

ISME2013-XXXX

شبیه سازی مانورهای یک زیردریایی با استفاده از مدل عددی دینامیکی غیرخطی

رضا دهقانی^۱، داوود میرزایی^۲، اسماعیل عابدی^۳، محمد علی بدری^۴

^۱ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمان / Rdeghani20@gmail.com

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان / davodmirzaee@gmail.com

^۳ مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مکانیک، اصفهان، ایران / esmaeil.abedi@gmail.com

^۴ استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان / malbdr@cc.iut.ac.ir

چکیده

مدل سازی دینامیک وسایل زیرآبی مورد بررسی قرار گرفته و یک نرم افزار شبیه سازی به صورت پارامتری تهیه شده است و برای بررسی حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی در مانورهای مختلف زیردریایی به مدل سازی دینامیکی پرداخته و در ادامه حساسیت سنجی مانورهای مختلف وسیله انجام شده است [۳].

در این پژوهش هدف شبیه سازی غیرخطی زیردریایی در مانورهای مختلف استاندارد می‌باشد. ابتدا با استفاده از معادلات نیوتن اویلر معادلات حرکت زیردریایی استخراج شده، سپس نیروهای خارجی وارد بر آن از جمله نیروهای هیدرودینامیکی، جاذبه و شناوری مورد توجه واقع شده است. در ادامه معادلات استخراج شده با مراجع استاندارد صحت سنجی شده و رفتار زیردریایی در مانورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از چالش‌های محققان در طراحی زیردریایی نیازمندی به محیط شبیه سازی به منظور بررسی دینامیک آن است تا بدین وسیله هزینه و انرژی در تست‌های تجربی و میدانی کاهش یابد. در این پژوهش با مدل سازی دینامیکی زیردریایی، مانورهای استاندارد آن بطور غیر خطی شبیه سازی شده است. برای مدل سازی دینامیکی از روش نیوتن اولر به علت استفاده از مختصات فضایی و سینماتیک پیچیده مسئله استفاده شده است. نیروهای هیدرودینامیکی در معادلات به صورت کلی در جهت‌های مختصات و تابعی از سرعت، زاویه حمله و دریافت در نظر گرفته شده است. نتایج گرفته شده از شبیه سازی با داده‌های تجربی صحت سنجی شده و همخوانی قابل قبولی در راستای بررسی رفتار زیردریایی در مانورهای استاندارد ملاحظه گردیده است.

مدل سازی دینامیکی

برای تعیین رفتار فیزیکی زیردریایی، دستگاه مختصات مناسبی جهت توصیف حرکت معرفی شده است. دو دستگاه مختصات به طور مستقل مورد توجه قرار گرفته و رابطه بین آن‌ها بیان شده است. این دو سیستم مختصات عبارتند از سیستم مختصات جهانی و سیستم مختصات بدنی. دستگاه مختصات جهانی نسبت به زمین تعریف شده و در صورتی که مرکز جاذبه در صفحه اصلی تقارن قرار داشته باشد مبدأ مختصات بدنی در آن نقطه قرار می‌گیرد.

شش مختصات مستقل برای تعیین موقعیت و جهت زیردریایی در نظر گرفته شده است. سه مختصات اول و مشتقات آن‌ها به ترتیب بیان کننده موقعیت و سرعت انتقالی و سه مختصات بعدی و مشتقات آن‌ها به ترتیب راستا و حرکت چرخشی را مشخص نموده اند. سرعت‌های انتقالی زیردریایی در دستگاه متصل به بدنه u ، v و w به صورت بردار U_1 و سرعت‌های زاویه ای زیردریایی در دستگاه بدنه p ، q و r با بردار U_2 تعریف شده اند. موقعیت در دستگاه مختصات جهانی با x ، y و z و با بردار η_1 و زوایای چرخش در این دستگاه را با ϕ ، θ ، ψ و بردار η_2 مشخص شده است. این زوایا به ترتیب زوایای چرخش حول محور x و y و z دستگاه جهانی هستند و به آن‌ها زوایای اویلر می‌گویند.

