



## آنالیز حساسیت مانور پذیری یک وسیله زیرسطحی خودکنترل نسبت به تغییرات ضرایب جرم مجازی

ناراله عباسی<sup>۱\*</sup>، مرحمت زینعلی<sup>۲</sup> و مهرداد ولدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

<sup>۲</sup> دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۵

### چکیده

فهم عملکرد هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی خودکنترل (AUV)، جهت بررسی قابلیت انجام مأموریت تعیین شده برای آن وسیله ضروری است. حل معادلات حرکت یک وسیله زیرسطحی و بررسی مانورپذیری آن، ابزاری مناسب برای فهم عملکرد AUV است. جهت نیل به این هدف، می‌توان میزان حساسیت مانور یک وسیله زیرسطحی را نسبت به تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی بررسی کرد. در مقاله حاضر، حساسیت مانورپذیری یک وسیله زیرسطحی خودکنترل نسبت به تغییرات ضرایب جرم مجازی بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا ضرایب هیدرودینامیکی وسیله زیرسطحی موردنظر به کمک روش تحلیلی-نیمه تجربی محاسبه شده است. در گام بعدی معادلات دینامیکی، ۶ درجه آزادی برای این وسیله زیرسطحی حل شده و رفتار آن در مانور دور زدن شبیه سازی شده است. در ادامه با تغییر ضرایب جرم مجازی مختلف تغییر رفتار مانور این وسیله، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که شعاع دوران حالت پایای مانور به المان‌های جرم افزوده غیرحساس است؛ از طرفی طول قسمت ورودی که قسمت گذرای مانور است، بیشترین حساسیت را به ترم‌های جرم افزوده دارد؛ در حالیکه قطر تاکتیکی که ترکیبی از قسمت گذرا و پایای مانور است، حساسیت متوسطی به همه ترم‌ها دارد.

**کلمات کلیدی:** وسیله زیرسطحی خودکنترل؛ ضرایب هیدرودینامیکی؛ مانور دور زدن؛ آنالیز حساسیت.

## Sensitivity Analysis of Maneuverability of an AUV to Added Mass Coefficients Variations

S. Abbasi<sup>1,\*</sup>, M. Zeinali<sup>2</sup>, M. Valadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Prof., Mech. Eng., Arak Univ. of Tech., Arak, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D, Mech. Eng., Iran Univ. of sci. and Tech., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Iran Univ. of sci. and Tech., Tehran, Iran.

### Abstract

Understanding of the hydrodynamic performance of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) is essential to investigate of its capability to perform a mission. Dynamic simulation of the equations of motion and analyzing the vehicle maneuverability is a useful tool for performing these evaluations. To achieve this aim the sensitivity of maneuvering of an underwater vehicle to changes of hydrodynamic coefficients can be investigated. In the current study the sensitivity of maneuverability of an AUV to changes of added mass coefficients is considered. In the first step the hydrodynamic coefficients of the AUV are calculated using analytical-semi empirical method. Next the six degree freedom of dynamic equation for this vehicle is solved and the behavior of turning maneuverer is simulated. In the following by changing the different added mass coefficients the behavior change of the underwater vehicle is evaluated. The results shows that the steady turning radius of the maneuver is insensitive to added mass elements, where the advance length which is the character of the transient phase has the most sensitivity to added mass elements. While tactical diameter which is the combination of steady and transient phases has average sensitivity to added mass parameters.

**Keywords:** Autonomous Underwater Vehicles; Hydrodynamic Coefficients; Turning Maneuver; Sensitivity Analysis

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۶۳۳۴۰۰۶۶۳

آدرس پست الکترونیک: [s\\_abbasi@arakut.ac.ir](mailto:s_abbasi@arakut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد سریع جمعیت جهان و کمبود منابع غذایی، معدنی و سوخت‌های فسیلی، اهمیت دسترسی به منابع دریایی دوچندان گشته است. در سال‌های اخیر نقش وسیله‌های زیرسطحی خودکنترل در شناسایی منابع معدنی و زیستی در دریاها و حفظ و نگهداری آن‌ها، روز به روز در حال افزایش بوده است [۱-۳]. طراحی شکل بدنه وسیله‌های زیرسطحی خودکنترل، می‌بایست به نحوی انجام شود که دارای عملکرد هیدرودینامیکی مناسبی باشند؛ لذا فهم عملکرد هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی بدون سرشنین جهت بررسی قابلیت انجام مأموریت تعیین شده برای آن وسیله ضروری است. به منظور بررسی عملکرد یک وسیله زیرسطحی، معادلات حرکت آن وسیله می‌بایست حل شوند؛ لذا برای آن که یک وسیله زیرسطحی خودکنترل از مانورپذیری و پایداری مناسبی برخوردار باشد، هنگام طراحی بدنه آن می‌بایست پارامترهای هیدرودینامیکی، مورد ارزیابی قرار گیرند و ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شوند؛ زیرا که نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی اعمال شده بر وسیله- زیرسطحی توسط این ضرایب مشخص می‌شوند و در نهایت با شبیه‌سازی معادلات حرکت، مسیر حرکت وسیله مشخص خواهد شد.

به‌طورکلی روش‌های محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ روش‌هایی که بر مبنای تست و نتایج تجربی قرار دارند و دیگری روش‌هایی که بر مبنای محاسبه و تخمین عددی ضرایب قرار دارند. روش‌های بر مبنای تست خود شامل، روش‌های مستقیم مانند محاسبه ضرایب مدل زیرسطحی در تونل آب مدار بسته<sup>۱</sup> و یا حوضچه کشش<sup>۲</sup> و یا تست خود وسیله است [۴ و ۵]. در این میان محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به کمک تکنیک شناسایی سیستم<sup>۳</sup> روشی غیرمستقیم، ولی بسیار موثر محسوب می‌شود و می‌تواند برای مدل مقیاس - شده و یا نمونه کامل وسیله به کاربرده شود [۶ و ۷].

