

شبیه‌سازی عددی صعود اضطراری یک زیردریایی شش درجه آزادی

استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، گروه مهندسی مکانیک
مری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، گروه مهندسی مکانیک
استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا
کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا

رضا دهقانی*
اسماعیل عابدی
محمدعلی بدری
داوود میرزایی

چکیده

در این مقاله رفتار دینامیکی زیردریایی در حین مانور صعود اضطراری و تخلیه مخازن ثابت شناوری (مخازن بالاست) بررسی شده است. در صعودهای اضطراری، مخازن بالاست نقش موثری در حرکت زیردریایی دارند. در هنگام ضرورت، هوای ذخیره شده در زیردریایی به داخل مخازن دمیده می‌شود و باعث کم شدن وزن زیردریایی در مقابل نیروی شناوری می‌شود و زیردریایی به سطح آب صعود می‌کند. اگر چه فرآیند دمیدن هوا و تخلیه در مواقع اضطراری صورت می‌گیرد ولی در مانورپذیری زیردریایی تأثیر زیادی دارد. لذا در نظر گرفتن فرآیند دمیدن هوا، در معادلات حرکت و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مدل‌سازی بر مانور صعود اضطراری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. زیردریایی مورد نظر شش درجه آزادی در نظر گرفته شده و دارای چهار مخازن بالاست اصلی می‌باشد. برای مدل‌سازی فرآیند دمیدن هوا به مخازن بالاست، تئوری جریان تراکم پذیر و آیزنتروپیک بکار گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها برای یک زیردریایی نمونه انجام شده و رفتار آن در حین مانور صعود اضطراری بررسی شده است. همچنین اثر پارامترهای مختلف از جمله مشخصه‌های هوای ورودی به مخازن بالاست بر زاویه حمله، لغزش جانبی (دریفت) و زمان رسیدن به سطح در مانور صعود بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش فشار هوای ذخیره شده و تغییر زاویه سطوح کنترلی افقی عقب می‌توان زمان رسیدن به سطح را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: زیردریایی، صعود اضطراری، مخازن بالاست اصلی، فرآیند دمیدن هوا.

Numerical Simulation of Emergency Rising of A 6-DOF Submarine

R. Dehghani Assistant Professor, Graduate University of Advanced Technology Kerman, Department of Mechanical Engineering
E. Abedi M.Sc., Islamic Azad University, Majlesi Branch, Department of Mechanical Engineering
M. A. Badri Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre
D. Mirzaee M.Sc., Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

Abstract

In this paper, submarine motion is studied during emergency rising maneuver and blowing air in the main ballast tanks (MBTs). In emergency rising, the MBT plays an important role in the submarine motion. In an emergency situation, the stored compressed air is blown into the MBTs. Reducing the weight of the submarine causes the submarine to rise. Although blowing process may be done in an emergency situation but it is very effective in the maneuverability of submarine. Hence, this paper aims to consider the blowing process and effect of parameters in the emergency rising maneuver. A 6-DOF submarine with four MBTs is considered. The equations of motion are derived and blowing air to the MBTs is modeled by compressible isentropic flow. Simulations are carried out for a typical submarine. The behavior of submarine is investigated in the emergency rising maneuver. Also, the effect of different parameters such as intake air characteristics on the angle of attack and drift and climbing time are studied. The results show that the rising time can be reduced by increasing the pressure of stored air and turning elevators.

Keywords: Submarine, Emergency Rising, Main Ballast Tank, Air Blowing Process.

۱- مقدمه

زیردریایی برای ماموریت‌های تحقیقاتی و نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که باید بتواند در آبهای عمیق به خوبی از عهده ماموریت‌های محوله برآید. با توجه به شرایط محیطی، ایمنی در همه زیردریایی‌ها یک مسئله مهم است. به طور کلی گیرکردن سطوح کنترلی و آب گرفتگی زیردریایی نمونه‌ای از اتفاقاتی هستند که ایمنی زیردریایی‌ها را به مخاطره می‌اندازد. به همین منظور زیردریایی‌ها باید در برابر این خطرات مقاوم باشند و اقدامات مناسبی در مواقع مواجه شدن با این خطرات صورت گیرد. از جمله‌ی این اقدامات، صعود اضطراری زیردریایی به سطح می‌باشد. لذا شناخت حرکت زیردریایی در حین انجام این مانور از اهمیت زیادی برخوردار است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. معمولاً نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی به صورت تابعی از پارامترهای حالت زیردریایی در نظر گرفته می‌شوند [۵-۱]. پس از استخراج نیروهای هیدرودینامیکی، می‌توان رفتار زیردریایی در ماموریت‌های مختلف را بررسی کرد [۸-۶].

در بیشتر تحقیقات تحلیل‌های دینامیک زیردریایی، مانورهایی بحث شده‌اند که حرکت زیردریایی فقط تحت تأثیر سطوح کنترلی آن واقع شده و تنها تعداد معدودی از محققین، صعود زیردریایی توسط مخازن ثابت شناوری (مخازن بالاست اصلی) را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در صورتی‌که باید توجه داشت در مانور صعود اضطراری، مخازن بالاست اصلی نقش بسیار موثری بر رفتار زیردریایی دارند. این مخازن به صورت طولی در زیردریایی قرار گرفته و با آب گیری مخازن، وزن زیردریایی بر نیروی شناوری غلبه کرده و باعث می‌شود زیردریایی به زیر آب رود. در صعودهای سریع و اضطراری، هوای فشرده شده به داخل مخازن بالاست دمیده شده و این موجب غلبه‌ی نیروی شناوری بر نیروی وزن می‌گردد و زیردریایی به سطح آب صعود می‌کند.

بتل^۱ و همکارانش مقدار چرخش زیردریایی حول محور طولی را در حین حرکت صعود برای زیردریایی‌های کوچک بررسی کرده‌اند [۹]. آنها معادلات ناویر استوکس را با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی حل کردند و اثرات متقابل سیال و جامد را به دست آوردند و چرخش زیردریایی حول محور طولی در حالت‌های مختلف صعود را بررسی نمودند. فونت^۲ و همکارانش فرایند تخلیه و پر شدن مخازن بالاست را به صورت ریاضی مدل کردند [۱۰]. آنها همچنین چرخش زیردریایی حول محورهای طولی و جانبی در هنگام صعود به سطح را کنترل کردند [۱۱، ۱۲].

طبق تحقیقات انجام شده، در کارهای قبلی تأثیر پارامترهای مختلف مخازن بالاست بر رفتار صعود زیردریایی کمتر مورد توجه قرار گرفته است تا مخازن بالاست بگونه‌ای طراحی شوند تا زیردریایی مانورپذیری مناسبی در صعود اضطراری داشته باشد.

در این مقاله رفتار دینامیکی زیردریایی در صعود اضطراری و تخلیه مخازن بالاست در حالت شش درجه آزادی بررسی شده و تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار زیردریایی در این مانور ارزیابی شده است. معادلات حرکت زیردریایی و نحوه مدل‌سازی نیروهای خارجی وارد بر زیردریایی توصیف شده است و مدلی برای تخلیه مخازن بالاست بر اساس دمیدن هوا در مخازن، ارائه شده است. برای ارزیابی مدل ارائه شده، مانور صعود اضطراری بر روی یک زیردریایی نمونه انجام شده و رفتار زیردریایی در این مانور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر پارامترهای مختلف بر زاویه‌های حمله و لغزش جانبی (دریفت)، زاویه‌های اوپلر و زمان رسیدن به سطح در مانور صعود بررسی شده است.

۲- معادلات حرکت زیردریایی

برای استخراج معادلات سینماتیکی و دینامیکی بردار حالت $x = [u, v, w, p, q, r, x_o, y_o, z_o, \phi, \theta, \psi]^T$ در نظر گرفته می‌شود. که (u, v, w) و (p, q, r) به ترتیب مولفه‌های سرعت‌های خطی و زاویه‌ای زیردریایی در جهات X ، Y و Z می‌باشند. همچنین موقعیت زیردریایی در دستگاه اینرسی اندازه‌گیری می‌شود (x_o, y_o, z_o) . (ψ, θ, ϕ) زاویه‌های اوپلر هستند که چرخش زیردریایی نسبت به سیستم مختصات اینرسی را بیان می‌کنند.

