

حساسیت سنجی ضرایب هیدرودینامیکی یک زیردریایی به روش غیرمستقیم به منظور ارزیابی و بهینه سازی مانورپذیری

داود میرزایی*

محمدعلی بدری

احمد رضا زمانی

کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

یکی از موضوعات مهم در عملکرد زیردریایی‌ها درک صحیح از مانورپذیری و حساسیت آنها به تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی است. پارامترهای هیدرودینامیکی با آزمون‌های عملی قابل اندازه‌گیری هستند و ارتباط مستقیم با مشخصات هندسی و شرایط محیطی وسیله دارند. این ضرایب که در اثر تراکنش سیال با بدنه متحرک زیردریایی ایجاد می‌شوند مقادیر ثابتی نداشته و نامعین هستند. هدف اصلی در این مقاله، حساسیت سنجی ضرایب هیدرودینامیکی زیردریایی نظیر پارامترهای میرایی هیدرودینامیکی بدنه و ضمامم در سه مانور دایره‌ای، زیگ زاگ افقی و قائم می‌باشد. این پژوهش وابستگی قطر مانور دایره به ممان هیدرودینامیکی حاصل از سطوح کنترلی عمودی، عدم تاثیر ضرایب پسا در مقابل ضرایب برآ حاصل از بدنه و سطوح کنترل در پاسخ سیستم نتیجه گرفته شده است. در نهایت افزایش ضرایب برآ در افزایش مانورپذیری زیردریایی و افزایش پسا در کندی و پایدار بودن زیردریایی را ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، ضرایب هیدرودینامیکی، مانورپذیری، زیردریایی، روش نیوتن-اویلر.

Sensitivity Analysis of Hydrodynamic Coefficients for a Submarine by Indirect Method for Evaluation and Optimization of its Maneuverability

D. Mirzaei

M. A. Badri

A. R. Zamani

Subsea R&D center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Subsea R&D center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Subsea R&D center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

One of the essential subjects, affecting on submarine's performance is a comprehensive knowledge of its maneuverability and sensitivity to change hydrodynamic parameters. The hydrodynamic parameters are assessable by experiments which are directly related to geometric and environmental parameters. Since these coefficients are the result of the fluid-structure interaction, they have a degree of uncertainty and are not constants. The main objective of this paper is to evaluate the sensitivity of the hydrodynamic coefficient of a submarine to understand the its response to uncertainty of these coefficients. In this research, the dependence of hydrodynamic moment to circular maneuverability diameter resulted by rudders was investigated. Furthermore, low sensitivity of drag coefficients against lift coefficients by control surfaces and submarine body were also considered. Increasing of lift coefficient related to maneuverability and decreasing the drag in slowness and stability of submarine are of the other outcomes.

Keywords: sensitivity analysis, Hydrodynamic coefficient, maneuverability, Submarine, Euler-Newton Method

آنالیز حساسیت^۱ برای پیش بینی اثر تغییر در پارامترهای مدل بر روی

روی پاسخ مدل بکار می‌رود. با استفاده از آنالیز حساسیت، اطمینان از عملکرد مدل‌هایی که برای آزمونهای زیردریایی استفاده می‌شوند افزایش می‌یابد. برای ارزیابی مانورپذیری، آنالیز حساسیت به بررسی اثرات ضرایب هیدرودینامیکی بر روی عملکرد مانور می‌پردازد. آنالیز حساسیت بر روی ضرایب هیدرودینامیکی یک کشتی توسط هوآنگ در سال ۱۹۸۰ [۱] انجام شد. هوآنگ حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی را بعنوان بیشترین اختلاف در متغیرهای حالت تعریف کرد. در سال ۱۹۹۹ [۲] روش هوآنگ را مورد بحث قرار دادند. از نظر آنها این روش برای مقایسه‌ی حساسیت ضرایب در یک آزمایش با حساسیت بقیه ضرایب در دیگر آزمونها مناسب نبود. بنابراین، آنها یک روش که در آن بتوان حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی را مستقیماً سنجید پیشنهاد دادند. سن در سال

۱- مقدمه

هدف اصلی محققان در زمینه دینامیک حرکت وسایل زیرسطحی، ایجاد توانایی پیش‌بینی دقیق حرکت آنها با مقیاس اصلی می‌باشد. حتی امروزه با وجود ابزارهای محاسباتی قوی، پیش‌بینی مطمئن حرکت وسایل در تمامی مانورها امکان پذیر نمی‌باشد. پارامترهای هیدرودینامیکی یک زیردریایی اغلب با آزمایش بر روی یک مدل فیزیکی تعیین می‌شوند و معمولاً عدم قطعیت‌هایی در ارتباط با مقادیر دقیق آنها وجود دارد. یکی از عوامل موثر در کارایی وسیله‌ی مورد آزمایش، فهم قابلیت حرکت آن و حساسیت آن وسیله به تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی است. داشتن این اطلاعات در مورد وسیله‌ی مورد مطالعه بسیار مهم است، زیرا بعنوان یک مرجع آزمایشی برای سیستم‌های دیگر استفاده می‌شود. با استفاده از شناسایی رفتارهای ذاتی مختص یک وسیله، تشخیص رفتار سیستم مورد آزمایش آسان می‌شود. این عامل امکان ایجاد تصویر شفافتری را از رفتار سیستم مورد بررسی فراهم می‌نماید.

¹ Sensitivity Analysis (SA)

۲۰۰۰ [۳] آنالیز حساسیت را برای وسایل زیرسطحی انجام داد. حساسیت را بعنوان اندازه‌ی تغییرات در مشخصه‌های چندین آزمون دریایی مانند قطر تاکتیک و زاویه‌ی اورشوت در ضرایب هیدرودینامیکی تعریف کرد. کوران و همکارانش [۴] آنالیز حساسیت و نامعینی در هزینه عملکردی هواپیما در بهینه‌سازی طراحی انجام دادند. در تحقیق آنان به بررسی مدل سازی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت با استفاده از روش های بهینه سازی پرداخته شده است. علاوه بر این واریانس هزینه تولید، حساسیت بهینه سازی هزینه سوخت و بارگذاری سازه در نظر گرفته شده است. نتو و همکارانش [۵] تحلیل حساسیت به روش مستقیم با دیفرانسیل‌گیری مستقیم برای سیستم‌های چند قسمتی انعطاف پذیر با اجزای کامپوزیتی را انجام دادند. به منظور ارزیابی مزایای استفاده از این روش و برجسته کردن خطرات ناشی از این روش، حساسیت‌های تحلیلی درمقایسه با نتایج عددی به دست آمده با استفاده از روش اختلاف محدود مقایسه شده است. روش‌های آنالیز حساسیت به دو دسته کلی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم تابع حساسیت با دیفرانسیل‌گیری از معادلات حرکت نسبت به متغیرها (ضرایب هیدرودینامیکی) محاسبه می‌شود و در حالت غیر مستقیم این موضوع با تغییر متغیرها در مدل و حل معادلات دیفرانسیل مدل صورت می‌گیرد. روش آنالیز حساسیت مورد استفاده در این مقاله از روش غیر مستقیم می‌باشد.