روش‌های تجربی یکی از روش‌های مؤثر برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی اجسام زیرسطحی محسوب می‌شوند [۸ و ۹]. ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی، به وسیله تجهیزات آزمایشگاهی مختلفی قابل اندازه‌گیری هستند. این تجهیزات شامل، مکانیزم حرکت در صفحه افقی<sup>۴</sup> یا حرکت در صفحه عمودی<sup>۵</sup> [۸]، تست بازوی چرخشی<sup>۶</sup> و تست حرکت دایره‌ای یا مخروطی وار<sup>۷</sup> [۱۰] می‌باشند. این تجهیزات را می‌توان جهت به‌کارگیری در حوضچه کشش و یا تونل آب مدار بسته طراحی کرد [۱۱]. در میان این تست‌ها، تست حرکت در یک صفحه، بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است؛ زیرا به کمک این تست‌ها، هم ضرایب جرم مجازی و هم ضرایب استهلاکی را می‌توان به‌دست آورد [۱۲]. مشکل اساسی در روش‌های تجربی، نیاز به مدلی از وسیله و یا وسیله ساخته‌شده به همراه تجهیزات آزمایشگاهی است. در بسیاری از مواقع ممکن است، این تجهیزات در دسترس نباشد؛ زیرا که تجهیزات آزمایشگاهی گران هستند. گاهی اوقات هم می‌بایست، ضرایب هیدرودینامیکی وسیله را قبل از ساخت محاسبه کرد.

هنگامی که وسیله در فاز طراحی قرار دارد و یا هزینه‌ها مانع از ساخت وسیله می‌شود، روش‌هایی که بر مبنای محاسبه و تخمین عددی ضرایب قرار دارند، یک روش جایگزین بسیار مناسب می‌باشند [۱۳]. در دو دهه گذشته قابلیت‌های کدهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و قدرت محاسباتی کامپیوترها، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و اکنون به کارگیری CFD برای شبیه‌سازی جریان اطراف زیرسطحی و تعیین ضرایب هیدرودینامیکی<sup>۸</sup> بسیار آسان گشته است [۱۴ و ۱۵]. با این وجود هنگامی اینکه این روش‌ها برای هندسه‌های پیچیده به کار گرفته می‌شوند، هزینه محاسباتی را به شدت افزایش می‌دهند؛ لذا این روش‌ها معمولاً در فازهای نهایی طراحی به کار گرفته می‌شوند [۱۶ و ۱۷].

<sup>4</sup> Horizontal Planer Motion Mechanism (HPMM)

<sup>5</sup> Vertical Planer Motion Mechanism (VPMM)

<sup>6</sup> Rotating Arm Test

<sup>7</sup> Conical Motion Test (CMT)

<sup>1</sup> Circulating Water Tunnel

<sup>2</sup> Towing Tank

<sup>3</sup> System Identification Technique

در کار حاضر میزان حساسیت مانورپذیری یک وسیله زیرسطحی خودکنترل، نسبت به تغییرات ضرایب مجازی ارزیابی شده است. بدین منظور پس از محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی مانور دور زدن یک وسیله زیرسطحی خودکنترل، اثرات تغییرات ضرایب جرم مجازی بر این مانور ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده جهت طراحی یک کنترلر مناسب برای فازهای مختلف حرکت یک زیرسطحی می‌تواند استفاده شود.

## ۲- معادلات حرکت

شبیه‌سازی حرکت یک جسم در زیر آب، نیازمند حل ۶ معادله دیفرانسیل غیرخطی کوپل شده است. سه معادله از این معادلات حرکت انتقالی وسیله را تشریح می‌کند و ۳ معادله باقی‌مانده، حرکت دورانی وسیله را حول چند نقطه ثابت از جسم بیان می‌کند. این نقاط ثابت معمولاً مرکز جسم ( $CM^1$ ) یا مرکز شناوری ( $CB^2$ ) جسم لحاظ می‌شود. ترم‌هایی که در معادلات حرکت نشان‌دهنده نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی اعمال شده روی جسم هستند، به کمک سری تیلور حول شرایط مرجع بسط داده می‌شوند. در هواپیماها و کشتی‌های سطحی این شرایط مرجع معمولاً شرایط تعادل حرکت رو به جلو در سرعت ثابت  $U_0$  است. این شرط مرجع برای تحلیل  $UUV^3$  به کار گرفته می‌شود.

برای یک جسم با حرکت شش درجه آزادی بردارهای وضعیت به صورت  $x = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)^T$  و بردارهای  $\dot{q} = (u, v, w, p, q, r)^T$  تعریف می‌شوند. جهت حرکت هر یک از درایه‌های این بردارها برای دستگاه مختصات محلی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در جدول ۱، نماد متغیرهای مستقل و وابسته و نیروها و گشتاورهای خارجی در دو دستگاه مختصات اصلی و محلی ذکر شده‌اند.

شبیه‌سازی حرکت زیرسطحی بوسیله کامپیوتر می‌تواند در طراحی و کنترل آن مؤثر باشد. استفاده از شبیه‌سازی به طراح این امکان را می‌دهد که پایداری وسیله را قبل از ساخت

روش‌های تحلیلی که برای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی مدل به کار می‌رود شامل، تئوری نواری و یا حل تحلیلی معادلات لاپلاس است. تئوری استریپ که به تئوری اجسام لاغر نیز معروف است، می‌تواند برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی اجسام باریک با استفاده از خواص مقاطع ۲ بعدی به کار رود. این روش‌ها از دقت کمتری برخوردارند [۱۸]. روش‌های نیمه‌تجربی بر مبنای روابطی قرار دارند که از تست مدل‌های متنوع در شرایط مختلف پروازی در تونل باد به دست آمده‌اند. این روش‌ها هنگامی که برای اجسام متقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، از دقت مناسبی برخوردارند [۱۹ و ۲۰].

ضرایب هیدرودینامیکی در واقع ضرایب معادلات حرکت ۶ درجه آزادی وسیله زیرسطحی می‌باشند و با داشتن این ضرایب، می‌توان معادلات حرکت را شبیه‌سازی کرده و مانور وسیله را مورد ارزیابی قرار داد. معمولاً این شبیه‌سازی‌ها در چند شرایط تست استاندارد انجام می‌شود. این شرایط شامل، حرکت زیگزآگ، حرکت مارپیچ و ایستایی ناگهانی وسیله زیرسطحی می‌باشند [۵]. جهت شبیه‌سازی دینامیک حرکت وسیله، معادلات حرکت ۶ درجه آزادی در حوزه زمان حل خواهد شد و منحنی حرکت وسیله به دست خواهد آمد. بدیهی است که با تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی، ضرایب معادلات حرکت وسیله تغییر خواهد کرد و حرکت وسیله زیرسطحی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. با توجه به این موضوع، ارزیابی دقیق میزان حساسیت حرکت وسیله زیرسطحی خود کنترل نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی، از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ زیرا که با انجام این ارزیابی‌ها در فاز طراحی وسیله، اهمیت هر کدام از ضرایب هیدرودینامیکی برای فازهای مختلف حرکت مشخص خواهد شد؛ لذا این امکان برای طراحان میسر خواهد شد که روش‌های دقیق‌تر و در نتیجه پرهزینه‌تر را تنها برای تخمین و شناسایی ضرایب هیدرودینامیکی مهم به کار گیرند و بدین گونه در زمان و هزینه طراحی وسیله زیرسطحی صرفه‌جویی کنند. بر این اساس می‌توان با تغییر پارامترهای هندسی، میزان تغییر ضرایب هیدرودینامیکی را بررسی کرد و نقش آنها را بر مانور وسیله زیرسطحی، مورد ارزیابی قرار داد [۲۱].