شش مختصات مستقل $\Pi = [u, v, w, p, q, r]^T$ برای استخراج معادلات حرکت سه بعدی زیردریایی استفاده می‌شوند. معادلات دینامیکی زیردریایی با استفاده از روش نیوتن اوپلر در دستگاه بدنی به دست می‌آیند [۱۳]. با توجه به اینکه مرکز دستگاه بدنی در نقطه O می‌باشد معادلات دینامیکی از روابط (۱) و (۲) حاصل شده‌اند.

$$m \cdot (\dot{v}_o + \omega \times v_o + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) = F_o \quad (1)$$

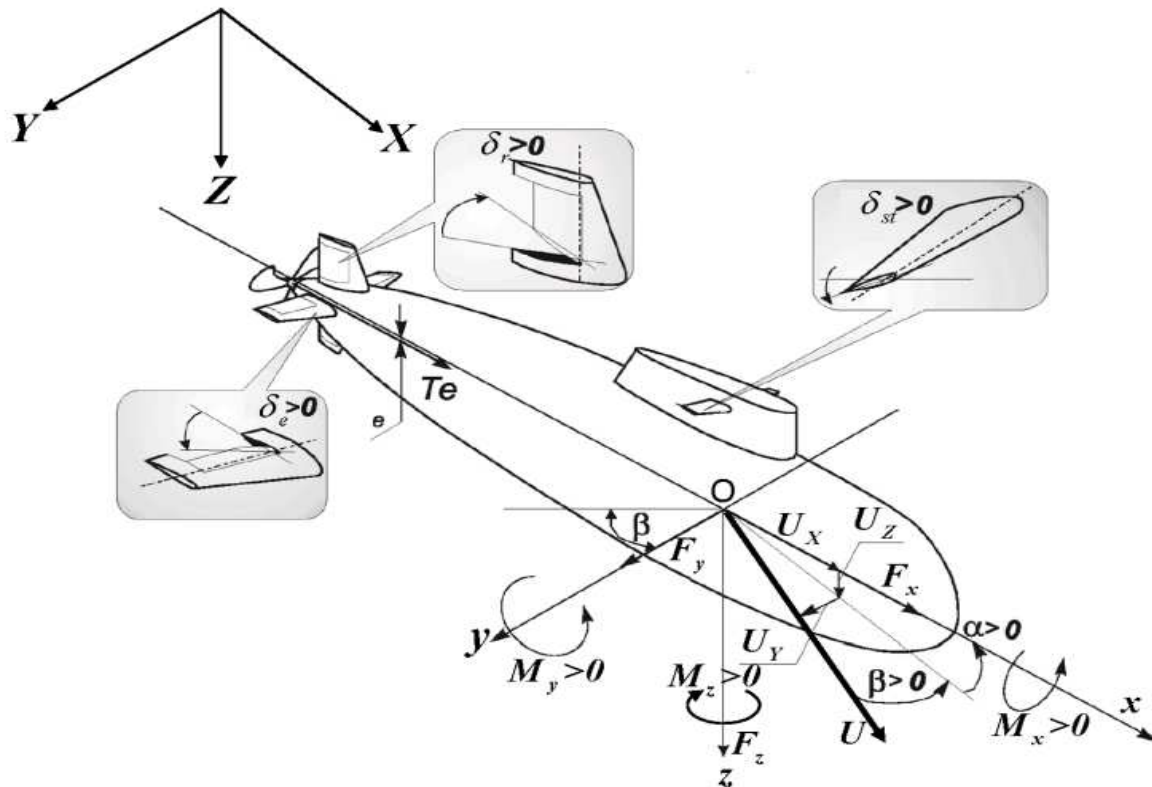
$$I_o \dot{\omega} + \omega \times (I_o \omega) + m \cdot r_G \times (\dot{v}_o + \omega \times v_o) = M_o \quad (2)$$

۳- نیروهای خارجی

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر زیردریایی شامل نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی بدنه، سطوح کنترل و جرم افزوده می‌باشند. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی، تابعی از زاویه حمله (α) ، زاویه دریفت (β) و سرعت زیردریایی (U) می‌باشند. برای تمایز دادن نیروها از زیرنویس‌های H برای نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی بدنه، A برای نیروها و گشتاورهای

¹ Bettle

² Font



شکل ۱- مدل یک زیردریایی

$$F_y^r = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3} \sigma_y^r \quad \& \quad F_z^q = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3} \sigma_z^q \quad (3)$$

$$M_y^q = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla \tau_y^q \quad \& \quad M_z^r = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla \tau_z^r \quad (4)$$

که σ_y^r ، σ_z^q ، τ_y^q و τ_z^r ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به اثرات هیدرودینامیکی متقابل هستند. اولین معادله (۳)، مربوط به نیروی راستای محور Y ناشی از چرخش حول محور Z و دومین معادله (۴)، نیروی راستای محور Z ناشی از چرخش حول محور Y می‌باشد. همچنین در معادله (۴) گشتاور حول محورهای Y و Z در اثر چرخش حول محورهای Y و Z به ترتیب به دست آمده‌اند.

۳-۲ نیروهای سطوح کنترلی

سطوح کنترلی شامل سطوح کنترلی افقی و عمودی عقب و سطوح پایدار کننده می‌باشند. نیروهای این سطوح کنترلی از روابط (۵) و (۶) محاسبه شده‌اند.

$$F_C = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla^{2/3} (\sigma_{C_r} + \sigma_{C_e} + \sigma_{C_{st}}) \quad (5)$$

$$M_C = \frac{1}{2} \rho U^2 \nabla (\tau_{C_r} + \tau_{C_e} + \tau_{C_{st}}) \quad (6)$$

که پانویس‌های r ، e و st به ترتیب برای سطوح کنترلی عمودی عقب، افقی عقب و پایدار کننده استفاده شده‌اند. لازم به ذکر

ناشی از جرم افزوده، C برای نیروها و ممانهای حاصل از سطوح کنترلی و P برای نیرو و ممان حاصل از پیشرانس استفاده شده است.

۳-۱ نیروهای هیدرودینامیکی بدنه

نیروهای برا و پسا وارد بر زیردریایی، نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی بدنه را ایجاد می‌کنند. به همین دلیل این نیروها با مجذور سرعت متناسب هستند. لذا در دستگاه بدنی،

$$F_H = \frac{\rho U^2 \nabla^{2/3} \sigma_H}{2} \quad \& \quad M_H = \frac{\rho U^2 \nabla \tau_H}{2} \quad \text{به ترتیب برای}$$

نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی بدنه در نظر گرفته می‌شوند. که

$$\tau_H = [\tau_{H,x} \quad \tau_{H,y} \quad \tau_{H,z}]^T \quad \& \quad \sigma_H = [\sigma_{H,x} \quad \sigma_{H,y} \quad \sigma_{H,z}]^T$$

شامل ضرایب هیدرودینامیکی بدنه می‌باشند. این ضرایب بی‌بعد هستند و به صورت تابعی از زاویه‌های حمله، دریافت و سرعت زیردریایی با استفاده از روش‌های تجربی محاسبه می‌شوند. همچنین U اندازه بردار سرعت زیردریایی و ∇ حجم آب جابجا شده می‌باشد.

علاوه بر نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی که توسط نیروهای برا و پسا بدنه ایجاد می‌شوند، نیروها و ممانهای دیگری وجود دارد که در اثر چرخش زیردریایی بوجود می‌آیند.

این نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی از روابط (۳) و (۴) محاسبه گردیده است.

است ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به سطوح کنترلی تابعی از زاویه‌های سطوح کنترلی و سرعت زیردریایی می‌باشند.

که \mathbf{r}_G و \mathbf{r}_B به ترتیب بردارهای موقعیت مرکز جرم و مرکز شناوری نسبت به مرکز دستگاه بدنی هستند.

