه که در شکل (۵-ب) نشان داده شده است نتیجه شبیه‌سازی بیان می‌کند که سرعت طولی جسم افزایش یافته و نهایتاً به مقدار ثابتی می‌رسد که همان نتیجه مورد انتظار می‌باشد.



الف) بدون نیروی پیشرانش

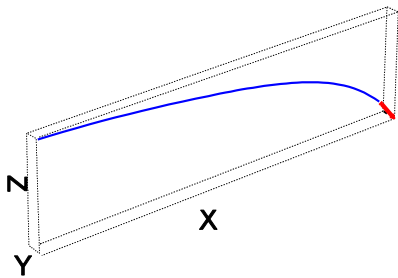


ب) با نیروی پیشرانش

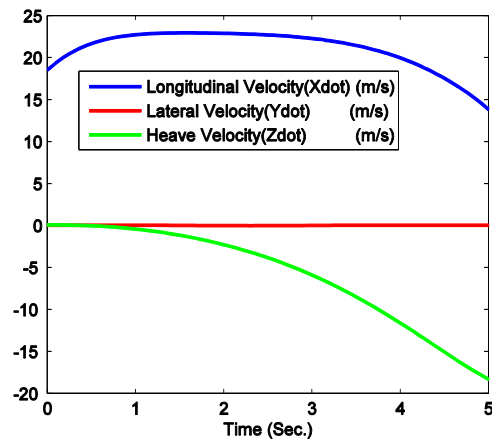
شکل ۵- سرعت خطی در سیستم مختصات اینرسی

در چهار حالت بعدی علاوه بر نیروی پیشرانش و سرعت اولیه زاویه بالکها نیز مقدار اولیه‌ای دارند. در حالت سوم هر دو بالک افقی به سمت بالا، حالت چهارم هر دو بالک افقی به سمت پایین و در حالت پنجم و شش بالکهای عمودی به ترتیب به سمت راست و چپ از نمای نشان داده شده در شکل (۲) مقدار دهی گردیده و در هر چهار حالت اخیر دو بالک دیگر بر روی مقدار صفر تنظیم گردیده‌اند.

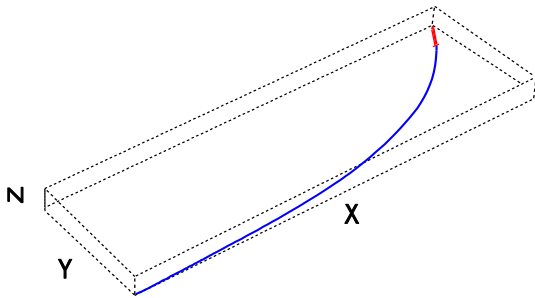
شکل (۷-الف) و (۷-ب) نتیجه شبیه‌سازی در حالت سوم و چهارم می‌باشند که یکی سرعت زاویه‌ای دیگری مسیر حرکت محاسبه شده توسط شبیه‌ساز را نشان می‌دهد که هر دو از نظر کیفی با مقدار مورد انتظار هم‌خوانی دارند.



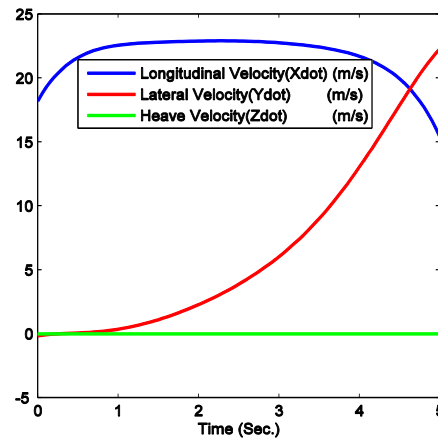
ب- نمایش مسیر حرکت جسم در حالت بالک افقی پایین



الف- سرعت زاویه‌ای در سیستم مختصات اینرسی با بالک افقی بالا



ت- نمایش مسیر حرکت جسم در حالت بالک عمودی راست



پ- سرعت زاویه‌ای در سیستم مختصات اینرسی با بالک عمودی به چپ

شکل ۷- نمایش رفتار جسم در حالت تغییر بالک‌ها

می‌گردد. جسم به شکل استوانه بوده و محور استوانه در لحظه اولیه پرتاب با بردار سرعت اولیه موازی است و جسم بدون بالک است. در این حالت نیروی مقاومت هوا در نظر گرفته نمی‌شود.