<sup>1</sup> Center of Mass

<sup>2</sup> Center of Buoyancy

<sup>3</sup> Unmanned Underwater Vehicle



شکل ۱- جهات حرکت و چرخش در دستگاه مختصات اصلی و محلی

جدول ۱- علائم مربوط به سرعت، نیرو و مکان استفاده شده در معادلات حرکت شش درجه آزادی

درجه آزادی	نیرو و گشتاور در دستگاه مختصات محلی	سرعت‌های خطی و زاویه‌ای در دستگاه مختصات محلی	مکان و زوایای اوپلر در دستگاه مختصات اصلی
Surge	X	u	x
Sway	Y	v	y
Heave	Z	w	z
Roll	K	p	$\phi$
Pitch	M	q	$\theta$
Yaw	N	r	$\psi$

در سیستم مختصات اوپلری معادلات حرکت یک وسیله زیرسطحی به صورت دسته معادلات ۱ خواهد بود. در این معادلات، سمت راست تساوی، نشان‌دهنده نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر وسیله زیرسطحی است [۴].

$$m \begin{bmatrix} \dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) \\ +y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q}) \end{bmatrix} = \Sigma X_{ext}$$

$$m \begin{bmatrix} \dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) \\ +z_g(qr - \dot{p}) + x_g(pq + \dot{r}) \end{bmatrix} = \Sigma Y_{ext}$$

$$m \begin{bmatrix} \dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) \\ +x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p}) \end{bmatrix} = \Sigma Z_{ext}$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr$$

$$+ m \begin{bmatrix} y_g(\dot{w} - uq + vp) \\ -z_g(\dot{v} - wp + ur) \end{bmatrix} = \Sigma K_{ext}$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp$$

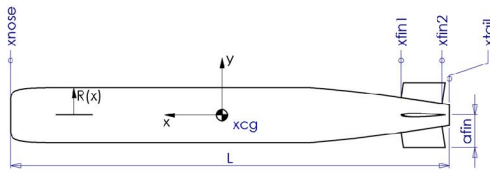
$$+ m \begin{bmatrix} z_g(\dot{u} - vr + wq) \\ -x_g(\dot{w} - uq + vp) \end{bmatrix} = \Sigma M_{ext}$$

مورد بررسی قرار دهد؛ لذا طراح می‌تواند کنترلر مناسبی را جهت کنترل وسیله پیشنهاد کند. جهت شبیه‌سازی حرکت وسیله زیرسطحی، ابتدا می‌بایست معادلات حاکم بر حرکت وسیله را استخراج کرد. سپس باید ضرایب هیدرودینامیکی وسیله را محاسبه کرد و در نهایت برای داده‌های کنترلی با ورودی معین، سیستم معادلات حاکم می‌بایست حل شوند. در این فرایند هرگونه خطا در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، نتیجه شبیه‌سازی حرکت وسیله را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا که ضرایب هیدرودینامیکی در واقع ضرایب ترم‌های مختلف معادلات حاکم هستند. متداول‌ترین سیستم مختصات به‌کاررفته در زمینه کنترل و هدایت اجسام مغروق در آب و یا در حال پرواز در هوا، سیستم مختصات اوپلری است. این سیستم به‌منظور موقعیت‌یابی اجسام در حال حرکت نسبت به زمین (ثابت)، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به همین ترتیب برای یک جسم دایروی همراه با فین، ضرایب جرم مجازی به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$m_{af}(x) = \pi\rho(a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2}) \quad (3)$$

که در روابط بالا  $R(x)$  شعاع بدنه در طول بدنه و  $a_{fin}$  فاصله کورد بالایی بالک از خط مرکزی است. با نام‌گذاری قسمت‌های مختلف AUV به صورت ۰ شکل ۲ ضرایب جرم مجازی در راستاهای مختلف محاسبه خواهند شد.



شکل ۲- نام‌گذاری قسمت‌های مختلف یک AUV جهت محاسبه ضرایب جرم مجازی

جرم مجازی در راستای محور  $x$  با تقریب بدنه با یک بیضوی محاسبه می‌شود. طول بدنه، معادل قطر بزرگ این بیضوی و قطر بدنه، معادل قطر کوچک این بیضوی در نظر گرفته می‌شوند. رابطه تجربی (۴) برای محاسبه ضریب جرم مجازی در این راستا به کار گرفته می‌شود.

$$F_x = X_{\dot{u}} \dot{u}$$

$$X_{\dot{u}} = \frac{4K_1\rho\pi l}{3} r^2 \quad (4)$$

$K_1$  ضریب مانک است که با تغییر ضریب لاغری جسم تغییر می‌کند [۱۹].

نیروی جرم مجازی بدنه به همراه بالک‌ها در راستای محور  $y$  به کمک روابط (۵) به دست می‌آید:

$$F_y = Y_{\dot{v}} \dot{v}$$

$$Y_{\dot{v}} = -\left( \int_{x_{tail}}^{x_{fin2}} m_a(x) dx + \int_{x_{fin1}}^{x_{fin2}} m_{af}(x) dx + \int_{x_{fin1}}^{x_{nose}} m_a(x) dx \right) \quad (5)$$

به همین ترتیب نیروی جرم مجازی در راستای محور  $z$  محاسبه می‌شود [۱۹].