حساسیت سنجی تاثیر دما در مدل مادی جانسون کوک فولاد های مختلف در [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نیز با استفاده از داده های تجربی و با روش غیر مستقیم آنالیز حساسیت انجام شده است. در مقاله [۷] روش سریع و مطمئن برای بهینه سازی آیرودینامیکی اجسام دو بعدی در جریان زیر صوتی ارائه شده است. ابتدا قدرت تحلیل جریان پیرامون اجسام دو بعدی توسط کد تدوین یافته مورد سنجش قرار گرفته است، همزمان تحلیل حساسیت تغییر پارامترهای آیرودینامیکی نسبت به هندسه ناکاهای (NACA) چهار رقمی نشان داده شده است. سپس بهینه سازی یکبار برای حداکثر برآ و بار دیگر برای حداقل پسا و در هر دو مورد با قیود بهینه سازی برای ناکاهای چهار رقمی صورت پذیرفته و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته اند. در تحقیق [۸] شناخت کامل یک شیء طراحی شده بررسی شده که مستلزم توصیف دقیق اجزای آن با استفاده از معادلات حاکم و همچنین ارزیابی مناسب و مطمئن از ضرایب متناظر با تغییرات احتمالی پارامترهای سازه ای و فرآیندی بر عملکرد آن شیئی و نحوه برهمکنش این تغییرات می‌باشد. در این راستا تحلیل حساسیت و استخراج توابع حساسیت پارامترهای مختلف ابزاری سودمند و کارآ خواهد بود. در این مقاله به کمک مدل ریاضی غیرخطی توابع حساسیت نسبت به ۱۶ پارامتر مختلف استخراج گردیده، ضرایب تاثیر این پارامترها بر خطای عملکردی و رفتار دینامیکی یک دستگاه کنترلی خاص مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق [۹] روش اجزا محدود فازی برای تحلیل سازه ها با پارامترهای دارای عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت حل دستگاه معادلات خطی فازی حاصل از استخراج معادلات اجزا محدود فازی از روش بهینه یابی پاول استفاده شده است. در نهایت مفهوم عدم اطمینان نسبی و ضریب افزایش عدم اطمینان نسبی تحلیل حساسیت

پاسخ سازه نسبت به پارامترهای مختلف آن در قالب یک مثال بیان شده است. در مقاله [۱۰] یک خودروی سنگین در نرم افزار ادمز به صورت کامل و به همراه زیر سیستم‌ها شامل هندسه سیستم تعلیق، مشخصات اینرسی، تایرها، کلیه مشخصات بوش‌ها و کمک فنرها مدل شده است، سپس برای انجام آنالیز DOE روی فنر تخت، مدل با المان تیر آنرا در همان نرم افزار ساخته شده و روی مدل کامل سوار شده و آزمون های مختلف بر روی آن انجام می‌شود. از طرفی امکان تغییر کلیه این پارامترها در مدل امکانپذیر می‌باشد. لذا خروجی‌های به دست آمده از آزمایش‌های انجام گرفته در نرم‌افزار، برای تحلیل آماری و انجام تحلیل آمایش‌ها به نرم‌افزارهای MINITAB و MATLAB فرستاده می‌شوند. بعد از انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای طراحی، موثرترین پارامترها انتخاب شده تا برای بهینه سازی سیستم بکار گرفته شود.

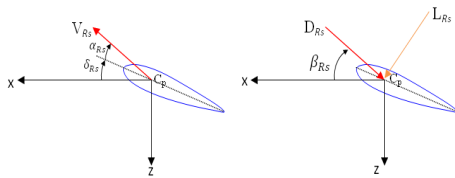
ضرایب هیدرودینامیکی به دو دسته ضرایب هیدرودینامیک جرم افزوده و ضرایب هیدرودینامیکی حاصل از میرایی‌های هیدرودینامیکی شامل اصطکاک پوسته، پسا فشاری و نیروی برآ بدنه تقسیم می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت غیرمستقیم، حساسیت تک تک ضرایب گفته شده، مانور حرکت دایره‌ای یا گشت زنی و مانور زیگ زاگ عمودی و افقی محاسبه شده است. حساسیت ضرایب بیان شده بر روی پارامترهای خروجی هر کدام از مانورهای گفته شده محاسبه گردیده و نتیجه‌گیری‌های لازم انجام پذیرفته است. در این مقاله ابتدا مدل‌سازی دینامیکی که مبنای حساسیت سنجی قرار گرفته توصیف شده (بخش ۲)، سپس روش آنالیز حساسیت و نتایج تحلیل به همراه مانورهای مورد بررسی به ترتیب در بخش‌های ۳ و ۴ آورده شده اند. همچنین در بخش ۵ نتیجه ارائه گردیده است.

۲- مدل سازی دینامیکی

۲-۱- سینماتیک

برای تعیین رفتار فیزیکی زیردریایی، معمولاً دو دستگاه مختصات به طور مستقل مورد توجه قرار گرفته و رابطه بین آن‌ها بیان می‌شود. این دو سیستم مختصات عبارتند از سیستم مختصات جهانی و سیستم مختصات بدنی. دستگاه مختصات جهانی نسبت به زمین تعریف شده است. 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. سرعت های انتقالی زیردریایی در دستگاه متصل به بدنه u, v, w و به صورت بردار V_1 و سرعت های زاویه ای زیردریایی در دستگاه بدنه p, q, r و Ω_1 و سرعت های زاویه ای چرخش در این دستگاه با ϕ, θ, ψ و بردار Ω_2 تعریف شده اند. موقعیت در دستگاه مختصات جهانی با x, y, z و با بردار η_1 و زوایای چرخش در این دستگاه با ϕ, θ, ψ و بردار η_2 مشخص شده‌اند. این زوایا به ترتیب زوایای چرخش حول محور X و Y و Z دستگاه جهانی هستند و به آن‌ها زوایای اوپلر می‌گویند. ارتباط بین دستگاه متصل به بدنه و دستگاه مرجع زمین توسط دو ماتریس

علاوه بر ممان حاصل از نیروهای هیدرودینامیکی پسا و برآ، ممان‌های دیگری موسوم به چرخش خالص و جریان‌های 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 با $M = -\frac{1}{2}\rho C_p p |p|$ 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 (۱) جهت نیروهای پسا و برآ سطوح کنترل زیردریایی نمایش داده شده است. محل اعمال نیروهای هیدرودینامیکی در مرکز فشار سطح کنترل، حدود یک چهارم کورد^۲ فویل در نظر گرفته شده است $[17]$. زاویه سطح کنترل، α_{rs} زاویه حمله سطح کنترل و β_{rs} جمع این دو زاویه می‌باشد. (شکل ۱)



شکل ۱- نیروی پسا و برآ وارد بر سطح کنترلی افقی

در ادامه نیروی برآیند پسا و برآ در جهت‌های اصلی مختصات به صورت رابطه (۹) مدل سازی شده اند.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\beta & \sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ L \end{bmatrix} \quad (9)$$

ممان حاصل از این نیروها حول محورهای مختصات بدنی عبارت است از $\vec{M} = \vec{r}_{CP} \times \vec{F}$. 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.

$$F_i = F_{iH}(\alpha, \beta, V) - (W - B)f_i(\eta_2) + F_{iC}(\alpha, \beta, V) + F_{iP}(V) \quad (10)$$

$$M_i = M_{iH}(\alpha, \beta, V) + Wf_i(\eta_2, X_G) + Bf_i(\eta_2, X_B) + M_{iC}(\alpha, \beta, V) + M_{iP}(V) \quad (11)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، منظور از زیرنویس H کلیه نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی شامل درگ، برآ و جرم افزوده کلیه بدنه با تجهیزات آن بوده، زیر نویس C نیروها و ممانهای 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 [۲]. معادلات فوق با توجه به ماهیت غیرخطی و شش درجه آزادی با روش عددی رانگ کوتا (ODE45,23) در نرم افزار MATLAB حل گردیده و نتایج آن برای مانورهای مشخص شده برای تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انتقال یعنی ماتریس انتقالی $R_1(\eta_2)$ و ماتریس دورانی $R_2(\eta_2)$ ، و به صورت روابط (۱) تا (۳) تعریف می‌شوند. خاطر نشان می‌سازد، این دو ماتریس تابعی از زوایای اوپلر (η_2) می‌باشند. در این روابط $s\theta = \sin\theta$ ، $c\theta = \cos\theta$ در نظر گرفته شده اند.

$$R_1 = \begin{bmatrix} c\theta.c\psi & s\phi.s\theta.c\psi - c\phi.s\psi & c\phi.s\theta.c\psi + s\phi.s\psi \\ c\theta.s\psi & s\phi.s\theta.s\psi + c\phi.c\psi & c\phi.s\theta.s\psi - s\phi.c\psi \\ -s\theta & s\phi.c\theta & c\phi.c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & s\phi.c\theta \\ 0 & -s\phi & c\theta.c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

۲-۲- جنبش شناسی

دینامیک جسم صلب با روش نیوتن اوپلر مدل سازی شده است. برای هر جسم صلب روابط دینامیکی شامل حرکات انتقالی و دورانی به صورت روابط شماره (۴) و (۵) تعریف می‌گردد [۱].

$$I_0\dot{\omega} + \omega \times (I_0\omega) + m.r_G \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) = m_0 \quad (4)$$

$$m(\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) = f_0 \quad (5)$$

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 کیرشهف^۱ در معادلات حرکت مدل گردیده اند [۵]. نیروهای هیدرودینامیکی بدنه کامل، تابعی از زاویه حمله (α)، زاویه دریفت (β) و سرعت زیردریایی (V) می‌باشند. 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 پسا خلاف جهت بردار سرعت وسیله در مرکز فشار آن و نیروی برآ عمود بر جهت نیروی پسا و در جهت کاهش فشار مدل سازی گردیده است. در روابط (۶) الی (۸)، C_{DH} و C_{LH} ضرایب نیروی پسا و برآ بدنه زیردریایی بوده که تابعی از سرعت و زوایای حمله و دریفت S_H سطح مقطع خیس آن است.