ارتباط بین دستگاه متصل به بدنه و دستگاه مرجع زمین توسط دو ماتریس انتقال یعنی حرکت انتقالی $R_1(\eta_2)$ و دورانی $R_2(\eta_2)$

واژه های کلیدی

مدل سازی دینامیکی، شبیه سازی غیرخطی، مانور، زیردریایی

مقدمه

زیردریایی وسیله‌ای شش درجه آزادی است که در زیر و سطح آب قابلیت مانور و حرکت دارد. با توجه به شرایط نامعین محیط اقیانوس، نیاز به محیطی برای شبیه سازی و انجام تست‌های مختلف ضروری است. علاوه بر آن امروزه نیاز نظامی، تحقیقاتی و اقتصادی بشر در اقیانوس‌ها موجب شده است که تحقیقات گسترده‌ای جهت ساخت زیردریایی‌های نظامی و تحقیقاتی انجام گیرد. طراحی زیردریایی‌ها بگونه‌ای است که قابلیت مانور حرکت در زیر و سطح آب را دارد. با توجه به مانورهای حرکتی مختلف، این وسیله باید قابلیت مانورهای تعریف شده کاربر را داشته باشد و علاوه بر آن در حین انجام این مانورها پایداری خود را نیز حفظ کند.

برای بررسی این موضوع لازم است رفتار این وسیله به درستی شبیه سازی گردد. به همین منظور بایستی مدل دینامیکی زیردریایی به نحوی استخراج گردد تا بتواند طبیعت فیزیکی رفتار زیردریایی را به خوبی پیش‌بینی کند. مهمترین تحقیقات انجام شده در این زمینه مدل‌سازی دینامیکی به صورت پارامتری برای زیردریایی به منظور بررسی پایداری دینامیکی آن می‌باشد [۱]. در پژوهشی دیگر [۲]

معرفی شده اند. خاطر نشان می‌سازد، این دو ماتریس تابعی از زوایای اولر (η_2) می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

روابط (1) بیانگر سینماتیک حرکت زیردریایی بوده و در ادامه دینامیک جسم صلب با استفاده از روش نیوتن اولر مدل سازی شده است. برای هر جسم صلب روابط دینامیکی به صورت روابط شماره (2) و (3) است. رابطه (2) معادله حرکت انتقالی و رابطه (3) معادله حرکت دورانی جسم صلب می‌باشد [4].

$$m \cdot (\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) = f_0 \quad (2)$$

$$I_0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) + m \cdot r_G \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) = m_0 \quad (3)$$

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر زیردریایی شامل نیروهای هیدرودینامیک وارد بر بدنه و تجهیزات آن، جرم افزوده و نیروهای هیدرودینامیکی حاصل از سطوح کنترل بوده و جرم افزوده با استفاده از روش کیرشهوف¹ در معادلات حرکت مدل گردیده اند [5]. نیروهای هیدرودینامیکی بدنه کامل، تابعی از زاویه حمله (α)، زاویه دریفت (β) و سرعت زیردریایی (v) می‌باشد. در پژوهش حاضر بردار سرعت در مرکز فشار وسیله به صورت سه بعدی و با زاویه حمله (α) با محور افقی و زاویه دریفت (β) نسبت به صفحه عمودی قرار داده شده است. لازم به ذکر است نیروی درگ خلاف جهت بردار سرعت وسیله در مرکز فشار آن و نیروی لیفت عمود بر جهت نیروی درگ و در جهت کاهش فشار مدل سازی گردیده است. CLH و CDH ضرایب نیروی درگ و لیفت بدنه زیردریایی بوده که تابعی از سرعت و زوایای حمله و دریفت و SH سطح مقطع خیس آن است.

$$D_H = \frac{1}{2} \rho S_H C_{DH}(\alpha, \beta, v) V_H^2 \quad (4)$$

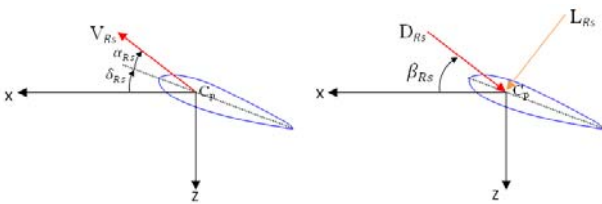
$$L_H = \frac{1}{2} \rho S_H C_{LH}(\alpha, \beta, v) V_H^2 \quad (5)$$

در رابطه درگ و لیفت سرعت در مرکز فشار بدنه V_H می‌باشد که به صورت $\vec{V}_H = \vec{V} + \vec{r}_{cp} \times \vec{\omega}$ شامل سرعت های خطی و زاویه ای می‌باشد. با توجه به جهت نیروی لیفت و درگ برای وارد کردن در معادلات حرکت، در جهات مختصات متصل به بدنه تصویر و بردار برآیند آن به عنوان F_H تعریف شده است. مبدا مختصات بدنه در مرکز جرم و نیروهای لیفت و درگ در مرکز فشار قرار داده شده و بردار فاصله بین مرکز جرم تا مرکز فشار با r_{cp} تعریف شده ممان حاصل از این نیروها (M_H) نیز بر طبق رابطه (7) مدل سازی شده است.