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq$$

$$+ m \begin{bmatrix} x_g(\dot{v} - wp + ur) \\ -y_g(\dot{u} - wr + wq) \end{bmatrix} = \Sigma N_{ext} \quad (1)$$

### ۳- محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی

تا کنون جهت محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. روش‌هایی را که برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی وجود دارند، به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ این روش‌ها عبارت‌اند از:

- ❖ روش‌های تحلیلی
- ❖ روش‌های نیمه‌تجربی
- ❖ روش‌های آزمایشگاهی
- ❖ روش‌های شبیه‌سازی عددی

نیروهای هیدرودینامیکی مرتبط با حرکت جسم در سیال به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. نیروهای هیدرودینامیکی مرتبط با شتاب جسم به نیروهای جرم مجازی معروف‌اند؛ در حالی که نیروهای مرتبط با سرعت جسم به نیروهای استهلاکی یا دمپینگ معروف‌اند.

جهت به دست آوردن نیروهای اینرسی، فرض‌های حاکم بر مسأله به صورت زیر خلاصه می‌گردند:

- ❖ جسم داخل سیال یک جسم صلب است.
- ❖ سیال غیرقابل تراکم پذیر است.
- ❖ سیال ایده‌آل به عبارتی دیگر غیرلزج است و نیروهای خارجی پایستارند؛ در اینصورت بنا بر قانون، کلون سیالی که در ابتدا غیرچرخشی بوده است، غیرچرخشی باقی خواهد ماند.
- ❖ مرزهای سیال به جز در تماس با جسم نامحدود است.

دو فرض اول در بیشتر مسائل ارضاء می‌شوند. فرض سیال غیرلزج جهت به دست آوردن نیروهای فشار دینامیکی با رینولدزهای بزرگ حاکم بر حرکت AUV در زیر آب توجیه می‌شود. البته باید اشاره کرد، اثرات لزج مانند پسا و برآ باید به‌طور مجزا، مورد ارزیابی قرار گیرد.

ضرایب جرم مجازی در مقطع عرضی برای یک جسم سیلندری، از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$m_a(x) = \pi\rho R(x)^2 \quad (2)$$

جدول ۲- مقادیر پارامترهای هندسی وسیله زیرسطحی خودکنترل

پارامترهای هندسی	مقدار (میلی متر)
L	۶۰۷۰
D	۵۰۰
Xc.g	۲۷۰۵
x <sub>fin1</sub>	۵۶۱۰
x <sub>fin2</sub>	۵۹۶۵
a <sub>fin</sub>	۲۵۰

دست آورد؛ لذا ضرایب دمپینگ غیرخطی جریان مقطع عرضی به کمک روابط (۱۰-۱۳) به دست می‌آیند:

$$Y_{v|v} = Z_{w|w} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_0^L 2R(x)dx - 2\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin} c_{df}\right) \quad (10)$$

$$M_{w|w} = -N_{v|v} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_0^L 2xR(x)dx - 2x_{fin}\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin} c_{df}\right) \quad (11)$$

$$Y_{r|r} = -Z_{q|q} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_0^L 2x|x|R(x)dx - 2x_{fin}|x_{fin}|\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin} c_{df}\right) \quad (12)$$

$$M_{q|q} = N_{r|r} = -\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int_0^L 2x^3R(x)dx - 2x_{fin}^3\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin} c_{df}\right) \quad (13)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $c_{dc}$  ضریب پسا سیلندر،  $R(x)$  شعاع پروفیل بدنه در راستای طولی،  $S_{fin}$  مساحت سطوح کنترلی و  $c_{df}$  ضریب پسا جریان عرضی سطوح کنترلی است. هرگز ضریب پسا جریان عرضی یک سیلندر  $c_{dc}$  را تقریباً ۱/۱ تقریب زد. ضریب پسا جریان عرضی سطوح کنترلی  $c_{df}$  را می‌توان به کمک رابطه ارائه شده توسط ویکر و فلنر به دست آورد:

$$c_{df} = 0.1 + 0.7t \quad (14)$$

که در آن  $t$  نسبت طول کورد بالایی بالک به کورد پایینی است.

ضریب دمپینگ رول وسیله را می‌توان از رابطه (۱۵) محاسبه کرد:

$$K_{p|p} = Y_{wf} r_{mean}^3 \quad (15)$$

که در آن  $Y_{wf}$  ضریب پسا عرضی مربوط به بالکها است و  $r_{mean}$  ارتفاع میانگین بالک بالای خط مرکزی وسیله است.

ضرایب مربوط به نیروی برآ بدنه، از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شوند:

$$Y_{uvl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{ydf} \quad (16)$$

برای محاسبه جرم مجازی رول فرض می‌شود که بدنه و برآمدگی‌های کوچک روی آن جرم مجازی تولید نمی‌کنند؛ بنابراین تنها قسمتی از بدنه که همراه بالکهاست، دارای جرم مجازی رول است. جرم مجازی رول بدنه همراه بالکها به کمک رابطه تجربی (۶) به دست می‌آید.

$$K = K_p \dot{p} \quad (6)$$

$$K_p = \int_{x_{fin2}}^{x_{fin1}} \frac{2}{\pi} a_{fin}^4 dx$$

ممان جرم مجازی پیچ و ضرایب جرم مجازی پیچ با استفاده از تئوری اجسام لاغر به دست می‌آید [۱۹].

همچنین ممان جرم مجازی یاو و ضرایب جرم مجازی یاو به صورت روابط (۷-۹) به دست می‌آیند:

$$N = N_p \dot{v} + N_r \dot{r} \quad (7)$$

$$N_p = -M_{\dot{w}}$$

$$N_r = M_q$$

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho c_d A_f\right) u|u| \quad (8)$$

$$X_{u|u} = -\frac{1}{2}\rho c_d A_f \quad (9)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $A_f$  سطح مقطع زیرسطحی و  $c_d$  ضریب پسا محوری جسم است.

نیروی پسا جریان مقطع عرضی وسیله را می‌توان به کمک تئوری اجسام لاغر با انتگرال‌گیری در طول جسم و اضافه کردن نیروی پسا جریان عرضی مربوط به بالکها به

داده شود و به ازای این ورودی‌ها، متغیرهای سینماتیکی حرکت وسیله زیرسطحی را بدست آورد. در شبیه‌ساز حرکت برای بدست آوردن سینماتیک وسیله، داشتن مشتقات هیدرودینامیکی ضروری است؛ لذا از مشتقات هیدرودینامیکی وسیله زیرسطحی که در بخش قبلی ارائه شد، بدین منظور استفاده شده است. با داشتن مشتقات هیدرودینامیکی در مدل و با حل دستگاه معادلات حرکت زیرسطحی، متغیرهای سینماتیکی حرکت وسیله محاسبه می‌شوند. برای حل این معادلات، از روش رانگ-کوتا مرتبه ۴ استفاده می‌شود. نهایتاً باید نتایج شبیه‌ساز تهیه شده، اعتبار سنجی شود تا از نتایج بدست آمده از آن اطمینان حاصل شود.