در روابط (۶) و (۷) سرعت در مرکز فشار بدنه V_H به صورت $\vec{V}_H = \vec{V} + \vec{r}_{cp} \times \vec{\omega}$ شامل سرعت‌های خطی و زاویه ای در نظر گرفته شده است. با توجه به جهت نیروی برآ و پسا برای اعمال 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 برآ (D_H) و پسا (L_H) در مرکز فشار قرار داده شده و بردار فاصله بین مرکز جرم تا مرکز فشار با r_{cp} تعریف شده است. ممان حاصل از این نیروها (M_H) نیز بر طبق رابطه (۸) مدل سازی شده است.

$$D_H = \frac{1}{2}\rho S_H C_{DH}(\alpha, \beta, v) V_H^2 \quad (6)$$

$$L_H = \frac{1}{2}\rho S_H C_{LH}(\alpha, \beta, v) V_H^2 \quad (7)$$

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

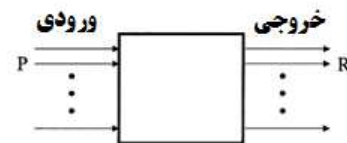
² chord

¹ kiroshof

۳- روش تحلیل حساسیت

هدف از حساسیت سنجی تعیین اثر تغییرات پارامترهای خاص بر روی پاسخ وسیله در چند مانور استاندارد می باشد. بطور کلی حساسیت خروجی به یک ورودی خاص (شکل ۲) با مقایسه‌ی مقادیر متغیر پاسخ (متغیر خروجی R) و پارامتر ورودی P ، به مقادیر میانگین یا شرایط مرجع که با اندیس nom مشخص شده است، محاسبه میگردد. در هر مورد حساسیت اندازه‌ی پاسخ به تغییر در پارامتر با معادله‌ی پیشنهادی سن^۱ [۳] محاسبه شده است:

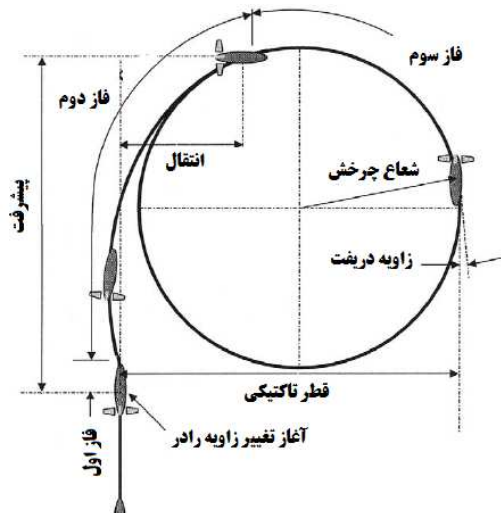
$$S = \frac{(R - R_{nom})/R_{nom}}{(P - P_{nom})/P_{nom}} \quad (12)$$



شکل ۲- بلوک دیاگرام کلی ورودی/خروجی

مقدار S را می‌توان برابر با درصد تغییر در متغیر پاسخ اندازه گیری شده و به میزان ۱٪ تغییر در پارامتر ورودی در نظر گرفت. در این مقاله مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی در یک محدوده‌ی مشخص بعنوان ورودی مدل دینامیکی تغییر داده شده و مقدار حساسیت مشخصه‌های زبرداری در مانورهای خاص به تغییر ضرایب هیدرودینامیکی ارزیابی گردیده است. مقدار حساسیت محاسبه شده مثبت یا منفی می‌باشد. حساسیت مثبت نشان دهنده تغییر مثبت رفتار با تغییر پارامتر و حساسیت منفی به تاثیر معکوس پارامتر یا ضریب دلالت دارد. برای اندازه گیری پاسخ وسیله به تغییر در پارامترهای طراحی، مانور حرکت دایره‌ای و مانورهای زیگ زاگ افقی و عمودی انتخاب شده‌اند. این مانورها معمولاً تستهای استاندارد هستند که بر روی کشتی‌ها و زبرداری‌ها انجام می‌شوند و ضوابط قابل فهمی را برای ارزیابی کارایی مهیا می‌نمایند.

در مانور حرکت دایره‌ای، وسیله یکنواخت حرکت می‌کند. زمانی که به عمق مورد نظر رسید و راستای حرکت آن مستقیم شد، رادر در یک زاویه‌ی مشخص قرار گرفته، بطوریکه وسیله شروع به چرخیدن می‌کند (شکل ۳). زاویه‌ی رادر در طی حرکت چرخشی، ثابت باقی می‌ماند. در مانور گشت زنی، چندین پارامتر که بعنوان مشخصه‌های کارایی استفاده می‌شود، وجود دارد. مهمترین این پارامترها قطر دایره، پیشرفت^۲، انتقال و زمان رسیدن به زاویه^{۱۸۰} می‌باشد. شعاع دایره بعنوان یک شاخص پاسخ پایای وسیله و پیشرفت شاخص پاسخ گذرای سیستم می‌باشد (شکل ۳). منظور از پیشرفت عبارت است از فاصله‌ی عمودی وسیله در شروع تا زمانیکه به زاویه ۹۰ درجه می‌رسد.



شکل ۳- مانور حرکت دایره‌ای

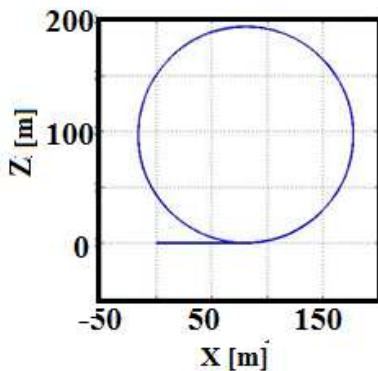
برای شبیه سازی این حرکت، زاویه انحراف رادر ابتدا صفر در نظر گرفته شده و مقدار آن با یک شیب افزایشی زیاد شده تا اینکه با رسیدن به زاویه انحراف ۲۰° ثابت باقی مانده است. گام زمانی ۰/۱ ثانیه و زمان شبیه سازی ۲۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نظر در مانور حرکت دایره‌ای در زاویه‌ی یا متناسب، در طی مسیر حرکت شبیه سازی شده اندازه گیری شده‌اند.