۳-۳ نیروهای ناشی از جرم افزوده

نیروهای ناشی از جرم اضافه در اثر اینرسی سیال احاطه کننده از جانب سیال هیدرودینامیکی در جهت مخالف و متناسب با شتاب ایجاد می‌شوند [۱۴].

برای زیردریایی فرض می‌شود ضرایب ماتریس جرم افزوده ثابت هستند. بنابراین با این فرض با استفاده از مفهوم انرژی جنبشی سیال و معادلات کیرشهف^۱ نیروهای ناشی از جرم افزوده به دست می‌آیند [۱۵]. در معادلات (۷) و (۸) به ترتیب مولفه z ام نیروهای ناشی از جرم اضافه و مولفه z ام گشتاور ناشی از جرم اضافه بیان شده‌اند.

$$F_{A_j} = -\dot{\Pi}_i m_{A_{ij}} - \varepsilon_{jkl} \Pi_i \omega_k m_{A_{li}} \quad (7)$$

$$M_{A_j} = -\dot{\Pi}_i m_{A_{j+3,i}} - \varepsilon_{jkl} \Pi_i \omega_k m_{A_{l+3,i}} - \varepsilon_{jkl} \Pi_k \Pi_i m_{A_{li}} \quad (8)$$

که $i=1,2,3,4,5,6$ و $j,k,l=1,2,3$ در معادلات (۷) و (۸) استفاده می‌شوند. همچنین ε_{jkl} و $m_{A_{ij}}$ به ترتیب نشان دهنده‌ی عناصر تانسور جایگشت و ماتریس جرم افزوده هستند.

۴-۳ نیروهای پیشران

اگر سیستم پیشران، خارج از مرکزی نداشته باشد، سیستم پیشران نیرو و گشتاوری حول محور طولی زیردریایی ایجاد می‌کند که به ترتیب از $F_p = K_T \rho n^2 d_p^4$ و $M_p = K_Q \rho n^2 d_p^5$ ضرایب بدون بُعد سیستم پیشران هستند و دور و قطر پروانه به ترتیب با n و d_p نشان داده شده‌اند. اگر سیستم پیشران، خارج از مرکزی e داشته باشد (به شکل ۱ مراجعه شود) در این صورت گشتاور $M_p = F_p e$ نیز به معادلات اضافه می‌شود.

۳-۵ نیروهای جاذبه و شناوری

نیروهای شناوری و جاذبه همواره در راستای عمودی هستند. از آنجایی که معادلات حرکت در دستگاه محلی بیان شده‌اند، بنابراین این نیروها با استفاده از زاویه‌های اوپلر به دستگاه بدنی منتقل می‌شوند. از این رو برآیند این نیروها ($\mathbf{F}_w = \mathbf{W} + \mathbf{B}$) همچنین در دستگاه بدنی تابعی از زاویه‌های اوپلر خواهد بود. همچنین گشتاور حاصل از این نیروها حول مرکز دستگاه مختصات بدنی به صورت $\mathbf{M}_w = \mathbf{r}_G \times \mathbf{W} + \mathbf{r}_B \times \mathbf{B}$ محاسبه می‌شوند.

۳-۶ برآیند نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر زیردریایی

با در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی که در قسمت‌های ۳-۱ تا ۳-۵ ارائه شدند، بردارهای نیرو و گشتاور خارجی وارد بر زیردریایی به صورت رابطه (۹) خلاصه می‌شوند.

$$\mathbf{F}_o = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_{C_r} + \sigma_{C_e} + \sigma_{C_{st}} + \sigma^\omega)U^2 \rho V^{(2/3)} + \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_p \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_o = \frac{1}{2}(\tau_H + \tau_{C_r} + \tau_{C_e} + \tau_{C_{st}} + \tau^\omega)U^2 \rho V + \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_w + \mathbf{M}_p$$

معادلات ذکر شده در رابطه (۹) در حالت کلی تابعی از سرعت خطی و زاویه‌ای، شتاب خطی و زاویه‌ای، زاویه‌های اوپلر، زاویه‌های حمله، دریافت و سطوح کنترلی می‌باشند. به عبارتی مولفه i ام نیرو و گشتاور خارجی وارد بر زیردریایی بطور فشرده مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) خواهند بود.

$$F_i = F_i(\Pi, \dot{\Pi}, \eta, \alpha, \beta, \delta_r, \delta_e, \delta_{st}) \quad (10)$$

& $i=1,2,3$

$$M_i = M_i(\Pi, \dot{\Pi}, \eta, \alpha, \beta, \delta_r, \delta_e, \delta_{st}) \quad (11)$$

& $i=1,2,3$

که $\boldsymbol{\eta} = [\varphi, \theta, \psi]^T$

۴-۴ مدل تخلیه مخازن بالاست

مخازن بالاست اصلی وظیفه تغییر عمق سریع زیردریایی را به عهده دارند. با پر شدن این مخازن نیروی وزن بر نیروی شناوری غلبه کرده و زیردریایی غوص می‌کند و با دمیدن هوای پر فشار در این مخازن، آب داخل مخازن خالی شده و نیروی شناوری بر نیروی وزن غلبه می‌کند در این هنگام زیردریایی به سطح نزدیک شده و حرکت صعود سریع را انجام می‌شود. برای دقیق بودن مدل دینامیکی شش درجه آزادی زیردریایی، بایستی تغییرات وزن و شناوری با توجه به فرآیند دمیدن هوا در آنها به دست آید [۱۲].

۴-۱ تغییرات جرم در زمان دمیدن هوا

در بیشتر زیردریایی‌ها چندین مخزن بالاست به صورت طولی توزیع شده‌اند که به صورت مستقل یا وابسته پر و خالی می‌شوند. مخازن بالاست جلو بزرگتر از مخازن عقب بوده و بنابراین پیشانی زیردریایی سریعتر از دم آن صعود می‌کند. برای صعودهای اضطراری ابتدا در مخازن جلو هوا دمیده می‌شود و

^۱ Kirechhoff

باید توجه داشت فاصله بین مرکز شناوری و مرکز جرم قبل از شروع تخلیه مخازن ($\overline{BG_0}$) همواره ثابت است. در صورتی که در حین خالی شدن مخازن مقدار z_μ منفی می‌شود و فاصله بین مرکز شناوری و مرکز جرم در حین تخلیه مخازن افزایش پیدا می‌کند.

با خالی شدن آب مخازن بالاست، ممان‌های اینرسی نیز تغییر می‌کنند. این تغییرات در فرآیند دمیدن کوچک هستند ولی به منظور در نظر گرفتن این تغییرات در مدل دینامیکی، از رابطه (۱۶) برای محاسبه ماتریس ممان اینرسی در حین تخلیه مخازن استفاده شده است.

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 - \begin{bmatrix} \mu m_0 z_\mu^2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu m_0 (z_\mu^2 + x_\mu^2) & 0 \\ 0 & 0 & \mu m_0 x_\mu^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

که ماتریس ممان اینرسی قبل از فرآیند تخلیه (\mathbf{I}_0) همواره ثابت است.

۴-۲- مدل سازی فرآیند دمیدن هوا به داخل مخازن

مدل سازی برای مخازن بالاست نیازمند دانش کاملی از حجم هوا در مخازن شناوری V_{ai} است. این حجم تابعی از زمان، موقعیت مخازن، عمق و زاویه پیچ است. زیردریایی‌ها معمولاً دارای مخزن ذخیره کننده هوای فشار بالا می‌باشند که توسط نازل‌هایی مخازن بالاست را تغذیه می‌کنند. با استفاده از تئوری جریان تراکم پذیر، آیزنتروپیک، یک بعدی و بیشینه سرعت (یک ماخ) چگالی هوای فشرده به صورت معادله (۱۷) پیش بینی شده است.

$$\rho_r(t) = \rho_{r0} \left[1 - \frac{k-1}{2} C_1 (t-t_0) \right]^{\frac{2}{1-k}} \quad (17)$$

که t_0 زمان آغاز دمیدن، k ثابتی وابسته به سیال تراکم پذیر است. همچنین C_1 ثابتی وابسته به خصوصیات قطر نازل D و هوای فشرده شده است که از رابطه $C_1 = \frac{1}{\rho_{r0}} \left. \frac{d\rho_r}{dt} \right|_D$ به دست آمده است.