همانطور که می‌دانیم، معادله (۳۸) بیانگر معادلات حرکت کوپل شش درجه آزادی است و با ضرب معکوس ماتریس جرم به طرفین معادله فوق، معادلات حرکت به صورت شش دسته معادلات Ode بیان خواهد شد.

$$M\dot{v} = -(C + D)v - g(\eta) + \tau \quad (22)$$

$$M^{-1}M\dot{v} = -M^{-1}(C + D)v - M^{-1}g(\eta) + M^{-1}\tau$$

$$\dot{v} = -M^{-1}(C + D)v - M^{-1}g(\eta) + M^{-1}\tau \quad (23)$$

برای حل معادله‌ی اخیر باید از الگوریتم اویلر<sup>۱</sup> و یا رانگ-کوتا<sup>۲</sup> استفاده کرد؛ اما روش اویلر از مرتبه یک بوده و دارای خطای عددی بیشتری نسبت به روش‌های دیگر است. همه روش‌های عددی موجود برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی، بر این اساس است که الگوریتم‌های ارائه شده برای بدست آوردن دقیق‌ترین شیب نمودار و در نهایت یافتن نقطه بعدی، بعد از مدت زمان dt و قرار دادن این نقطه به عنوان نقطه شروع حلقه تکرار مرحله بعد، برای یافتن نقطه بعدی می‌باشند.

در اینجا حرکت وسیله زیرسطحی خودکنترل برای مانور استاندارد دور زدن در یک حالت خاص شبیه‌سازی شده است. جهت انجام مانور دور زدن هنگامی که وسیله به سرعت نامی خود رسید، بالک‌ها در یک زاویه خاص قرار می‌گیرند تا وسیله زیرسطحی در یک مسیر دایره‌ای قرار گیرد و حول یک نقطه خاص دور بزند. مانور دور زدن، از چند فاز مختلف

که در آن چگالی سیال،  $\rho$  قطر ماکزیمم بدنه و  $c_{y\alpha\beta}$  ضریب برآ بدنه است. ضرایب مربوط به گشتاور برآ بدنه، از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شوند:

$$M_{uwl} = -N_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho d^2 c_{y\alpha\beta} x_{cp} \quad (17)$$

در آن  $x_{cp}$  مکان مرکز فشار در راستای طولی است و به طور تقریبی از رابطه (۱۸) به دست می‌آید:

$$x_{cp} = -0.65l + x_{c.g} \quad (18)$$

در آن  $x_{c.g}$  فاصله مرکز جرم از نوک دماغه است. ضرایب مربوط به نیرو و گشتاور برآ بالک، به کمک روابط (۱۹-۲۰) محاسبه می‌شوند:

$$Y_{uu\delta_r} = -Y_{uvf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin}$$

$$Z_{uu\delta_s} = Z_{uwf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin}$$

$$Y_{urf} = -Z_{uqf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (19)$$

$$N_{uu\delta_r} = -N_{uvf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}$$

$$M_{uu\delta_s} = M_{uwf} = \rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}$$

$$N_{urf} = -M_{uqf} = -\rho c_{L\alpha} S_{fin} x_{fin}^2 \quad (20)$$

که در آن‌ها  $\rho$  چگالی سیال،  $S_{fin}$  مساحت سطوح کنترلی،  $c_{L\alpha}$  ضریب شیب نیروی برآ بالک نسبت به زاویه حمله بالک،  $\delta_s$  و  $\delta_e$  زاویه بالک نسبت به مرجع متصل به بالک می‌باشند.

نیروی پیشرانش وسیله زیرسطحی را می‌توان متناسب با نیروی پسا وسیله در نظر گرفت؛ لذا خواهیم داشت:

$$X_{prop} = -X_{iu|u|} |u| \quad (21)$$

در نهایت ضرایب ترکیبی ناشی از ضرایب برآ بدنه، برآ بالک و جرم مجازی محاسبه خواهند شد [۱۹].

#### ۴- شبیه‌سازی معادلات حرکت

شبیه‌سازی حرکت یک جسم در زیر آب نیازمند، حل ۶ معادله دیفرانسیل غیرخطی کوپل شده است. ۳ معادله از این معادلات حرکت انتقالی وسیله را تشریح می‌کند و ۳ معادله باقی‌مانده، حرکت چرخشی را بیان می‌نماید.

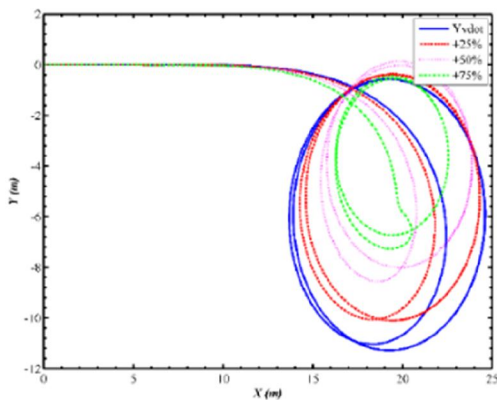
در شبیه‌سازی حرکت زیرسطحی به صورت حلقه باز، سیستم کنترلی وجود ندارد. در این رهیافت باید فرامینی به سطوح کنترلی و سیستم پیشرانش به عنوان ورودی شبیه‌ساز

<sup>1</sup> Euler

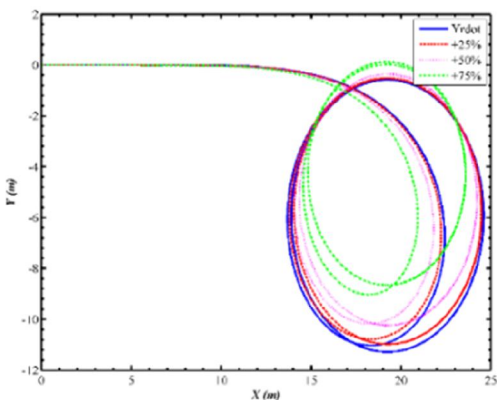
<sup>2</sup> Runge-Kutta

در اینجا حساسیت مشخصه‌های مانور دور زدن مانند شعاع حال پایا، طول ورودی و قطر تاکتیکی نسبت به تغییر ضرایب هیدرودینامیکی در مانور دور زدن در صفحه افقی، ارزیابی شده است. بدین منظور ضرایب هیدرودینامیکی به میزان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد افزایش پیدا کرده‌اند و میزان حساسیت پارامترهای مذکور نسبت به حالت اولیه سنجیده شده‌اند.