مانور حرکت زیگ زاگ در صفحه افقی با حرکت زاویه رادر به زاویه مورد نظر و با کنترل زاویه فرمان وسیله (ψ) و تغییر زاویه رادر به جهت مخالف انجام گردیده است. با توجه به این که زاویه رادر با سرعت زاویه‌ای حدود ۵° بر ثانیه انجام شده است، تغییر زاویه با شیب ۵° و با توجه به زاویه مورد نظر طی زمان مشخص صورت گرفته است. در ابتدای این مانور، وسیله چند ثانیه در وضعیت مستقیم الخط حرکت نموده و در ادامه با اعمال زاویه به رادر، مانور انجام شده است. پارامترهای اصلی در این مانور پیروی حرکت وسیله، زمان رسیدن وسیله از وضعیت افقی به بیشینه دامنه حرکت زیگ زاگ و فراجش یا به عبارتی دیگر دامنه زاویه مانور زیگ زاگ است. به دلیل کوپل بودن معادلات حرکت، حرکت زیگ زاگ وسیله در صفحه افقی ثابت نبوده و وسیله در عمق حرکت میکند. شکل ۴ تغییر زاویه رادر و اجرای حرکت وسیله در مانور زیگ زاگ نمایش می‌دهد. در این شکل متغیرهای reach, τ, γ, γ₀, p₀ و δc به ترتیب نشان دهنده زمان رسیدن، پیروی زمانی، زاویه فرمان یا پاسخ، دامنه زاویه‌ای حرکت زیگ‌زاگ، دامنه موقعیتی حرکت زیگ زاگ و زاویه ورودی سطوح کنترل می‌باشند. ورودی شبیه‌سازی این حرکت تغییرات زاویه‌ی انحراف رادر است و با توجه به مقادیر زاویه‌ی یا در طی این حرکت پارامترهای فراجش، پیروی زمانی و زمان رسیدن اندازه گیری شده است. گام های زمانی در این حرکت و زمان شبیه‌سازی همانند مانور دایره‌ای بترتیب ۰/۱ ثانیه و ۲۰۰ ثانیه می‌باشد.

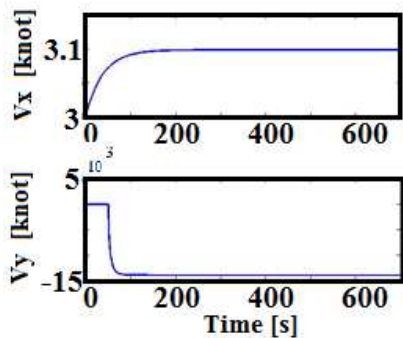
نتایج ارائه شده از طریق برنامه کامپیوتری که به زبان MATLAB توسط نگارندگان تهیه گردیده استخراج شده است.

¹ Sen
² Advance

هستند. در ادامه حساسیت هر کدام از ضرایب هیدرودینامیکی زیردریایی به صورت نمودار میله ای نمایش داده شده است. در شکل های ۵ تا ۷، شبیه سازی حرکت زیردریایی در مانور دایره به ترتیب موقعیت، سرعت و وضعیت نمایش داده شده است. این مانور در سرعت اولیه ۳ نات انجام شده و همانطور که مشاهده می گردد سرعت دور زدن زیردریایی برابر ۱ درجه بر ثانیه بوده و همچنین سرعت جانبی زیردریایی نیز نسبت به سرعت رو به جلو ناچیز می باشد.



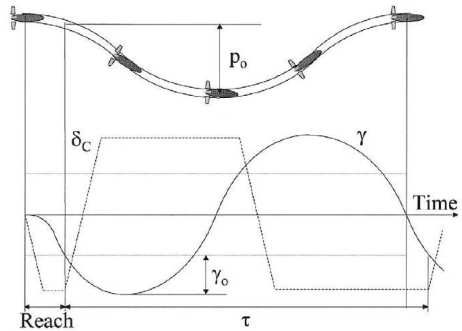
شکل ۵- حرکت زیردریایی در صفحه افق در طول حرکت زیگ زاگ



شکل ۶- مقادیر سرعت خطی در راستاهای X و Z در طول مانور زیگ زاگی افقی

در شکل ۸ نمودار حساسیت قطر تاکتیکی و زمان رسیدن به ۱۸۰ درجه و زمان شروع واکنش نسبت به تغییر زاویه رادر برای همه ضرایب هیدرودینامیکی نامبرده در کنار یکدیگر مقایسه شده اند. قطر تاکتیکی حساسیتی منفی نسبت به ضریب C_X داشته و این بدین مفهوم بوده که با افزایش این ضریب قطر تاکتیکی کم می شود. این مفهوم از نظر فیزیکی هم قابل قبول بوده که هر چقدر مقاومت سیال در برابر حرکت در جهت طولی بیشتر باشد وسیله قطر کوچکتری را دور خواهد زد.

حساسیت زمان رسیدن به ۱۸۰ درجه مثبت بوده بدین مفهوم که در اثر افزایش مقاومت سیال در برابر حرکت در جهت طولی زمان رسیدن به ۱۸۰ درجه در مانور دایره بیشتر خواهد شد. ولی محدوده حساسیت این پارامتر نسبت به دو پارامتر دیگر کمتر است. حساسیت ضریب هیدرودینامیکی جانبی زیردریایی در مانور دایره در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴- معرفی مانور زیگ زاگ

برای کار با این برنامه ابتدا زیربرنامه های اطلاعات هندسی^۱، ماتریس انتقال^۲، ماتریس جرم افزوده^۳، نیروهای هیدرودینامیکی^۴ و کنترل کننده^۵ باز شده و اطلاعات آنها کامل می گردند. بعد از کامل کردن این زیربرنامه ها در پنجره دیگری، دریافت شرایط اولیه زیردریایی و حل معادلات به روش عددی رانگ کوتای مرتبه چهار انجام می شود. بعد از حل معادلات، نتایج شبیه سازی که در ادامه گزیده ای از آنها می آید، در خروجی چاپ می شود.

۴- نتایج تحلیل حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی

برای بررسی آنالیز حساسیت ضرایب میرایی هیدرودینامیک زیردریایی، سه مانور استاندارد دایره، زیگ زاگ افقی و عمودی در نظر گرفته شده است. در مانور حرکت دایره ای، سه پارامتر به عنوان معیار برای سنجش در نظر گرفته شده که عبارتند از قطر تاکتیکی (D)، زمان رسیدن به ۱۸۰ درجه و زمان شروع واکنش به تغییر زاویه رادر. برای مانور زیگ زاگ افقی و عمودی نیز پارامترهای پریرود حرکت، زمان رسیدن، بیشینه فراجش در صفحه و فراجش زاویه در نظر گرفته شده است.

۴-۱- مانور حرکت دایره ای

برای اجرای مانور دایره در زیربرنامه کنترل کننده برنامه رایانه ای فرمان مناسب به سطوح کنترل رادر داده می شود و با استفاده از داده های ورودی و خروجی برنامه حساسیت سنجی انجام می شود. حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی در مانور دایره با استفاده از روش ریاضی بیان شده در بخش ۳ مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج گرفته شده از این آنالیز، بعضی از پارامترها در مانور دایره تاثیر داشته و در نهایت حساسیت داشته اند که عبارت از ضریب هیدرودینامیکی در جهت طولی C_X ، ضریب هیدرودینامیکی در جهت جانبی C_Y ، ممان هیدرودینامیکی یاو M_Z ، ممان هیدرودینامیکی چرخشی یاو M_Z^{oz} ، ضریب نیروی چرخشی در جهت جانبی C_Y^{oz} ، نیروی هیدرودینامیکی در جهت جانبی ناشی از حرکت رادر C_Y^{or} و ممان هیدرودینامیکی ناشی از حرکت رادر M_Z^{or} می باشند. بقیه ضرایب هیدرودینامیکی، دارای حساسیت صفر نسبت به این مانور

¹Geometry Information
²Rotation Matrixce
³Added Mass Matrixce
⁴Hydrodynamic Forces
⁵Controller

دایره‌ای و زمان رسیدن به $\phi = 180$ برای حرکت زیر دریایی دارد. همچنین ضرایب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ بیشترین تاثیر را روی مقادیر زمان نزدیک شدن به مسیر دایره‌ای دارا می‌باشند.