در ادامه فرض می‌شود شدت جریان جرم از مخازن ذخیره هوا متناسب با جرم خالی شده در مخازن هوا باشد که این مقدار معادل با $k=1$ در معادله (۱۷) است، از این رو چگالی هوای فشرده به صورت $\rho_r(t) = \rho_{r0} e^{C_1(t-t_0)}$ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه جرم کل هوا (m_a) در مخازن بالاست معادل با جرم هوای آزاد شده از مخزن ذخیره هوا و مجموع جرم هوا در مخازن از رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$m_a = m_{r0} (1 - e^{-C_1(t-t_0)}) = \sum_{i=1}^N m_{ai} \quad (18)$$

بعد از اینکه پیشانی شروع به صعود کرد عملیات دمیدن در مخازن عقب آغاز می‌شود. کلیه مخازن در خط مرکزی بدنه قرار گرفته‌اند و مرکز جرم دمیده شده به صورت (x_μ, y_μ, z_μ) تعریف می‌شود که جلوتر از مرکز شناوری قرار دارد. با در نظر گرفتن N مخزن بالاست، حجم کلی مخازن

$$V_T = \sum_{i=1}^N V_{Ti}$$

قرار دارد. همچنین کسر جرم دمیده شده به صورت

$$\mu = \frac{W_0 - W}{B} = \frac{\rho g V_a}{B} = \frac{\rho g}{B} \sum_{i=1}^N V_{ai}$$

می‌شود. که W_0 وزن اصلی زیردریایی به علاوه وزن مخازن بالاست پر از آب، W وزن واقعی زیردریایی، ρ چگالی آب، B نیروی شناوری، V_a حجم کل هوا در مخازن و V_{ai} حجم هوای مخزن بالاست نام است. در لحظه‌ای که فرآیند دمیدن در مخازن آغاز می‌شود V_{ai} صفر است و زمانی که آب مخازن خالی می‌شود $V_{ai} = V_{Ti}$ است. از این رو موقعیت طولی کسر جرم دمیده شده طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$x_\mu = \frac{1}{\mu} \sum_{i=0}^N x_{\mu i} \mu_i = \frac{1}{V_a} \sum_{i=0}^N x_{Ti} V_{ai} \quad (12)$$

مرکزیت عمودی z_μ وابسته به مرکزیت عمودی مخازن است. در حالت غوطه‌وری کامل که $\mu=0$ است، z_μ دارای مقدار اولیه تقریباً نزدیک بالای بدنه است و زمانی که به سطح می‌آید ($\mu > 0$) مخازن خالی شده و z_μ روی خط مرکزی زیردریایی قرار می‌گیرد. در بیشتر زیردریایی‌ها z_μ اولیه ۹۰٪ بیشینه شعاع بدنه $d/2$ است. از این رو z_μ مطابق رابطه (۱۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$z_\mu = \frac{1}{\mu} \sum_{i=0}^N z_{\mu i} \mu_i = \frac{-0.45d}{V_a} \sum_{i=0}^N (1 - \frac{V_{ai}}{V_{Ti}}) V_{ai} \quad (13)$$

علاوه بر آن چون مخازن بالاست نسبت به صفحه قائم متقارن هستند موقعیت جانبی مرکز مخازن روی خط مرکزی قرار می‌گیرد ($y_\mu = 0$).

با توجه به اینکه X_B با خالی شدن مخازن تغییری نمی‌کند، ارتباط بین موقعیت مرکز جرم (x_G, z_G) و مرکز کسر جرم دمیده شده (x_μ, z_μ)، با گرفتن ممان حول محورهای دستگاه بدنی به دست می‌آید.

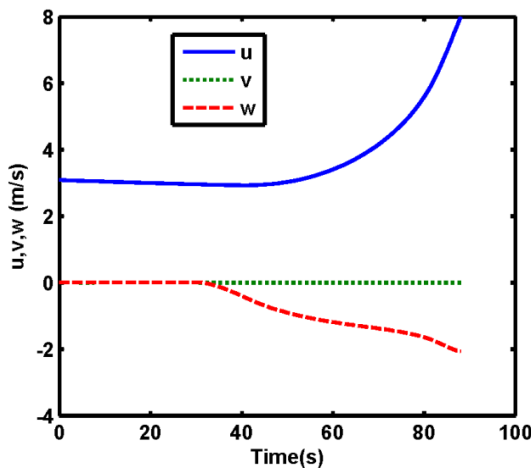
$$x_G = \left(x_B - \frac{\mu B}{W_0} x_\mu \right) \left(1 - \frac{\mu B}{W_0} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$z_G = \left(z_B + \overline{BG_0} - \frac{\mu B}{W_0} z_\mu \right) \left(1 - \frac{\mu B}{W_0} \right)^{-1} \quad (15)$$

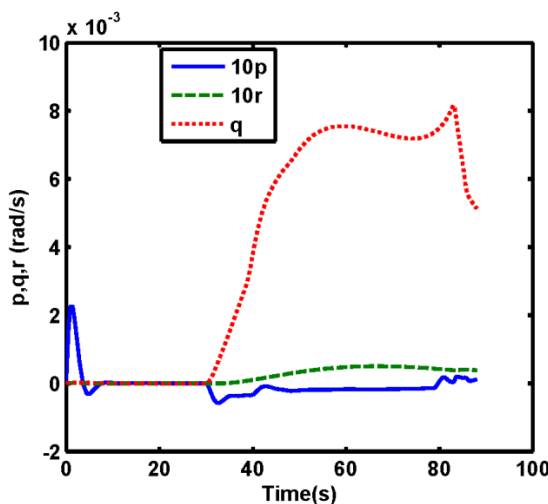
۵-۱- صعود اضطراری بدون تغییر سطوح کنترلی

در این حالت فرض شده زیردریایی در عمق ۱۰۰ متری در حرکت است. بعد از گذشت ۳۰ ثانیه، فرآیند تخلیه مخازن شروع می‌شود و زیر دریایی تنها در اثر شناوری مثبت ایجاد شده بالا می‌رود.

در شکل ۲ تغییرات سرعت‌های خطی برای این حالت نشان داده شده است. سرعت سرچ (u) در حین تخلیه مخازن افزایش می‌یابد، همچنین سرعت هیو (w) به سمت سطح در حال افزایش است. این تغییرات بدلیل زاویه پیچ مثبت و غلبه نیروی شناوری بر نیروی وزن است. در شکل ۳ نمودار سرعت‌های زاویه‌ای زیردریایی نشان داده شده است. همانطور که انتظار داشتیم در حین بالا آمدن زیردریایی، تنها سرعت زاویه‌ای حول محور جانبی (q) تغییرات چشمگیری دارد.



شکل ۲- مولفه‌های سرعت خطی در صعود اضطراری (حالت الف)



شکل ۳- مولفه‌های سرعت زاویه‌ای در صعود اضطراری (حالت الف)

در شکل ۴ موقعیت زیردریایی در دستگاه اینرسی آورده شده است. این نمودار بیان کننده آن است که زیردریایی در حین تخلیه مخازن به سمت بالا حرکت می‌کند و به سطح آب

در نتیجه جرم هوا در هر مخزن به صورت $m_{ai} = \frac{m_a V_{Ti}}{V_T}$

محاسبه می‌شود و $p_{ai} = p_{at} + \rho g z_{wi} = \rho_{ai} RT$ فشار اتمسفر، z_{wi} عمق مخزن در زیر آب (تا سطح آب)، ρ_{ai} چگالی هوا در مخزن، R ثابت گاز برای هوا و T دمای هوا در مخزن است. حجم هوا در هر مخزن از رابطه (۱۹) به دست آمده است.

$$V_{ai} = \frac{m_{ai}}{\rho_{ai}} \quad (19)$$

$$= \frac{m_{r0}}{(p_{at} + \rho g z_{wi}) V_T} (1 - e^{C_1(t-t_0)}) RT V_{Ti}$$

در حالتی که زیردریایی دچار پیچش θ می‌شود، مقدار z_{wi} برای مخازن مختلف متفاوت بوده و به حجم هوا در هر مخزن وابسته است.