در شکل ۴، ۵، شکل ۶ و شکل ۷، مانور دور زدن وسیله زیر سطحی خودکنترل با تغییرات ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی ضرایب جرم مجازی  $N_{\dot{v}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, Y_{\dot{r}}$  مشاهده می‌شوند.



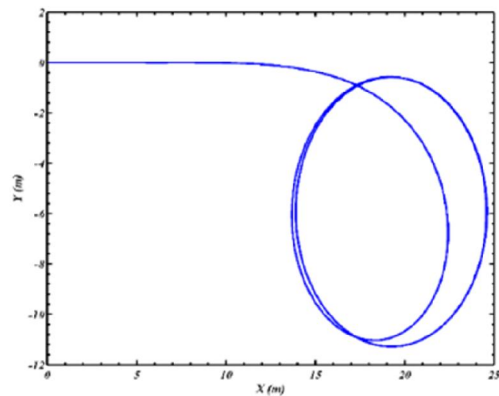
شکل ۴- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب جرم مجازی  $Y_{\dot{v}}$



شکل ۵- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب جرم مجازی  $Y_{\dot{r}}$

تشکیل شده است که می‌توانند به عنوان مشخصه‌های مانور دور زدن معرفی شوند. اولین مشخصه مانور دور زدن، شعاع دایره در حالت پایا<sup>۱</sup> است. قسمت ورودی<sup>۲</sup> پارامتر دیگری است که مشخص کننده حالت گذرای مانور است. قطر تاکتیکی<sup>۳</sup> نیز، می‌تواند به عنوان قطر دایره در حالت گذرای سیستم معرفی شود.

شبیه‌سازی مانور دور زدن وسیله زیر سطحی خودکنترل در سرعت نامی ۵ متر بر ثانیه و زاویه انحرافی بالک ۲۰ درجه انجام گرفته است؛ درحالی نیروی پیشران ۳۹۹ نیوتن است. شکل ۳ نمایی از مانور دور زدن وسیله زیر سطحی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مانور دور زدن وسیله زیر سطحی خودکنترل

## ۵- آنالیز حساسیت

هدف از آنالیز حساسیت، بررسی تأثیر تغییر یک پارامتر بر پاسخ وسیله زیر سطحی در یک مانور خاص است. اگر ورودی و خرجی یک سیستم به ترتیب با  $I$  و  $O$  نشان داده شوند و تغییرات آن‌ها نسبت به شرایط مرجع  $I_0$  و  $O_0$  سنجیده شوند، آنگاه برای هر نمونه حساسیت پاسخ اندازه‌گیری شده نسبت به تغییرات پارامتر ورودی را می‌توان به کمک پارامتر  $S$  به صورت رابطه (۲۴) تعریف کرد.

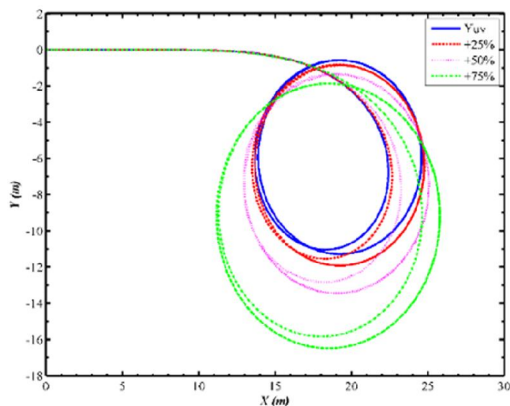
$$S = \frac{(O - O_0)/O_0}{(I - I_0)/I_0} \quad (24)$$

<sup>1</sup> Steady Turning Radius

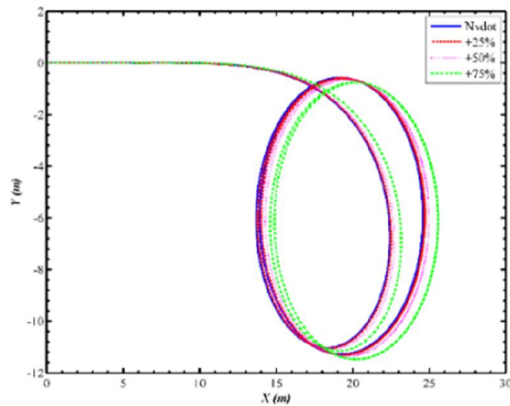
<sup>2</sup> Advance

<sup>3</sup> Tactical Diameter

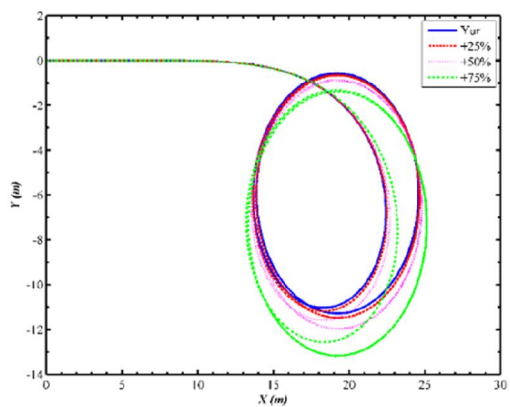




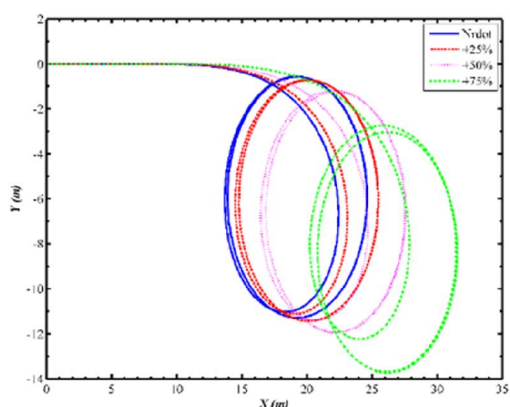
شکل ۸- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب ترکیبی  $Y_{uv}$