جدول ۲- مقادیر بیشینه حساسیت برای پارامترهای هیدرودینامیکی

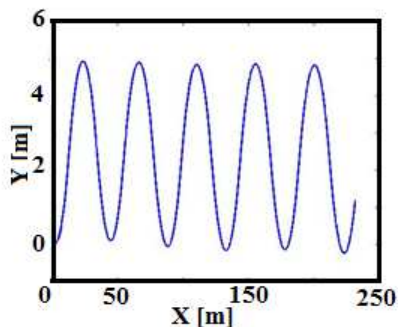
$S_{[T_{ap}]}^M$	$S_{[T_{180}]}^M$	$S_{[D]}^M$	
۲۲/۹۴۲	۰/۰۰۲	۰/۸۲۸	C_x
۰/۰۸۱	۰/۱۰۰	۰/۱۲۲	C_y
۴/۸۲۶	۰/۲۳۲	۰/۲۷۱	$C_y^{\omega z}$
۰/۹۷۹	۰/۳۴۱	۰/۳۹۶	$C_y^{\delta r}$
۰/۳۸۱	۰/۰۸۸	۰/۱۰۰	m_z
۰/۹۹۶	۰/۶۹۵	۰/۷۷۸	$m_z^{\omega z}$
۴/۸۶۷	۰/۸۶۲	۰/۹۵۴	$m_z^{\delta r}$

در جدول (۲) میزان بیشینه اندازه حساسیت مشخصه‌های حرکت دایره‌ای به پارامترهای هیدرودینامیکی ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد قطر مسیر حرکت بیشتر به پارامتر هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ حساسیت دارد و زمان رسیدن به زاویه $\phi = 180$ و زمان نزدیک شدن به مسیر دایره‌ای به ترتیب به پارامترهای C_x و $m_z^{\delta r}$ حساسیت بیشتری دارند.

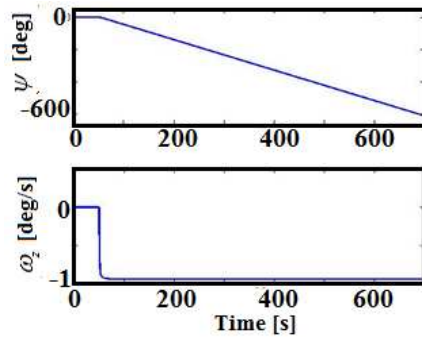
۴-۲- مانور زیگ زاگ افقی

از آنجا که مانور حرکت زیگ زاگ جهت بررسی حساسیت پاسخ گذرا مناسب است، در این تحقیق دو مانور زیگ زاگی در صفحات افقی و عمودی بررسی شده‌اند. در این مانور، سطح کنترلی رادر به اندازه‌ی ۳۰ درجه چرخش داده شده و به محض اینکه مقدار یاو به ۲۰ درجه رسید زاویه رادر به مقدار ۳۰ درجه تغییر زاویه داده‌است. نتایج شبیه سازی این حرکت در شکل های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است.

به منظور بررسی میزان حساسیت مشخصه های مانور زیگ‌زاگی، پارامترهای هیدرودینامیکی از ۵۰ تا ۲۰۰ درصد مقادیر نامی آنها تغییر داده شده‌اند و مقدار حساسیت S محاسبه گردیده‌است. مشخصه‌های مانور زیگ زاگ افقی با علامت‌های T_p ، T_r ، ψ_o و Z_o در شکل‌ها نشان داده شده‌اند که به ترتیب نشانگر پیروید نوسانات، زمان رسیدن به اولین مرز زاویه یاو، مقدار جهش زاویه یاو و مقدار جهش مسیر هستند.

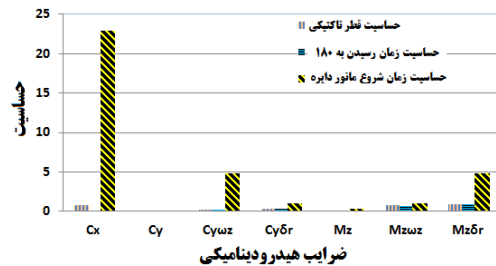


شکل ۹- حرکت زیر دریایی در صفحه افق در طول حرکت زیگ زاگ



شکل ۷- حرکت زیر دریایی در صفحه افق در طول حرکت زیگ زاگ

حساسیت مانور دایره



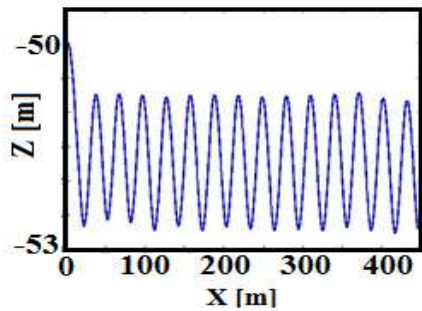
شکل ۸- مقایسه حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی در مانور دایره

حساسیت این ضریب در قطر تاکتیکی و زمان رسیدن با افزایش مقدار آن کاهش می‌یابد، ولی زمان شروع واکنش با افزایش این ضریب رفتاری معکوس نشان می‌دهد. ممان هیدرودینامیکی در جهت یاو زیردریایی می‌باشد. حساسیت قطر تاکتیکی، زمان رسیدن به ۱۸۰ درجه و زمان واکنش این ضریب در شکل کاملاً مشخص شده است. مقادیر حساسیت‌ها تقریباً منفی بوده و نشان دهنده نتیجه معکوس این ضریب در پارامترهای فوق است. ضرایب دیگر هیدرودینامیکی که در پایداری زیردریایی نیز تاثیر به سزایی دارند ضرایب چرخشی زیردریایی هستند. در مانور دایره، ضریب چرخشی هیدرودینامیکی $m_z^{\omega z}$ در اثر نوسانات چرخش با سرعت زاویه‌ای ω_z مقاومت هیدرودینامیکی m_z را نشان می‌دهد. این ضریب بیشترین تاثیر را در قطر تاکتیکی زیردریایی دارد.

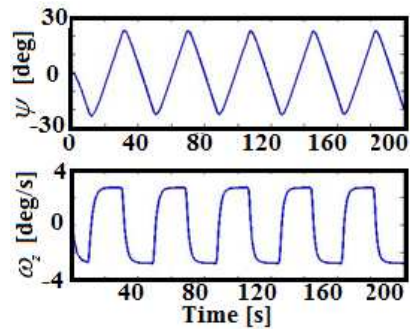
جدول ۱- مقادیر بیشینه مشخصه‌های حرکت دایره‌ای

$T_{ap} (s)$	$T_{180} (s)$	$D (m)$	
۱۱۷۱/۱	۲۱۵/۸	۲۷۴/۸	C_x
۳۶۹/۹	۲۲۴/۶	۲۰۴/۱	C_y
۱۲۱۳/۳	۲۵۶/۷	۲۴۹/۱	$C_y^{\omega z}$
۵۲۹/۶	۲۴۹/۱	۲۲۹/۴	$C_y^{\delta r}$
۳۶۴/۹	۹۲۲/۴	۲۰۴/۱	m_z
۴۹۴/۱	۳۵۵/۷	۳۳۵/۹	$m_z^{\omega z}$
۱۲۲۰/۶	۳۰۸/۳	۲۸۷/۰	$m_z^{\delta r}$

ضرایب هیدرودینامیکی بدنه و سطوح کنترلی بر روی تمامی مشخصه‌های مانور اثر گذار هستند. در جدول (۱) مقادیر بیشینه مشخصه‌های حرکت در دامنه تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی مربوطه نشان داده شده‌اند. همانطور که از جدول (۱) مشهود است ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\omega z}$ بیشترین اثر را روی مقدار قطر حرکت



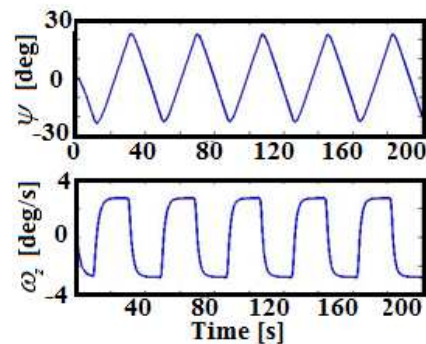
شکل ۱۳- موقعیت زیر دریایی در صفحه عمودی برای حرکت زیگ زاگی عمودی