$$\vec{M}_H = \vec{r}_{CP} \times \vec{F}_H \quad (6)$$

علاوه بر ممان حاصل از نیروهای هیدرودینامیکی درگ و لیفت، ممان های دیگری موسوم به چرخش خالص و جریان های گردابی وجود دارند. چرخش خالص حول هر سه محور مختصات به ترتیب با ضرایب C_p ، C_q و C_r معرفی شده و برای نمونه ممان در اثر چرخش خالص حول محور افقی $M = -\frac{1}{2} \rho C_p p |p|$ تعریف شده است.

نیروهای حاصل از سطوح کنترل به صورت جدا گانه مدل سازی شده و در نهایت با یکدیگر جمع گردیده اند. در شکل 1 جهت نیروهای درگ و لیفت سطوح کنترل زیردریایی نمایش داده شده است. محل اعمال نیروهای هیدرودینامیکی در مرکز فشار سطح کنترل، حدود یک چهارم کورد² فویل می‌باشد [5]. زاویه سطح کنترل، α_{rs} زاویه حمله سطح کنترل و β_{rs} جمع این دو زاویه است.



شکل 1: نیروی درگ و لیفت وارد بر سطح کنترلی افقی به عنوان نمونه

نیروهای لیفت و درگ برای سطوح کنترل نیز مشابه بدنه با این تفاوت که در این حالت سرعت برآیند در صفحه اعمال شده و ضریب درگ و لیفت تابعی از زاویه سطح کنترل و سرعت است. نیروی برآیند درگ و لیفت در جهت های اصلی مختصات به صورت زیر مدل سازی شده است.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ L \end{bmatrix} \quad (7)$$

ممان حاصل از این نیروها حول محورهای مختصات بدنی عبارت است از:

$$\vec{M} = \vec{r}_{CP} \times \vec{F} \quad (8)$$

در رابطه 8 بردار \vec{r}_{CP} فاصله مرکز جرم زیردریایی تا مرکز فشار سطح کنترلی است. با توجه به نحوه مدل سازی، نیروهای بدنه و سطوح کنترل به صورت کلی زیر مدل شده اند. در روابط 9 و 10 زیر منظور از زیر نویس H کلیه نیروها و ممان های هیدرودینامیکی شامل درگ، لیفت و جرم افزوده کلیه بدنه با تجهیزات آن بوده، زیر نویس C نیروها و ممان های حاصل از سطوح کنترلی و زیر نویس P نیرو و ممان حاصل از پیشراننده زیردریایی است. همچنین W وزن زیردریایی، X_G بردار موقعیت مرکز جرم، B نیروی شناوری و X_B بردار موقعیت مرکز شناوری آن است [2].

$$\begin{aligned} F_i &= F_{iH}(\alpha, \beta, V) - (W - B) f_i(\eta_2) \\ &+ F_{iC}(\alpha, \beta, V) + F_{iP}(V) \end{aligned} \quad (9)$$

¹ chod

¹ kireshof

$$M_i = M_{iH}(\alpha, \beta, V) + Wf_i(\eta_2, X_G) + Bf_i(\eta_2, X_B) + M_{iC}(\alpha, \beta, V) + M_{iP}(V) \quad (10)$$

تحلیل عددی معادلات حرکت

معادلات دیفرانسیل حرکت کاملاً غیرخطی و وابسته اند. بنابراین روش های تحلیلی جوابگوی حل این معادلات نمی باشد. لذا برای حل معادلات حرکت به روش های عددی رجوع شده است.

برای سیستم های مرتبه بالاتر، تقریب اولر بسیار سخت است. به همین دلیل برای حصول دقت بالاتر و تکنیک های با جزییات بیشتر از روش رانگ کوتا مرتبه ۴ استفاده شده و معادلات دیفرانسیل با شرایط اولیه حل شده است. بین درستی و پیچیدگی محاسبات و مقدار انتخاب شده برای فرکانس حل یا بازه زمانی (h)، وابستگی زیادی وجود دارد. بطور کلی هرچه مقدار h کوچک تر شود، محاسبات طولانی تر ولی دقیق تر می شود. حال اگر مقدار h خیلی کوچک شود، برای اینکه نمی توان آنرا به درستی در رایانه نشان داد خطا ایجاد می شود.