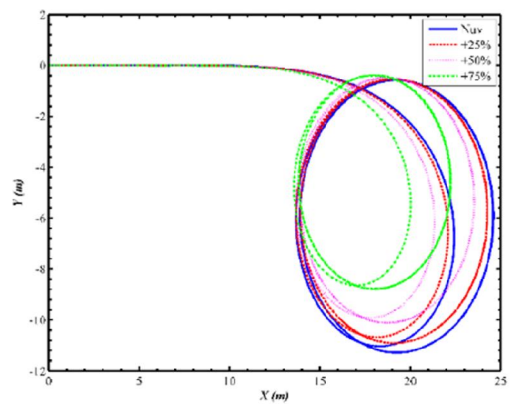
شکل ۶- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب جرم مجازی  $N_D$



شکل ۹- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب ترکیبی  $Y_{ur}$



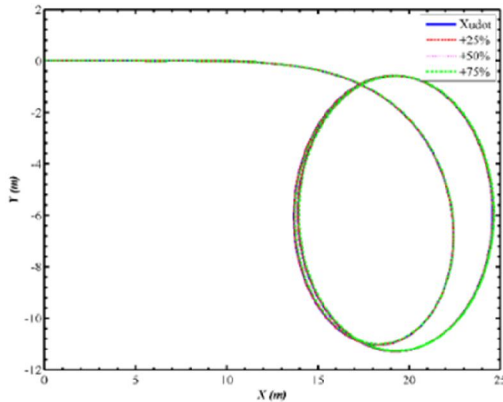
شکل ۷- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب جرم مجازی  $N_r$



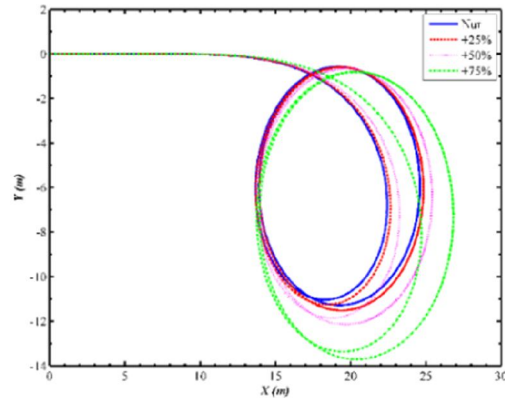
شکل ۱۰- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب ترکیبی  $N_{uv}$

همانطور که از این شکل‌ها پیداست، در تمامی موارد کم یا زیاد شدن تغییر ضرایب جرم مجازی سبب تغییر فاز گذرای مانور شده است؛ در حالی که تنها در مواردی که جرم مجازی مربوط به نیروی جانی بوده است، فاز پایای مانور تغییر پیدا کرده است.

در شکل ۸، شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱، مانور دور زدن وسیله زیرسطحی با تغییرات ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی ضرایب ترکیبی  $N_{uv}$ ،  $Y_{ur}$ ،  $Y_{uv}$  و  $N_{ur}$  مشاهده می‌شوند. این ضرایب ترکیبی، از اثرات نیروهای دمپینگ و جرم مجازی می‌باشند.



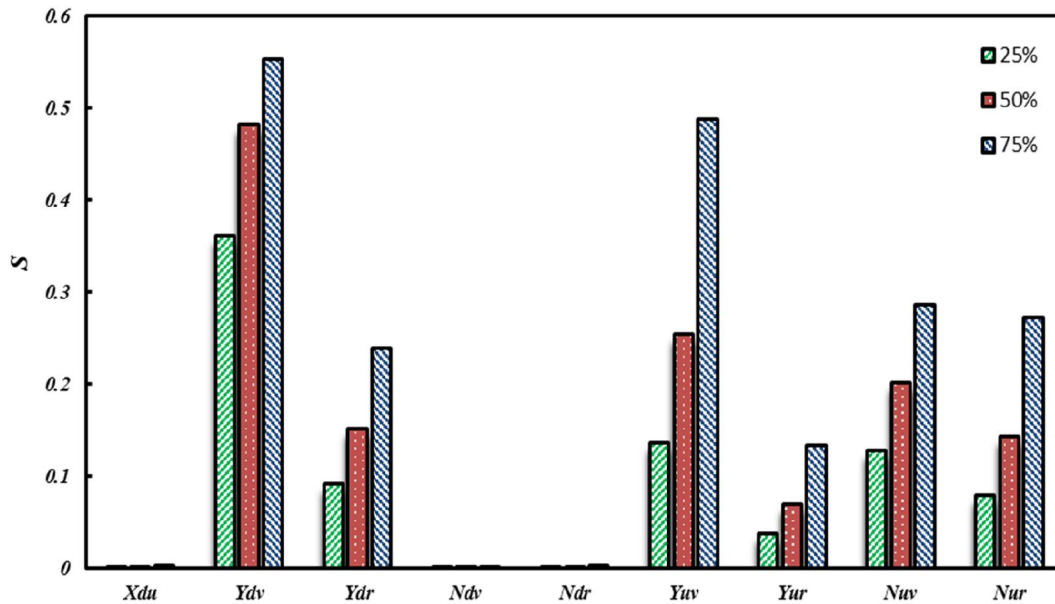
شکل ۱۲- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب جرم مجازی  $X_{d0t}$



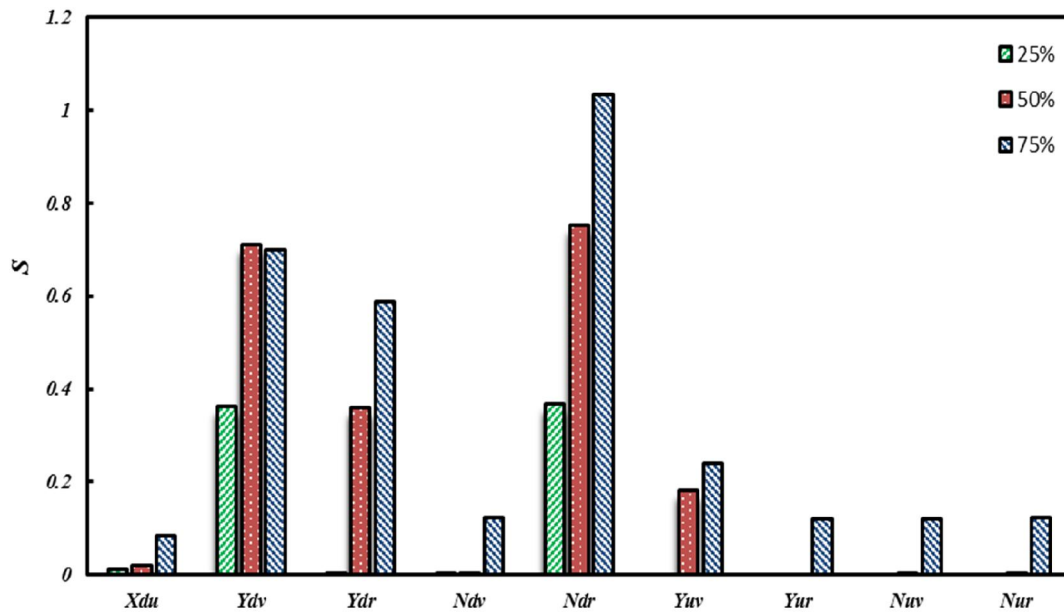
شکل ۱۱- مانور دور زدن در حالت‌های مختلف ضریب ترکیبی  $N_{ur}$