شکل ۱۰- مقادیر سرعت خطی در راستاهای X و Z در طول مانور زیگ زاگی افقی

جدول ۳- مقادیر بیشینه اندازه حساسیت در مانور زیگ زاگ افقی

$S_{[Z,1]}^M$	$S_{[\varphi,1]}^M$	$S_{[T_r,1]}^M$	$S_{[T_p,1]}^M$	
۰/۰۸۹	۰/۶۶۴	۰/۰۳۱	۰/۱۷۸	C_x
۰/۰۷۷	۰/۴۸۰	۰/۰۱۶	۰/۰۶۵	C_z
۰/۱۲۲	۱/۱۲۶	۰/۰۱۷	۰/۰۸۲	C_y
۰/۴۰۳	۱/۳۴۲	۰/۰۱۶	۰/۰۷۲	$C_z^{\omega_z}$
۰/۳۴۲	۰/۷۵۹	۰/۰۵۵	۰/۰۸۷	$C_y^{\omega_z}$
۰/۴۳۴	۰/۷۹۱	۰/۲۶۲	۰/۱۰۵	$C_y^{\delta_r}$
۱/۱۲۳	۰/۷۲۸	۱/۰۴۵	۱/۱۲۷	$m_z^{\delta_r}$
۰/۰۸۹	۰/۹۳۵	۰/۲۴۵	۰/۱۳۳	m_x
۰/۰۳۴	۰/۸۰۹	۰/۱۳۱	۰/۰۹۳	m_z
۰/۰۶۵	۱/۰۷۲	۰/۰۱۶	۰/۰۹۷	m_y
۰/۴۷۸	۳/۴۰۶	۰/۵۵۸	۰/۶۷۸	$m_z^{\omega_z}$
۰/۳۵۰	۰/۷۵۱	۰/۰۱۶	۰/۱۱۹	$m_y^{\omega_z}$



شکل ۱۱- مقادیر ψ و ω_z در طول مانور زیگ زاگی افقی

اثرات ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به جرم اضافه، بدنه زیر دریایی و سطوح کنترلی بر روی مشخصه‌های مانور زیگ زاگ افقی بررسی شده است. در شکل (۱۲) حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی و ضرایب هیدرودینامیکی سطوح کنترلی در چهار پارامتر مانور زیگ زاگ مورد مقایسه قرار گرفته است. حساسیت‌ها به صورت نمودار میله ای با رنگ های مختلف مقایسه شده است.

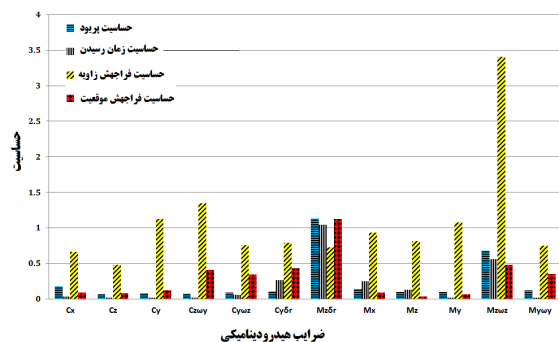
ضریب هیدرو دینامیکی $m_z^{\omega_z}$ بیشترین اثر را روی زمان پروید نوسانات و زمان رسیدن به اولین مرز یاو ($\varphi = 15^\circ$) دارد. همچنین به ترتیب ضرایب هیدرو دینامیکی $m_z^{\omega_z}$ و $m_y^{\delta_r}$ بیشترین اثر را روی مقادیر جهش زاویه و موقعیت زیر دریایی برای حرکت زیگ زاگ در صفحه افق دارند.

در جدول ۳ مقادیر ماکزیمم اندازه حساسیت هر کدام از مشخصه‌های مانور زیگ زاگی افقی به تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی بدنه زیر دریایی و سطوح کنترلی نشان داده شده است. همانطور که از جدول ۳ مشهود است، پروید نوسانات و زمان رسیدن به اولین مرز یاو (ψ) بیشترین حساسیت را به ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta_r}$ دارد. همچنین مقادیر جهش زاویه یاو و موقعیت زیر دریایی در حرکت زیگ زاگ افقی به ترتیب بیشتر به ضرایب هیدرودینامیکی $m_z^{\omega_z}$ و $m_y^{\delta_r}$ حساسیت دارند.

۳-۴- مانور زیگ زاگ عمودی

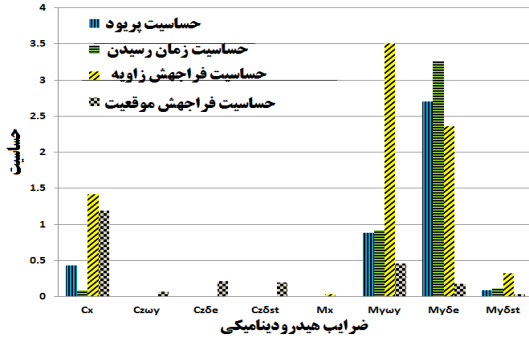
مانور زیگ زاگ در صفحه عمودی، توسط سطوح کنترلی الویتور و استیلایزر ایجاد می‌شوند. برای انجام این مانور، ابتدا سطوح کنترلی بالابر و پایدارساز به اندازه 30° چرخش می‌کنند. به محض اینکه

حساسیت مانور زیگ زاگ افقی



شکل ۱۲- مقایسه حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی در مانور زیگ زاگ افقی

حساسیت مانور زیگ زاگ عمودی



شکل ۱۶- مقایسه حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی در مانور زیگ زاگ عمودی

همچنین زمان رسیدن به اولین مرز پیچ حساسیت بیشتری به ضریب هیدرودینامیکی $m_y^{\delta e}$ در مقابل سایر ضرایب هیدرودینامیکی دارد. همچنین مقادیر جهش زاویه پیچ و ارتفاع زیر دریایی به ترتیب بیشتر به ضرایب هیدرودینامیکی m_x و C_x در مانور زیگ زاگ عمودی حساسیت دارند.

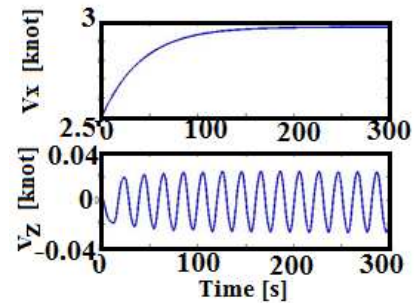
جدول ۴- مقادیر بیشینه حساسیت در مانور زیگ زاگ عمودی

$S_{[Y_o]}^M$	$S_{[\psi_o]}^M$	$S_{[T_r]}^M$	$S_{[T_p]}^M$	
۱/۱۹۲	۱/۴۲۰	۰/۰۹۲	۰/۴۳۵	C_x
۰/۰۷۰	۰/۰۰۱	.	.	$C_z^{\omega y}$
۰/۲۱۷	۰/۰۱۰	.	.	$C_z^{\delta e}$
۰/۱۹۸	۰/۰۱۱	.	.	$C_z^{\delta st}$
۰/۰۰۴	۰/۰۳۴	۰/۰۰۳	.	m_x
۰/۴۶۲	۳/۵۰۸	۰/۹۲۴	۰/۱۸۸۳	$m_y^{\omega y}$
۰/۱۸۰	۲/۳۵۸	۴/۲۶۴	۲/۷۰۶	$m_y^{\delta e}$
۰/۰۳۳	۰/۳۲۱	۰/۱۱۲	۰/۰۹۲	$m_y^{\delta st}$

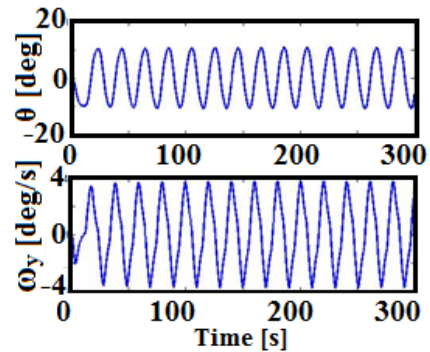
۵- تحلیل نتایج و بحث

در این تحقیق مانورهای حرکت دایره‌ای و زیگ زاگی توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و حساسیت هر کدام از مشخصه‌های حرکتی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. پاسخ در مسیر دایره‌ای با تغییرات مقادیر ضرایب لیفت بدنه و ضرایب لیفت سطوح کنترل بسیار غیر خطی است و پاسخ‌ها متفاوت است. این پاسخ رابطه معکوس با مربع ضریب لیفت بدنه و بطور مستقیم با ریشه دوم ضرایب لیفت سطوح کنترل ارتباط دارد. تفسیری که از این نتیجه می‌توان بیان داشت پیچیدگی رفتار زیر دریایی در سرعت‌های مختلف در حرکت عمقی بدون استفاده از سطوح کنترل تغییر عمق می‌باشد. حرکت در عمق زیردریایی در اثر نیروی برآ حاصل می‌شود. حال با توجه به معادلات شش درجه آزادی کاملاً وابسته زیردریایی و حساسیت سنجی نیروی برآ در مانور دایره، می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار زیردریایی در حرکت دایره ای کاملاً پیچیده می‌باشد. این نتیجه با تجربیات قبلی که زیردریایی در مانور دایره سرعت‌های بالا به سمت بالا حرکت می‌کند ولی در سرعت‌های پایین حرکت زیر