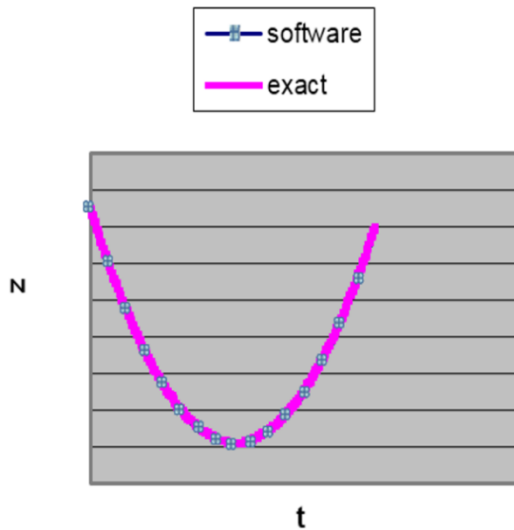
در نهمین حالت در نیروی پیشرانش صفر بوده و جسم با یک سرعت اولیه در هوا پرتاب می‌گردد. بدنه به شکل استوانه و دماغه به شکل نیم دایره است. محور استوانه در لحظه اولیه پرتاب با بردار سرعت اولیه موازی است و جسم بدون بالک است. در این حالت نیروی مقاومت هوا در نظر گرفته نمی‌شود. شکل (۸) وضعیت تغییر عمق جسم بر حسب زمان در سه حالت را نشان می‌دهد که هر سه شکلی نزدیک به سهمی را نشان می‌دهند. تغییر سر از نیم کره به استوانه و علاوه بر آن اثر وجود مقاومت هوا منحنی سهمی را به ترتیب جمع‌تر نموده است که در واقعیت هم همین رفتار مورد انتظار می‌باشد.

شکل (۷-پ) و (۷-ب) نیز نتایج شبیه‌سازی در حالت پنجم و شش می‌باشند که نتایج قابل انتظاری می‌باشند.

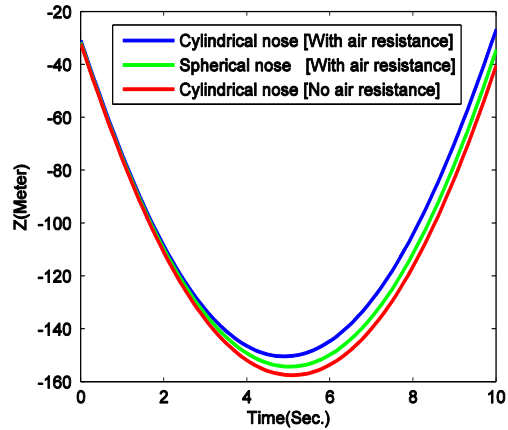
در حالت‌های بعد ثابت‌های مربوط به خواص آب با ثابت‌های مربوط به خواص هوا تغییر داده شده‌اند. بنابراین در حالت هفت تا نهم حرکت در هوا در نظر گرفته شده تا بتوان حداقل در یک حالت با معادلات تحلیلی موجود نیز مقایسه‌ای انجام گردد در تمامی حالات مرکز جرم جسم بر مرکز بویانسی منطبق است.

در حالت هفتم حرکت نیروی پیشرانش صفر بوده و جسم با یک سرعت اولیه در هوا پرتاب می‌گردد. جسم به شکل استوانه بوده و محور استوانه در لحظه اولیه پرتاب با بردار سرعت اولیه موازی است و جسم بدون بالک است. در این حالت نیروی مقاومت هوا در نظر گرفته می‌شود.

در حالت هشتم در این وضعیت نیروی پیشرانش صفر بوده و جسم با یک سرعت اولیه در هوا پرتاب

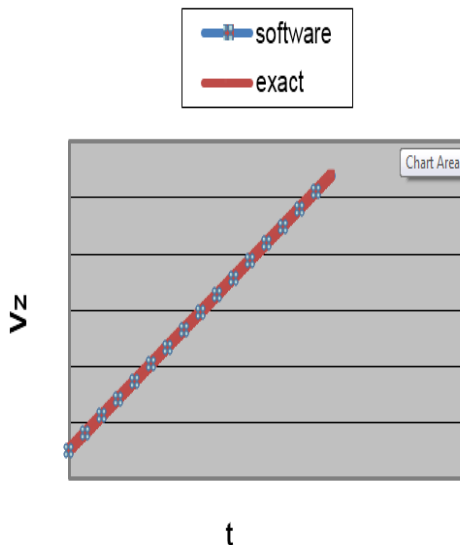


شکل ۹- مقایسه تغییر مکان در راستای قائم



شکل ۸- وضعیت تغییر عمق جسم در حالت هفت تا نه

در شکل ۱۰ نیز نتایج بدست آمده از نرم افزار شبیه ساز برای حالت نهم و معادله (۵۴) نشان داده شده است. t بر حسب ثانیه و V_z بر حسب متر بر ثانیه می باشد)



شکل ۱۰- تغییرات سرعت خطی در راستای قائم

با توجه به سایر منحنی‌ها که به علت طولانی شدن از ارائه آنها خودداری شده است با توجه به اینکه مرکز جسم بر مرکز بویانسی منطبق است، زاویه حرکت جسم و سرعت زاویه‌ای جسم متغیر می باشد. این تغییر زاویه و سرعت زاویه‌ای در راستای قائم اتفاق می افتد و در راستای افقی و محوری صفر است. در این حالت، سرعت جسم در راستای قائم ابتدا کم شده و سپس در جهت عکس زیاد می‌گردد و در راستای افقی کاهش اندکی را نشان می‌دهد و در راستای جانبی بدون تغییر باقی می‌ماند. تغییر مکان‌های خطی در راستای جانبی صفر بوده و در راستای افقی مرتباً افزایش یافته و در راستای قائم تقریباً رفتاری سهمی شکل دارد.