$$z_{wi} = z_0 - x_{Ti} \sin \theta - 0.45d \cos \theta (1 - \frac{2V_{ai}}{V_{Ti}}) \quad (20)$$

رابطه (۲۰) برای $z_{wi} \gg 0$ برقرار بوده و با جایگزینی این رابطه در معادله (۱۹)، حجم هوای مخزن i محاسبه می‌شود.

$$V_{ai} = V_{Ti} \left(\Gamma_2 + [\Gamma_2^2 + \Gamma_3]^2 \right) \quad (21)$$

$$\Gamma_2 = \frac{-p_{at} - \rho g (z_0 - x_{Ti} \sin \theta - 0.45d \cos \theta)}{1.8 \rho g d \cos \theta} \quad (22)$$

$$\Gamma_3 = \frac{m_{r0} RT (1 - e^{C_1(t-t_0)})}{0.9 \rho g V_T \cos \theta} \quad (23)$$

بدین ترتیب میزان حجم آب داخل مخازن قابل محاسبه بوده و برای مدل‌سازی فرایند پُر و خالی شدن مخازن بالاست، جرم کل زیردریایی به صورت متغیر در مدل دینامیکی زیردریایی لحاظ شده است.

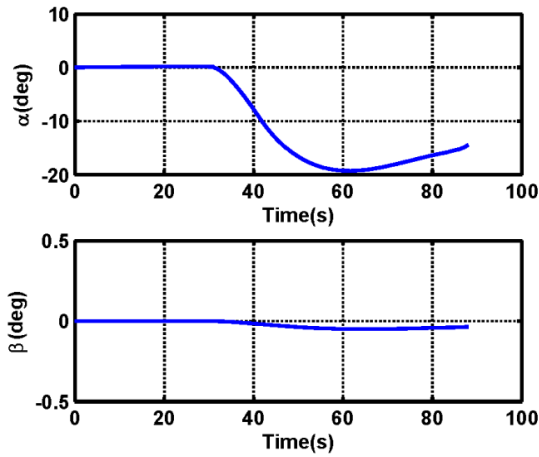
۵- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها برای یک زیردریایی نمونه به وزن ۶۰۰ تن و طول ۴۳ متر انجام شده است. ابتدا با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، ضرایب هیدرودینامیکی این زیردریایی برای زاویه‌های حمله و دریافت مختلف محاسبه شده و سپس در معادلات دینامیکی از آنها استفاده گردیده است.

زیردریایی دارای چهار مخزن بالاست است که مخازن یک و دو در جلو و مخازن سه و چهار در عقب مرکز زیردریایی قرار گرفته‌اند. در ادامه نتایج شبیه‌سازی مانور صعود اضطراری برای دو حالت ارائه گردیده است.

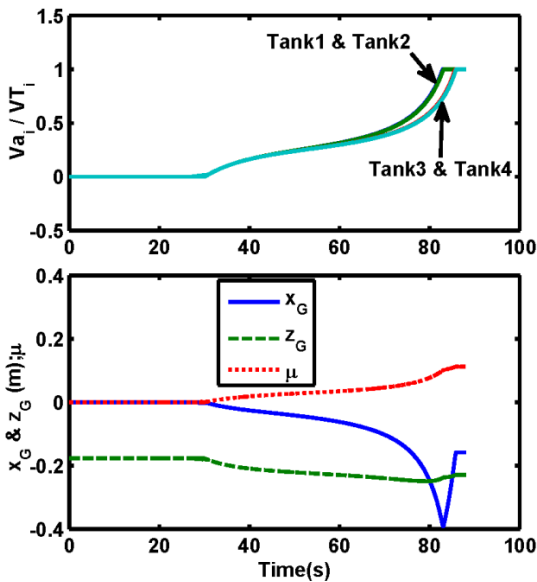
حالت الف) صعود اضطراری بدون تغییر سطوح کنترلی

حالت ب) صعود اضطراری با تغییر سطوح کنترلی



شکل ۶- زوایای حمله و لغزش جانبی در صعود اضطراری (حالت الف)

در شکل ۷ نمودار نسبت حجم هوا به حجم هر مخزن، کسر جرم دمیده شده (μ) و موقعیت مرکز جرم زیردریایی در دستگاه مختصات بدنی ارائه شده است. حین صعود دو مخزن جلویی زودتر از دو مخزن عقب تخلیه شده است. این تاخیر در تخلیه مخازن باعث می‌شود که منحنی موقعیت مرکز جرم یکنواخت نباشد بطوری که این عدم یکنواختی در موقعیت طولی به خوبی قابل مشاهده است.



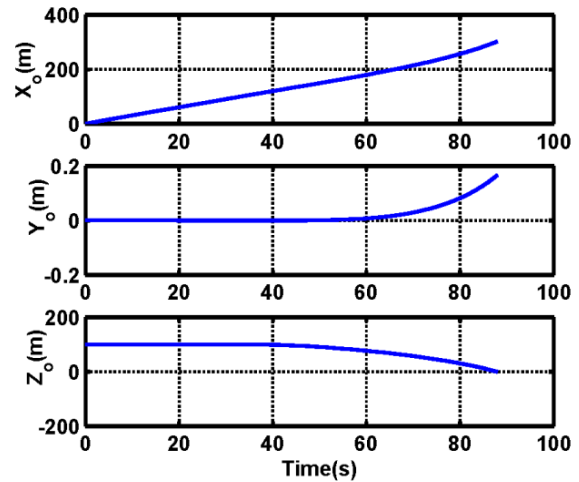
شکل ۷- نسبت حجم هوا به حجم هر مخزن (بالا)، کسر جرم دمیده شده در مخازن بالاست و موقعیت مرکز جرم در دستگاه مختصات بدنی (پایین)

۵-۲- صعود اضطراری با تغییر سطوح کنترلی

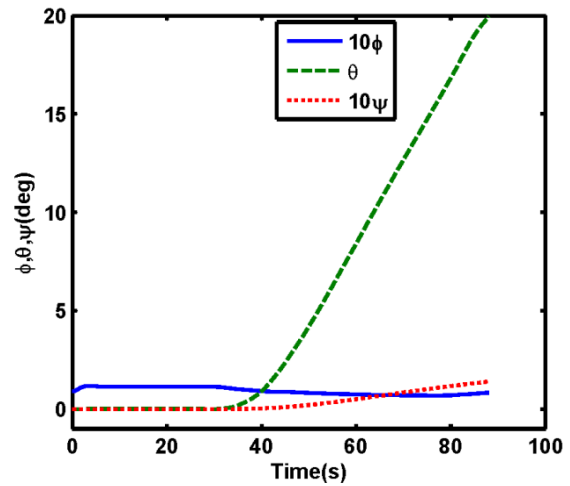
در این قسمت فرض می‌شود برای حالت اضطراری زیردریایی اقدام به صعود کند و علاوه بر مخازن بالاست، سطوح کنترلی نیز مورد استفاده قرار گیرند.

نزدیک می‌شود و تغییرات ناچیزی در حرکت جانبی دارد. نمودار زاویه‌های اوایلر در شکل ۵ نشان می‌دهد که زیردریایی در حین صعود از زاویه پیچ صفر با یک شیب تقریباً ثابت به سطح آب نزدیک می‌شود و به مقدار ۲۰ درجه می‌رسد.

شکل ۶ تغییرات زاویه حمله و زاویه دریافت را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل برمی‌آید شناوری مثبت باعث شده زاویه حمله مقدار قابل توجهی در حین مانور صعود داشته باشد.