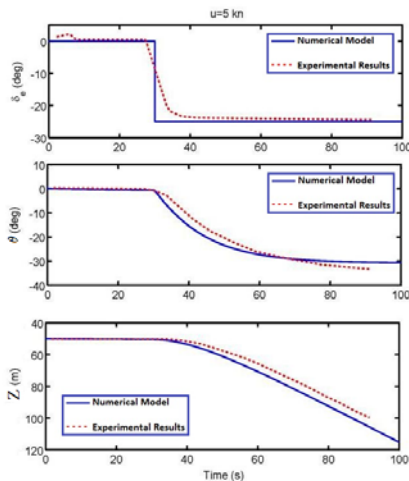
نتایج شبیه سازی غیرخطی

نتایج شبیه سازی حرکت زیردریایی با توجه به تحلیل عددی ارائه شده اند. برای این منظور شرایط گذرا و مانورهای تغییر عمق و گردش شبیه سازی شده و نتایج آنها ارائه گردیده اند. برای مانور تغییر عمق، ابتدا سطوح کنترلی بدون تغییر زاویه در نظر گرفته شده و پس از چند لحظه سطوح کنترلی الویتور در ماکزیمم مقدار تغییر زاویه داده اند. برای دو سرعت متفاوت شبیه سازی مانور تغییر عمق انجام گردیده که نتایج آنها در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این نتایج تاریخچه زمانی زاویه سطوح کنترلی الویتورها رسم گردیده است. برای این تغییر زاویه سطوح کنترلی و سرعت ۳ و ۵ نات، میزان تغییر عمق زیردریایی و سرعت تغییر عمق ترسیم شده است. علاوه بر آن میزان تغییر زاویه زیردریایی نیز نشان داده شده است. نتایج تجربی و شبیه سازی در دو سرعت مختلف تقریباً با یکدیگر همخوانی داشته بنابراین رفتار وسیله به درستی شبیه سازی شده است. در سرعت ۳ نات، ماکزیمم عمق زیردریایی در اثر ماکزیمم چرخش زاویه الویتور در ۱۶۰ ثانیه ۸۰ متر بوده در صورتی که در سرعت ۵ نات در ۱۰۰ ثانیه ۱۲۰ متر می باشد. زاویه پیچینگ ایجاد شده در این حرکت، در سرعت ۵ نات بیشتر از سرعت ۳ نات بوده ولی زمان رسیدن به زاویه پیچ ثابت در سرعت ۳ نات کمتر از سرعت ۵ نات می باشد.

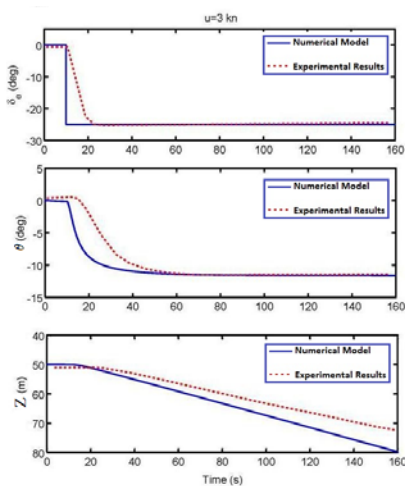
در شکل ۵ اثر وابستگی سطوح کنترلی استابلایزر و الویتورها در تغییر عمق نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود برای تغییر عمق زوایای الویتور و استابلایزر عکس یکدیگر حرکت می کنند تا عمق مورد نظر ایجاد شود. چرخش الویتور و استابلایزر بعد از ۵ ثانیه شروع شده و الویتور زاویه ۱/۵ درجه مثبت گرفته و این در صورتی است که استابلایزر ۲۰ درجه منفی گرفته است. جهت های مخالف این سطوح کنترلی به علت عقب و جلو قرار گرفتن از مرکز

جرم زیردریایی می باشد. بنابراین باید نیروی لیفت سطوح کنترلی ممان یکسانی ایجاد کنند تا عمق مورد نظر ایجاد شود.

برای مانور گردش در صفحه افق، زاویه رادر تغییر داده شده و ثابت باقی می ماند. در این صورت زیردریایی شروع به دور زدن نموده است. از این رو اثر میزان پالس چرخش رادر برای سرعت ۵ نات شبیه سازی گردیده است. در شکل ۶ نتایج شبیه سازی این مانور ارائه شده است. در این مانور ابتدا زاویه رادر برای چند ثانیه بدون تغییر بوده و در حدود ۳۰۰ ثانیه با ماکزیمم مقدار چرخش همراه بوده است. در ادامه با تغییر زاویه رادر مسیر زیردریایی تغییر کرده است. در نتایج شبیه سازی فراجھشی در ابتدای لحظه تغییر زاویه رادر مشاهده می شود که در ادامه به پایداری رسیده است. نتایج تجربی شبیه سازی های رایانه ای را در راستای صحت سنجی معادلات حرکت زیردریایی کاملاً همراهی می نماید.