جهت مقایسه تحلیلی معادلات حرکت یک پرتابه مربوط به یک پرتابه در هوا در نظر گرفته می‌شود. تغییر مکان خطی برای یک پرتابه بدون در نظر گرفتن مقاومت هوا در راستای قائم عبارت است از:

$$Z = \frac{1}{2}gt^2 + V_{0z}t + Z_0 \quad (53)$$

در این روابط محور Z قائم و به سمت پایین می باشد. سرعت خطی در راستای قائم عبارت است از:

$$V_z = gt + V_{0z} \quad (54)$$

همانطور که دیده می شود نتایج تحلیلی و نتایج حاصل از نرم‌افزار تطابق خوبی دارند.

در شکل ۹ نتایج بدست آمده از نرم افزار شبیه‌ساز برای حالت نهم مربوط به حرکت جسم در هوا و معادله (۵۳) نشان داده شده است (t بر حسب ثانیه و Z بر حسب متر می باشد).

۷- نتیجه گیری

- [6] Raeisy B, Safavi A A, Khayatian A R (2009) Equation of motion derivation of variable mass underwater vehicle and 6DOF simulation with helping of neural network. In: 17th Annual International Conference on Mechanical Engineering, Tehran, Iran.
- [7] Mishra V, Vengadesan S S, Bhattacharyya S K (2001) Translational Added Mass of Axisymmetric Underwater Vehicles with Forward Speed Using Computational Fluid Dynamics. *J Ship Res*, 55(3): 185-195.
- [8] Yang F L, Wu C T, Young D L (2012) On the Calculation of Two-Dimensional Added Mass Coefficients by the Taylor Theorem and the Method of Fundamental Solutions. *J Mech*. 28(01): 107-112.
- [9] Zhiliang L, Shijun L (2011) Calculation of added mass coefficients of 3D complicated underwater bodies by FMBEM, *Commun. Nonlinear Sci Numer Simul*. 16(1):187-194.
- [10] Arnold M K, Chuen-Yen C (1998) *Foundations of aerodynamics*. 5th ed. John Wiley & Sons.
- [11] Seyedi N, Mirjalili M (2003) Hydrodynamic coefficients calculation of a submarine and its weapon with added mass method and missile datcom. In: Conference of underwater science and technology.
- [12] Raeisy B, Safavi A A, Khayatian A R (2012) Optimized Fuzzy Control Design of an Autonomous Underwater Vehicle. *Iran J Fuzzy Syst*. 9(2): 25-41.
- [13] Raeisy B (2007) Hybrid Neural Network Simulation of an AUV and its Optimized-Fuzzy Control Design. MS Thesis, Shiraz University.
- [14] Raeisy B, Safavi A A, Khayatian A R (2009) Fuzzy logic depth control of an autonomous underwater vehicle and optimization of it with normalize steepened descent method. In: 17th Annual International Conference on Mechanical Engineering, Tehran, Iran.
- [15] Vukelich S R, Stoy S L, Moore M E (1988) *Missile Datcom User's Manual*.

در این تحقیق معادلات حرکت یک جسم جرم متغیر حول مرکز بویانسی در حالت کلی بدست آمد. سپس در مرحله بعدی معادلات جهت حل به روش‌های عددی به صورت معادلات حالت دسته‌بندی گردید. در مرحله نهایی به دلیل نبودن داده عملی برای یک حالت واقعی، جهت صحت سنجی پس از حل معادلات برای حالت‌های ساده شده و به دست آوردن خروجی‌ها مشاهده گردید که نتایج با رفتار فیزیکی قابل انتظار مطابقت دارد.

در یک حالت ساده شده نیز که حرکت پرتابه بدون اصطکاک در هوا می‌باشد نتایج تحلیلی سرعت و جابجایی ارتفاع با نتایج خروجی شبیه‌ساز مقایسه گردید که نتایج هم‌خوانی مناسب را داشت.

مراجع

- [1] Prestero T (2001) Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. In: Oceans, MTS/IEEE Conference and Exhibition: 450-455.
- [2] Prestero T (2001) Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] Shi X, Xiong H, Wang, Chang Z (2005) A new model of fuzzy CMAC network with application to the motion control of AUV. In: Mechatronics and Automation, IEEE international conference: 2173-2178.
- [4] da Silva J E, Terra B, Martins R, de Sousa J B (2007) Modeling and simulation of the lauv autonomous underwater vehicle. In: 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics.
- [5] Evans J, Nahon M (2004) Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Eng* 31(14): 1835-1858.