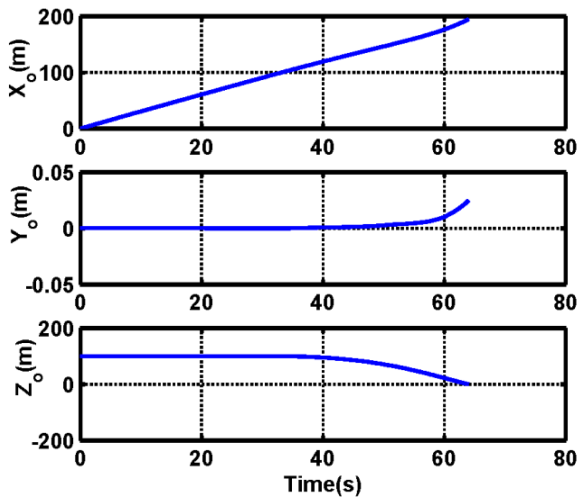


شکل ۴- تغییرات مختصات موقعیت مبدا دستگاه مختصات محلی در صعود اضطراری (حالت الف)

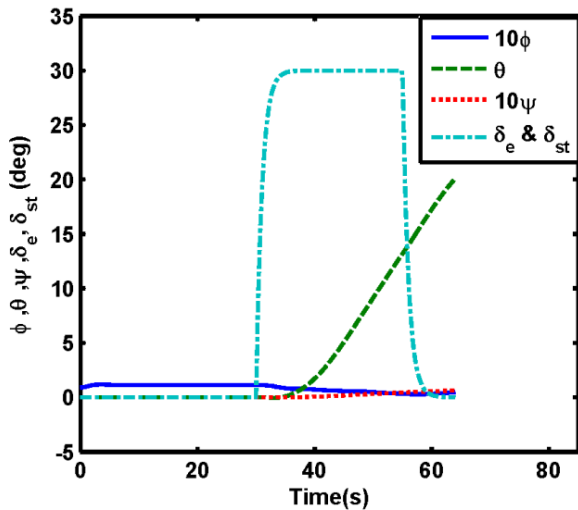


شکل ۵- زوایای اوایلر در صعود اضطراری (حالت الف)

در شکل ۱۰ موقعیت زیردریایی نشان داده شده است که در مقایسه با شکل ۴ نشان می‌دهد زیردریایی در این حالت ۲۴ ثانیه زودتر به سطح می‌رسد. در شکل ۱۱ زاویای اویلر و انحرافات سطوح کنترلی ارائه شده است. تغییر بالک‌های افقی مطابق شکل ۱۱ باعث می‌شود که نیروی برا زیاد شده و زیردریایی با زاویه حمله بیشتری به سطح نزدیک شود. بیشتر شدن زاویه حمله را می‌توان با مقایسه شکل ۱۲ و شکل ۶ استنباط کرد.



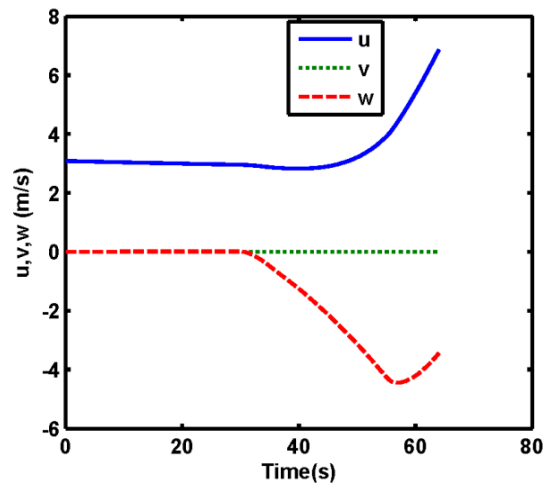
شکل ۱۰- تغییرات مختصات موقعیت مبدأ دستگاه مختصات محلی در صعود اضطراری (حالت ب)



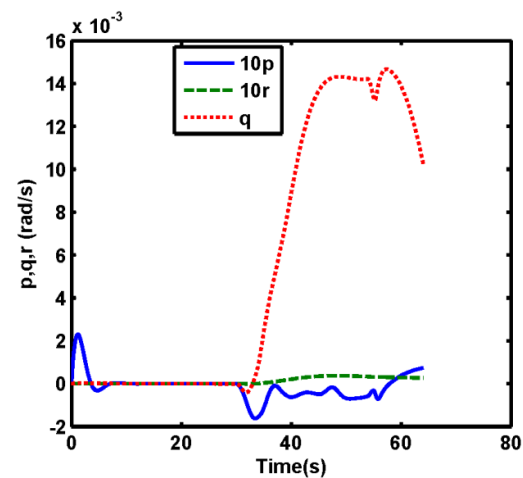
شکل ۱۱- زاویای اویلر و انحرافات سطوح کنترلی در صعود اضطراری (حالت ب)

همانند حالت قبل فرض می‌شود زیردریایی در عمق ۱۰۰ متری در حرکت است. بعد از گذشت ۳۰ ثانیه حرکت در این عمق مانور صعود اضطراری شروع می‌شود. همزمان با تخلیه مخازن بالاست، سطوح کنترلی افقی نیز شروع به چرخش می‌کنند. همچنین در این حالت فشار هوای ورودی به مخازن دوبرابر حالت قبل در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ سرعت‌های خطی زیردریایی در طی زمان تخلیه نشان داده شده است. با مقایسه شکل ۸ و شکل ۲، مشاهده می‌شود که در این حالت سرعت زیردریایی بیشتر از حالت قبل است در صورتی که سرعت اولیه برای هر دو حالت یکسان است.

در شکل ۹ مولفه‌های سرعت زاویه‌ای زیردریایی آورده شده است که در مقایسه با شکل ۳ معلوم است مولفه سرعت زاویه‌ای حول محور جانبی بطور قابل توجهی در این حالت بیشتر است و بیانگر آن است که در این حالت جهت زیردریایی سریعتر به سمت بالا حرکت می‌کند.



شکل ۸- مولفه‌های سرعت خطی در صعود اضطراری (حالت ب)



شکل ۹- مولفه‌های سرعت زاویه‌ای در صعود اضطراری (حالت ب)

از: زاویه سطوح کنترلی افقی عقب (δ_e)، سرعت اولیه زیردریایی (U_0)، ثابت C_1 و فشار هوای داخل مخازن در هنگام تخلیه کامل (P)، به منظور مقایسه تأثیر هر کدام از این پارامترها با یکدیگر، نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