شکل ۲: تغییر عمق با ماکزیمم چرخش سطوح کنترلی الویتور و سرعت ۵ نات



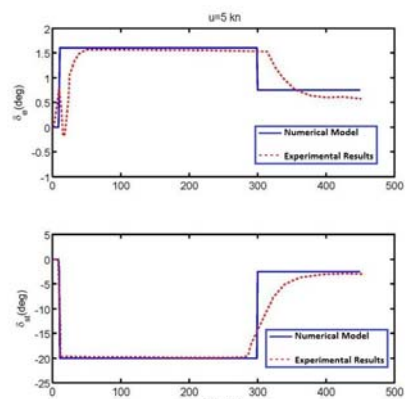
شکل ۳: تغییر عمق با ماکزیمم چرخش سطوح کنترلی الویتور و سرعت ۳ نات

نتایج گرفته شده نشان می‌دهد که نتایج شبیه سازی با رفتار واقعی وسیله تطابق داشته لکن انحرافات ناچیزی در بعضی از شکل ها وجود دارد. این انحرافات به علت عدم امکان ایجاد شرایط واقعی زیردریایی در شبیه سازی ها است. بنابراین می‌توان از روند دنبال کردن نمودارهای شبیه سازی، با نمودارهای واقعی حاصل از تست های تجربی، به صحت سنجی معادلات استخراج شده بر رفتار زیردریایی پی برد.

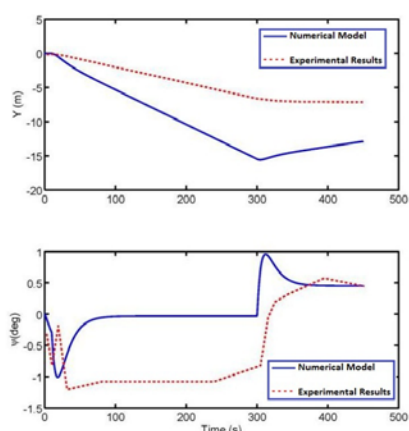
نتایج شبیه سازی در دو سرعت مختلف با تغییر زاویه الویتور برای تغییر عمق نشان داده است که تغییر عمق و زاویه پیچ با سرعت بالاتر بیشتر از سرعت پایین تر بوده ولی زمان رسیدن به زاویه پیچ ثابت در سرعت پایین، کمتر می‌باشد. شبیه سازی تغییر زاویه فرمان و بررسی رفتار زیردریایی در صفحه افقی با فراجشش هایی به هنگام تغییر زاویه فرمان همراه بوده است و در نهایت با نتایج تجربی مطابقت دارد.

مراجع

- [1] L. Minnick, "A Parametric Model for Predicting Submarine Dynamic Stability in Early Stage Design", Master of Science in Ocean Engineering, Virginia, 2006.
- [2] O. Saout, "Computation of hydrodynamic coefficients and determination of dynamic stability", M.S. Thesis, Department of Ocean Engineering, Florida Atlantic University, 2003
- [3] D. J. Yeo, K. P. Rhee, "Sensitivity analysis of submersibles manoeuvrability and its application to the design of actuator inputs" *Ocean Engineering*, pp. 2270-2286, 2006.
- [4] Fossen, T. I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [5] R. Burchur and L. Rydill, *Concepts In Submarine Design*, Cambridge University Press, 1994.
- [6] R. Burchur, L. Rydill, "*Concepts in submarine design*", University College London, February 1996
- [7] Oliiver. Saout, "Computation of hydrodynamic coefficients and determination of dynamic stability characteristics of an underwater vehicle including free surface effects", Master of Science Thesis, Florida Atlantic University, 2003..



شکل ۴: زوایای سطوح کنترلی استابلایزر و الویتور در در مانور تغییر عمق



شکل ۵: پارامترهای حرکتی با پالس چرخش رادر با سرعت ۵ نات

نتیجه گیری

در این پژوهش نحوه مدل سازی نیروهای هیدرودینامیکی و معادلات حرکت زیردریایی استخراج شده است. این معادلات کاملاً غیر خطی و وابسته است. روش های تحلیلی برای حل معادلات پاسخگو نبوده بنابراین روش های عددی مورد توجه قرار گرفته و شبیه سازی شده است. برای اطمینان از نحوه مدل سازی، نتایج شبیه سازی با داده های تجربی مقایسه شده است.