مقدار چرخش زیر دریایی (پیچ) برابر $\theta = 10^\circ$ شد، سطوح کنترلی الویتور و استبلایزر در مقادیر $\delta_{st} = \delta_e = -30^\circ$ قرار می‌گیرند. در شکل‌های (۱۳) الی (۱۵)، رفتار زیر دریایی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، حرکت در صفحه Z-X به صورت زیگ زاگی است. علاوه بر آن زوایای پیچ، سرعت‌های زاویه‌ای و سرعت خطی سرچ و هیو نیز برای حرکت زیگ زاگی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴- مقادیر سرعت در راستاهای X و Y برای حرکت زیگ زاگی عمودی



شکل ۱۵- مقادیر ψ و ω_z در طول حرکت زیگ زاگی عمودی

در این مانور، مشخصه‌های حرکت به صورت T_p ، T_r ، ψ_o و Y_o در نظر گرفته می‌شوند که دو تای اولی به ترتیب پیچود نوسانات و زمان رسیدن به اولین مرز پیچ (θ) هستند و دوتای بعدی به ترتیب میزان جهش زاویه و ارتفاع را نشان می‌دهند. همانند مانورهای قبلی، شبیه سازی‌ها برای نشان دادن اثر هر کدام از پارامترهای هیدرودینامیکی بر روی مشخصه‌های حرکت زیگ زاگ عمودی انجام شده است. برای همین منظور پارامترهای هیدرودینامیکی از ۵۰ تا ۲۰۰ درصد مقادیر نامی خود تغییر داده شده و مشخصه‌های حرکت اندازه گیری گردیده‌اند. تاثیر ضرایب هیدرودینامیکی بدنه زیر دریایی بر مقدار حساسیت در شکل (۱۶) قابل مشاهده می‌باشد.

ضریب هیدرودینامیکی $m_y^{\delta st}$ بیشترین اثر را روی پیچود نوسانات، زمان رسیدن به اولین مرز پیچ و میزان جهش زاویه برای حرکت زیگ زاگی در صفحه عمودی دارد. علاوه بر آن، مشخصه‌ی موقعیتی جهش ارتفاع، بیشترین تاثیر را از ضریب هیدرودینامیکی m_x می‌گیرد.

در جدول ۴ بیشینه حساسیت هر کدام از مشخصه‌های پاسخ برای این مانور ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیچود نوسانات بیشترین حساسیت را به ضریب هیدرودینامیکی $m_y^{\delta e}$ دارد.

دارند. بنابراین در این حرکت نیز نیروهای لیفت بیشترین تاثیر را روی مشخصه‌های حرکت دارند. افزایش نیروی لیفت بدنه باعث تند و تیز شدن زیردریایی می‌شود، اما برگشت به مسیر را سخت‌تر می‌کند. افزایش پسا بدنه باعث گُند شدن شناور می‌شود و شناور به کاهش فضای حرکتی و افزایش زمان مورد نیاز و افزایش انرژی متمایل می‌شود. لیفت و پسا بدنه تابعی از اندازه و شکل بدنه زیردریایی است. افزایش پسا در صفحات کنترلی اثری مشابه افزایش پسا بدنه دارد، که باعث می‌شود زیردریایی آهسته‌تر حرکت کند و انرژی بیشتری برای کامل کردن مانور نیاز داشته باشد. افزایش نیروی لیفت سطوح کنترلی عقب باعث افزایش پایداری زیردریایی می‌شود و کاهش تمایل به مانور دایره‌ای و افزایش شعاع مانور را به همراه خواهد داشت. اما افزایش قابلیت زیردریایی برای شروع و بازیابی مسیر بدین معنی است که نیروی لیفت صفحات کنترلی افزایش یابد. در طراحی این صفحات باید بگونه‌ای عمل گردد تا حالت بهینه بین برآ و پسا در سطوح کنترلی به افزایش مانورپذیری زیردریایی و کاهش مصرف انرژی منجر گردد.

۶- نتیجه گیری کلی

در این مطالعه تحلیل حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی زیردریایی در رفتار آن، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به رفتار پیچیده زیردریایی در مانورها و سرعت‌های مختلف از نتایج تحلیل حساسیت در سه مانور حرکت دایره‌ای، حرکت زیگ زاگ افقی و عمودی نتایج زیر حاصل گردیده است:

- قطر مسیر حرکت بیشتر به پارامتر هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ حساسیت دارد و زمان رسیدن به زاویه $\psi = 180^\circ$ و زمان نزدیک شدن به مسیر دایره‌ای به ترتیب به پارامترهای $m_z^{\delta r}$ و C_x حساسیت بیشتری دارند
- ضریب پسا بدنه و ضریب پسا سطوح کنترلی تاثیر چندانی در مقادیر مشخصه‌های حرکت ندارد بلکه ضرایب لیفت بدنه و سطوح کنترلی بیشترین تاثیر را بر روی پاسخ خواهند گذاشت.
- افزایش نیروی لیفت بدنه باعث تند و تیز شدن زیردریایی می‌شود، اما برگشت به مسیر را سخت‌تر می‌کند. افزایش پسا بدنه باعث گُند شدن شناور می‌شود و شناور به کاهش فضای حرکتی و افزایش زمان مورد نیاز و افزایش انرژی متمایل می‌شود.

۷- نمادها

C_{DH}	ضریب پسای هیدرودینامیکی بدنه
C_{LH}	ضریب برآی هیدرودینامیکی بدنه
C_p	ضریب هیدرودینامیکی پیچش خالص حول محور طولی
C_q	ضریب هیدرودینامیکی پیچش خالص حول محور جانبی
C_r	ضریب هیدرودینامیکی پیچش خالص حول محور عمودی
$C_y^{\omega_z}$	ضریب نیروی به وجود آمده در جهت محور Y در اثر دوران زیردریایی حول محور Z
$C_z^{\omega_y}$	ضریب نیروی به وجود آمده در جهت محور Z در اثر

دریایی به سمت پایین می‌باشد یکسان بوده و این حساسیت متفاوت در نتایج تحقیق، از چنین رفتار زیردریایی می‌باشد. پاسخ در مسیر دایره‌ای با تغییرات ضرایب پسا (پسا بدنه یا پسا سطوح کنترلی) ثابت می‌ماند یا بسیار خطی است. تاثیر پسا زمان پاسخ را بسیار زیاد می‌کند. تغییرات در ضریب پسا بدنه بخاطر اینکه بدنه بیشترین تاثیر را در شناوری زیردریایی دارد. تاثیر بیشتری برای زمان انجام چرخش دایره‌ای دارد و تاثیر تغییر پسا سطوح کنترلی در مقایسه با آن نسبتاً ناچیز است.

نتایج شبیه سازی نشان داده‌اند که در مانورهای دایره‌ای، ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\omega z}$ بیشترین اثر را روی مقدار قطر حرکت دایره‌ای و زمان رسیدن به $\psi = 180^\circ$ برای حرکت زیردریایی دارد. همچنین ضرایب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ بیشترین تاثیر را روی مقادیر زمان نزدیک شدن به مسیر دایره‌ای دارا می‌باشند. علاوه بر آن می‌توان نتیجه گرفت که قطر مسیر حرکت بیشتر به پارامتر هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ حساسیت دارد و زمان رسیدن به زاویه $\psi = 180^\circ$ و زمان نزدیک شدن به مسیر دایره‌ای به ترتیب به پارامترهای C_x و $m_z^{\delta r}$ حساسیت بیشتری دارند.