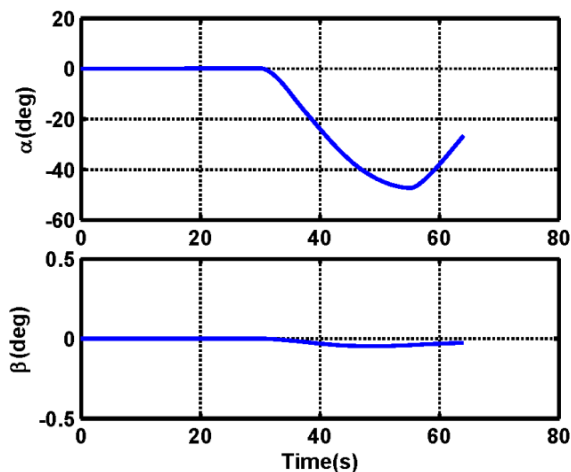
جدول ۱- مشخصه‌های صعود اضطراری

| $T_{h=0}$ (s) | $\min(\alpha)$ (deg) | α_f (deg) | θ_f (deg) | T_4 (s) | T_3 (s) | T_2 (s) | T_1 (s) | |
|------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| ۸۷،۸۰ | -۱۹،۲۸ | -۱۵،۲۶ | ۱۹،۳۲ | ۸۵،۹۰ | ۸۵،۷۱ | ۸۳،۱۶ | ۸۲،۹۵ | حالت الف |
| ۸۹،۱۰ | -۱۵،۷۴ | -۱۰،۵۲ | ۲۶،۳۴ | ۸۷،۷۶ | ۸۷،۵۳ | ۸۴،۲۸ | ۸۴،۰۵ | -۲۵ |
| ۸۱،۴۰ | -۳۲،۷۶ | -۳۰،۴۸ | ۱۸،۵۶ | ۷۹،۶۶ | ۷۹،۵۲ | ۷۷،۴۰ | ۷۷،۲۴ | ۲۵ |
| ۸۶،۲۰ | -۲۱،۶۴ | -۱۵،۰۸ | ۲۰،۷۳ | ۸۴،۴۷ | ۸۴،۲۶ | ۸۱،۵۹ | ۸۱،۴۰ | ۲/۵۰ |
| ۹۱،۷۰ | -۱۵،۵۵ | -۱۵،۴۵ | ۱۶،۱۷ | ۸۹،۳۶ | ۸۹،۱۸ | ۸۶،۷۷ | ۸۶،۶۹ | ۵/۱۰۰ |
| ۹۴،۴۰ | ۱۵،۲۳ | -۱۵،۲۲ | ۱۴،۲۴ | ۹۱،۷۸ | ۹۱،۷۰ | ۸۹،۴۴ | ۸۹،۲۸ | ۷،۵۰ |
| ۹۴،۵۰ | -۱۸،۱۹ | -۱۵،۴۲ | ۱۹،۴۳ | ۹۲،۸۹ | ۹۲،۶۸ | ۹۰،۰۷ | ۸۹،۸۸ | ۰،۰۵ |
| ۸۵،۳۰ | -۱۹،۷۰ | -۱۵،۱۹ | ۱۹،۲۹ | ۸۳،۲۹ | ۸۳،۱۲ | ۸۰،۵۸ | ۸۰،۳۷ | ۰،۱۵ |
| ۹۲،۷۰ | -۱۷،۸۳ | -۱۵،۰۶ | ۱۹،۶۹ | ۹۱،۸۹ | ۹۱،۶۷ | ۸۸،۹۸ | ۸۸،۸۰ | ۲،۵۰ |
| ۸۳،۹۰ | -۲۰،۷۸ | -۱۵،۵۹ | ۱۸،۹۹ | ۸۰،۹۸ | ۸۰،۷۹ | ۷۸،۲۷ | ۷۸،۱۰ | ۳،۵۰ |

نتایج مانور صعود اضطراری (حالت الف) در سطر اول داده‌های جدول ۱ ارائه شده است. در این حالت زاویه سطوح کنترلی صفر، سرعت اولیه ۳ متر بر ثانیه، $C_1 = 0.1$ و فشار هوای داخل مخازن در هنگام تخلیه کامل ۳ بار است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها زمان شروع تخلیه مخازن از ثانیه ۳۰ می‌باشد. در جدول ۱، T_i نشان دهنده زمان تخلیه کامل مخزن i ام است و اندیس f برای نشان دادن مقدار پارامتر (پیچ، زاویه حمله) در زمان خالی شدن تمامی مخازن استفاده شده است. همچنین در ستون آخر زمان لازم برای رسیدن به سطح $T_{h=0}$ آمده است. نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهند که:

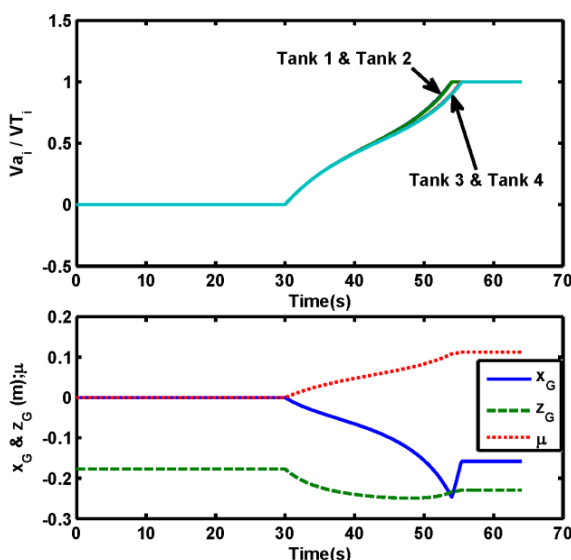
(۱) با افزایش زاویه سطوح کنترلی عقب در جهت مثبت، نیروی برا افزایش می‌یابد و در نتیجه زاویه حمله زیاد شده و زمان رسیدن به سطح را کاهش می‌دهد. دقت شود در این حالت، ممان حول محور جانبی در جهت منفی افزایش می‌یابد و همین امر باعث کاهش مقدار θ می‌شود. همچنین از آنجایی که فرآیند تخلیه مخازن تابعی از عمق است لذا در این حالت زمان تخلیه مخازن کاهش می‌یابد.

بر خلاف این حالت، در صورتیکه زاویه سطوح کنترلی افقی عقب در جهت منفی افزایش یابد زاویه حمله کمتر شده و در نتیجه زمان رسیدن به سطح افزایش می‌یابد و زمان تخلیه مخازن افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به افزایش ممان مثبت حول محور جانبی مقدار θ در این حالت زیاد می‌شود. به همین علت است که در زیردریایی‌ها برای کنترل زاویه حمله در هنگام صعود اضطراری توسط فرآیند تخلیه مخازن بالاست با سطوح کنترلی افقی استفاده می‌شود.



شکل ۱۲- زوایای حمله و لغزش جانبی در صعود اضطراری (حالت ب)

نسبت حجم هوا به حجم هر مخزن در طول حرکت در شکل ۱۳ نشان داده شده است که در مقایسه با حالت الف، مخازن بالاست تقریباً ۳۰ ثانیه زودتر خالی می‌شوند. همین امر باعث می‌شود که انحراف موقعیت مرکز جرم زیردریایی از موقعیت نهایی خود در این حالت کمتر باشد بطوری که این انحراف برای موقعیت طولی در این حالت حدود ۳۸ درصد حالت الف است. باید توجه داشت که چون مقدار آب تخلیه شده در هر دو مانور یکی است موقعیت نهایی مرکز جرم زیردریایی نیز در هر دو حالت یکسان خواهد بود.



شکل ۱۳- نسبت حجم هوا به حجم هر مخزن (بالا)، کسر جرم دمیده شده در مخازن بالاست و موقعیت مرکز جرم در دستگاه مختصات بدنی (پایین)

۵-۳- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر صعود اضطراری

در این قسمت تأثیر برخی از پارامترهای مهم بر رفتار زیردریایی در مانور صعود بررسی می‌شود. این پارامترها عبارتند

۲) اگر فرآیند تخلیه مخازن در سرعت اولیه بالاتری شروع شود زاویه حمله در طول حرکت کمتر می‌شود و در نتیجه زمان رسیدن به سطح افزایش می‌یابد. همچنین زمان تخلیه کامل مخازن افزایش پیدا می‌کند.

۳) اگر خصوصیات قطر نازل و هوای فشرده بگونه‌ای باشند که مقدار ثابت C_1 افزایش یابد زمان تخلیه مخازن کاهش می‌یابد و زاویه حمله در حین حرکت افزایش یافته و در نتیجه زمان رسیدن به سطح کمتر می‌شود. همچنین تغییر این پارامتر اثر قابل توجهی روی مقدار پیچ نهایی زیردریایی ندارد.

۴) افزایش فشار هوای داخل مخازن در هنگام تخلیه کامل باعث کاهش زمان تخلیه مخازن بالاست می‌شود و در نتیجه زاویه حمله افزایش یافته و زمان رسیدن به سطح را کاهش می‌دهد و تأثیر چندانی بر مقدار زاویه پیچ نهایی ندارد.

۶- نتیجه گیری

صعود اضطراری زیردریایی با مخازن ثابت شناوری (مخازن بالاست) بررسی شد. از نظریه جریان تراکم‌پذیر و ایزنتروپیک، فرآیند تخلیه هر مخزن بالاست به صورت تابعی از موقعیت مخزن، مقدار زاویه پیچ و عمق زیردریایی مدل سازی شد. شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت بدون تغییر سطوح کنترلی و با تغییر سطوح کنترلی انجام شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش زاویه سطوح کنترلی عقب در جهت مثبت در حین تخلیه مخازن بالاست، نیروی برا افزایش می‌یابد و در نتیجه زاویه حمله زیاد می‌گردد. همین امر موجب می‌شود سرعت زیردریایی بیشتر شده و زمان رسیدن به سطح کاهش یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش فشار هوای ذخیره شده باعث کاهش زمان تخلیه مخازن بالاست می‌شود و در نتیجه زاویه حمله افزایش یافته و زمان رسیدن به سطح را کاهش می‌دهد. از این رو فشار هوای ذخیره شده و تغییر سطوح کنترلی افقی عقب می‌توانند زمان رسیدن به سطح آب در مانور صعود اضطراری را کاهش دهند.