در مانور زیگ زاگی افقی نتایج شبیه سازی نشان دادند که ضریب هیدرو دینامیکی $m_z^{\omega z}$ بیشترین اثر را روی زمان پریود نوسانات و زمان رسیدن به اولین مرز یاو ($\psi = 15^\circ$) دارد. همچنین به ترتیب ضرایب هیدرو دینامیکی $m_z^{\delta r}$ و $m_z^{\omega z}$ بیشترین اثر را روی مقادیر جهش زاویه و موقعیت زیر دریایی برای حرکت زیگ زاگ در صفحه افقی دارند. علاوه بر آن می‌توان نتیجه گرفت که پریود نوسانات و زمان رسیدن به اولین مرز یاو (ψ) بیشترین حساسیت را به ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ دارد. همچنین مقادیر جهش زاویه یاو و موقعیت زیر دریایی در حرکت زیگ زاگ افقی به ترتیب بیشتر به ضرایب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta r}$ و $m_z^{\omega z}$ حساسیت دارند. بنابراین ضریب پسا بدنه و ضریب پسا سطوح کنترلی تاثیر چندانی در مقادیر مشخصه‌های حرکت ندارد بلکه ضرایب لیفت بدنه و سطوح کنترلی بیشترین تاثیر را بر روی پاسخ خواهند گذاشت. ضرایب برآ در این مانور تاثیر زیادی نداشته و یا به عبارت دیگر بدون تاثیر است. این نتیجه با نتایج تجربی قبلی سنخیت داشته به صورتی که زیردریایی در حرکت زیگ زاگ افقی هیچگونه تغییر عمقی نخواهد داشت.

نتایج شبیه سازی مانور زیگ زاگ عمودی نشان داده‌اند که ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta st}$ بیشترین اثر را روی پریود نوسانات، زمان رسیدن به اولین مرز پیچ و میزان جهش زاویه برای حرکت زیگ زاگی در صفحه عمودی دارد. علاوه بر آن مشخصه‌ی موقعیتی جهش ارتفاع، بیشترین تاثیر را از ضریب هیدرودینامیکی m_x می‌گیرد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که پریود نوسانات بیشترین حساسیت را به ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta e}$ دارد. همچنین زمان رسیدن به اولین مرز پیچ حساسیت بیشتری به ضریب هیدرودینامیکی $m_z^{\delta e}$ در مقابل سایر ضرایب هیدرودینامیکی دارد. همچنین مقادیر جهش زاویه پیچ و ارتفاع زیر دریایی به ترتیب بیشتر به ضرایب هیدرودینامیکی C_x و m_x در مانور زیگ زاگ عمودی حساسیت

β	زاویه دریافت (deg)	دوران زیردریایی حول محور Y	
δ_{RS}	زاویه سطوح کنترل (deg)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت X	C_x
α_{RS}	زاویه حمله سطوح کنترل (deg)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت Z	C_z
β_{RS}	برآیند زاویه حمله و زاویه سطوح کنترل (deg)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت Y	C_y
ω	بردار سرعت زاویه ای (rad/s)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت Z در اثر	$C_z^{\omega Y}$
δc	زاویه ورودی سطوح کنترل (deg)	سرعت زاویه ای در جهت Y	$C_y^{\omega z}$
P_0	دامنه موقعیتی پاسخ در مانور زیگ زاگ (m)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت Y در اثر	$C_y^{\delta r}$
γ_0	دامنه زاویه ای فرمان یا پاسخ در مانور زیگ زاگ (deg)	سرعت زاویه ای در جهت Z	$C_z^{\delta r}$
τ	پریود حرکت (s)	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در جهت Y در اثر	$C_y^{\delta r}$
$reach$	زمان رسیدن (s)	تغییر زاویه رادر	

$C_z^{\delta e}$	ضریب نیروی میرایی هیدرودینامیکی در اثر تغییر زاویه بالابر در جهت Z
$C_z^{\delta st}$	ضریب نیروی ممان هیدرودینامیکی در اثر تغییر زاویه پایدارساز در جهت Z
$m_z^{\delta r}$	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی حول محور Z در اثر تغییر زاویه رادر
m_x	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی در جهت X
m_z	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی در جهت Z
m_y	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی در جهت Y
$m_z^{\omega z}$	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی حول محور Z در اثر سرعت زاویه در جهت Z
$m_y^{\omega y}$	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی حول محور Y در اثر سرعت زاویه در جهت Y
$m_y^{\delta e}$	ضریب ممان میرایی هیدرودینامیکی در اثر تغییر زاویه الویتور حول محور Y
$m_y^{\delta st}$	ضریب ممان هیدرودینامیکی در اثر تغییر زاویه استیبلایزر در جهت Y
P	سرعت زاویه ای رول (rad/s)
q	سرعت زاویه ای پیچ (rad/s)
r	سرعت زاویه ای یاو (rad/s)
rcp	بردار فاصله مرکز فشار تا مرکز مختصات (m)
r_G	بردار فاصله تا مرکز جرم (m)
S_H	مساحت مقطع زیردریایی (m^2)
u	سرعت سرچ (m/s)
v	سرعت اسوی (m/s)
V	بردار برآیند سرعت زیر دریایی (m/s)
V_H	سرعت زیردریایی در مرکز فشار (m/s)
U_1	بردار سرعت خطی زیردریایی (m/s)
U_2	بردار سرعت زاویه ای زیردریایی (m/s)
w	سرعت هیو (m/s)
ϕ	زاویه اویلر حول محور X (deg)
θ	زاویه اویلر حول محور Y (deg)
ψ	زاویه اویلر حول محور Z (m)
η_1	بردار موقعیت زیردریایی (m)
η_2	بردار وضعیت زیردریایی (deg)
α	زاویه حمله (deg)

۸- مراجع

- [1] Hwang W.Y., Application of system identification to ship maneuvering, Ph.D. Thesis, MIT, 1980.
- [2] Yeo D. J. and Rhee, K. P., Sensitivity analysis of submersibles maneuverability and its application to the design of actuator inputs, *Ocean Engineering*, 2006, pp. 2270-2286.
- [3] Sen, D., A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies, *Journal of Ship Research*, 2000, pp. 186-196.
- [4] Curran R. and et al, Uncertainty and sensitivity analysis in aircraft operating costs in structural design optimization, *Journal of Aircraft*, Vol. 46, 2009, pp. 2145-2155.
- [5] Neto M. A. and et al, Sensitivity analysis of flexible multi body systems using composite materials components, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 77, 2009, pp. 386-413.
- [6] شکراللهی علی، صدیقی محمد، خاندانی مهرداد، مقایسه دو روش نرخ کرنش ثابت و متغیر در استخراج ثوابت مادی رفتار فلزات با استفاده از تست میله ها پکینسون، مجله علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۲، ۱۳۹۱، ص ۱۰-۱.
- [7] حیدری پیام، قدوسیان علی، تحلیل و بهینه سازی آیرودینامیکی ایرفویل های NACA چهار رقمی در جریانهای زیر صوتی، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۸۴.
- [8] موسوی فیرده سید رضا، جعفر قلی علی، آنالیز حساسیت یک شیر کنترلی عملگر غیرمستقیم، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۸۴.
- [9] بیری رضا، فراهانی امیر، نقد آبادی رضا، آنالیز حساسیت پاسخ فازی نسبت به پارامترهای ورودی در تحلیل اجزا محدود فازی ورق، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۸۴.
- [10] آزادی شهرام، جعفری علی اصغر، انصاری علیرضا، آنالیز حساسیت پارامترهای طراحی فنرهای تخت یک خودروی سنگین با استفاده از روش طراحی آزمایشها، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تهران، ۱۳۸۴.
- [11] Hwang W.Y., Application of system identification to ship maneuvering, Ph.D. thesis, MIT, 1980.
- [12] Rhee K.P, Kim K., A new sea trial method for estimating hydrodynamic derivatives, *Ship & Ocean Technology*, 1999.