نمادها

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| B | نیروی شناوری |
| C_1 | ثابتی وابسته به خصوصیات قطر نازل |
| d_p | قطر پروانه |
| d | بیشینه قطر زیردریایی |
| D | قطر نازل |
| e | خارج مرکزی نیروی پیشران از محور مرکزی |
| F_o | بردار نیروی وارد بر زیردریایی |
| F_{P_x} | نیروی پیشران پروانه |
| F_w | بردار نیروی وزن |
| F_{A_j} | نیروهای ناشی از جرم اضافه |

| | |
|-------------------------|---|
| I_o | ماتریس ممان اینرسی حول مبدأ دستگاه بدنی |
| K_T | ضریب نیروی تولیدی پروانه |
| K_Q | ضریب گشتاور تولیدی پروانه |
| k | ثابتی وابسته به سیال تراکم پذیر |
| M_0 | بردار گشتاور وارد بر زیردریایی |
| M_{A_j} | گشتاورهای ناشی از جرم اضافه |
| M_{P_x} | گشتاور پیشران پروانه |
| M_w | بردار گشتاور وزن |
| m | جرم زیردریایی |
| $m_{A_{ij}}$ | ماتریس جرم افزوده |
| m_a | جرم هوا |
| m_{r0} | جرم کل هوای ذخیره شده |
| n | دور پروانه |
| P | فشار هوای داخل مخازن در هنگام تخلیه کامل |
| P_{ai} | فشار هوا در مخازن بالاست |
| P_{at} | فشار جو |
| p, q, r | مولفه های سرعت زاویه ای در دستگاه بدنی |
| r_B | بردار موقعیت مرکز شناوری در دستگاه بدنی |
| r_G | بردار موقعیت مرکز جرم در دستگاه بدنی |
| T | دمای هوای مخازن |
| U_0 | سرعت اولیه زیردریایی |
| U | اندازه سرعت زیردریایی |
| u, v, w | مولفه‌های سرعت خطی در دستگاه بدنی |
| V_T | حجم کلی مخازن |
| V_a | حجم کل هوا در مخازن |
| V_{ai} | حجم هوای مخزن بالاست i ام |
| V_{Ti} | حجم مخزن بالاست i ام |
| v_o | بردار سرعت خطی مبدأ دستگاه بدنی |
| W | وزن زیردریایی |
| W_0 | وزن زیردریایی در حالت غوطه وری |
| x_B, z_B | موقعیت طولی مرکز شناوری |
| x_G, z_G | موقعیت طولی و جانبی مرکز جرم در دستگاه بدنی |
| x_μ, z_μ | موقعیت مرکز جرم کسر جرم هوای دمیده شده در دستگاه بدنی |
| x_{Ti} | موقعیت مرکزیت محوری هر مخزن |
| x_o, y_o, z_o | موقعیت زیردریایی در دستگاه اینرسی |
| x_μ, y_μ, z_μ | مختصات مرکز جرم دمیده شده |
| z_{wi} | عمق سطح آب مخزن i ام |
| φ, θ, ψ | زوایای اویلر |
| α | زاویه حمله |
| β | زاویه دریافت |

on naval hydrodynamics, Washington, USA, pp. 478-489, 1996.

[4] Pankajakshan R., Remotigue M. G., Taylor L. K., Jiang M., Briley W. R., Whitfield D. L., "Validation of control-surface induced submarine maneuvering simulations using UNCLE", 24th symposium on naval hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 2003.

[5] Minnick L. M., "A Parametric Model for Predicting Submarine Dynamic Stability in Early Stage Design", M.S. Thesis, Virginia Tech, 2006.

[6] Saout O., "Computation of hydrodynamic coefficients and determination of dynamic stability", M.S. Thesis, Florida Atlantic University, 2003.

[7] D. J. Yeo, K. P. Rhee, "Sensitivity analysis of submersibles maneuverability and its application to the design of actuator inputs", Ocean Engineering, Vol. 33, pp. 2270-2286, 2006.

[8] Sen D., "A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies", Journal of Ship Research, vol. 44, no. 3, pp.186-196, 2000.

[9] Bettel M. C., Gerber A. G., Watt G. D., "Unsteady analysis of the six DOF motion of a buoyantly rising submarine", Computers and Fluids, vol. 38, no. 9, pp. 1833-1849, 2009.

[10] Font R., Ovalle D., Garcia J., "Modeling and Simulating Ballast Tank Blowing and Venting Operations in Manned Submarines", 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Rostock, Germany, pp. 67-72, 2010.

[11] Font R., Murillo J. A., Periago F., Pelaez J. G., "Controllability of a mathematical model for blowing and venting operations in submarines", XXII Congreso de Ecuaciones Diferencialesy Aplicaciones, Palma, Spain, 2011.

[12] Font R., Peláez J. G., Murillo J. A., Periago F., "Modelling, Analysis and Control of Blowing-Venting Operations in Manned Submarines", Journal of Control Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 1, pp. 37-49, 2014.

[13] Feldman J., DTNSRDC revised standard submarine equations of motion, David W. Taylor Naval Ship Research and Developmet Center, 1979.

[14] Lewandowski E. M., The Dynamics of Marine Craft Maneuvering and Seakeeping, Singapore, World Scientific, 2003.

[15] Fossen T. I., Guidance and Control of Ocean Vehicles, New York, John Wiley & Sons, 1994.

| | |
|---|--------------------------|
| بردار سرعت زاویه‌ای دستگاه بدنی | ω |
| عناصر تانسور جایگشت | \mathcal{E}_{jkl} |
| زاویه سطوح کنترلی عمودی عقب | δ_r |
| زاویه سطوح کنترلی افقی عقب | δ_e |
| زاویه سطوح کنترلی پایدار کننده | δ_{st} |
| چگالی سیال | ρ |
| چگالی هوای دمیده شده | ρ_r |
| چگالی هوای ذخیره شده | ρ_{r0} |
| کسر جرم دمیده شده | μ |
| چگالی هوا در مخازن | ρ_{ai} |
| حجم جابجایی زیردریایی | ∇ |
| ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به اثرات متقابل | σ_y^r, σ_z^q |
| | τ_y^q, τ_z^r |
| بردار ضرایب نیروی هیدرودینامیکی بدنه | σ_H |
| بردار ضرایب نیروی هیدرودینامیکی سطوح کنترلی عمودی عقب | σ_{C_r} |
| بردار ضرایب نیروی هیدرودینامیکی سطوح کنترلی افقی عقب | σ_{C_e} |
| بردار ضرایب نیروی هیدرودینامیکی سطوح کنترلی پایدار کننده | $\sigma_{C_{st}}$ |
| بردار ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی متقابل | σ^ω |
| بردار ضرایب گشتاور هیدرودینامیکی سطوح کنترلی عمودی عقب | τ_{C_r} |
| بردار ضرایب گشتاور هیدرودینامیکی بدنه | τ_H |
| بردار ضرایب گشتاور هیدرودینامیکی سطوح کنترلی افقی عقب | τ_{C_e} |
| بردار ضرایب گشتاور هیدرودینامیکی سطوح کنترلی پایدار کننده | $\tau_{C_{st}}$ |
| بردار ضرایب گشتاور هیدرودینامیکی متقابل | τ^ω |

مراجع

[1] Boger D., Davoudzadeh F., Dreyer J., McDonald H., Schott C., Aierke W., A. Arabshahi, "A physics-based means of computing the flow around a maneuvering underwater vehicle", Applied Research Laboratory, Penn State University, Technical Report no. 97-002, 1997.

[2] Watt G. D., Gerber A. G., Holloway A. G. L., "Submarine hydrodynamics studies using computational fluid dynamics", Canadian Marine Hydrodynamics and Structures Conference (CMHSC), 2007.

[3] McDonald H., Whitfield D., "Self-propelled maneuvering underwater vehicles", 21th symposium