از شکل ارائه شده دریافت می‌شود که مانور حرکت دور زدن، حساسیت چندانی به تغییر ضریب جرم مجازی محوری ندارد. در شکل ۱۳، مقدار حساسیت شعاع دور زدن در حالت پایا نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی، در شکل ۱۴ مقدار حساسیت طول ورودی نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی و در شکل ۱۵، مقدار حساسیت قطر تاکتیکی نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی ارائه شده‌اند.

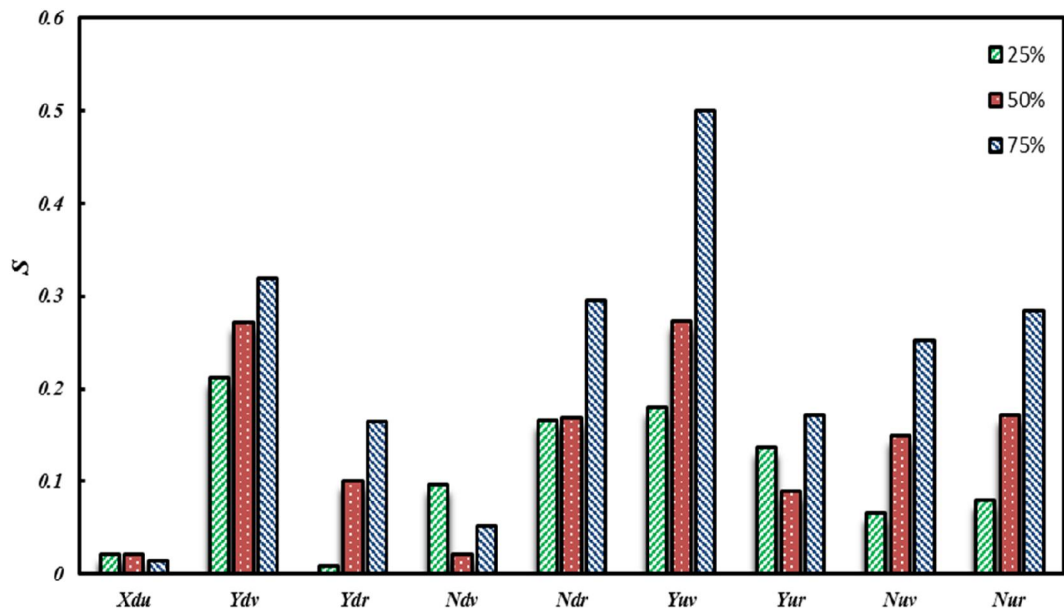
از شکل‌های ارائه شده دریافت می‌شود که تغییر ضرایب ترکیبی فاز گذرا و پایای، مانور را تحت تأثیر قرار داده است؛ به طوری که در بیشتر موارد، افزایش مقدار ضرایب ترکیبی سبب افزایش فاز گذرا و افزایش شعاع مانور حالت پایا شده است. در شکل ۱۲، مانور دور زدن وسیله زیرسطحی با تغییرات ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی ضریب جرم مجازی  $X_{d0t}$  مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳- حساسیت شعاع دور زدن پایا نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی



شکل ۱۴- حساسیت طول ورودی نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی



شکل ۱۵- حساسیت قطر تاکتیکی نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی

فاقد شتاب خطی است و تنها با یک شتاب زاویه‌ای ثابت حول مرکز دایره دور می‌زند. از طرفی طول قسمت ورودی که قسمت گذرای مانور است، بیشترین حساسیت را به ترم‌های

با توجه به نمودارهای توزیعی مقادیر حساسیت، می‌توان گفت که شعاع دوران حالت پایای مانور، تقریباً به همان‌های جرم افزوده غیرحساس است؛ زیرا که وسیله در حالت پایا

- autonomous underwater vehicle. *Control Eng Pract* 15(6): 727-739.
- [7] Cutipa Luque JC, Donha DC (2011) AUV identification and robust control. In *World Congress* 18(1): 14735-14741.
- [8] Rhee KP, Yoon HK, Sung YJ, Ahn KS, Kang N (2000) Experimental study on the effect of the appendage shape of submersible on hydrodynamic coefficients. In the 3rd Seminar on Naval Weapon Systems Development, Chinhae (Korea).
- [9] Lewandowski E (1991) Tests of a submarine model in coning motion. *Davidson Laboratory Technical Report* 2660.
- [10] Johnson DC (1989) A coning motion apparatus for hydrodynamic model testing in a non-planar cross-flo. *Doctoral dissertation*, Massachusetts Institute of Technology.
- [11] Jun BH, Park JY, Lee FY, Lee PM, Lee CM, Kim K, Lim YK, Oh JH (2009) Development of the AUV 'ISiMI' and a free running test in an Ocean Engineering Basin. *Ocean Eng* 36: 2-14.
- [12] Lee SK, Joung TH, Cheon SJ, Jang TS, Lee JH (2011) Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test. *Int J Nav Arch Ocean* 3(3): 174-180.
- [13] Geisbert JS (2007) Hydrodynamic modeling for autonomous underwater vehicles using computational and semi-empirical methods. *Doctoral dissertation*, Virginia Tech.
- [14] Ivanell S (2001) Hydrodynamic simulation of a torpedo with pumpjet propulsion system. *Master Thesis* Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [15] Phillips AB, Furlong M, Turnock SR (2007) Virtual planar motion mechanism tests of the autonomous underwater vehicle Autosub. In, *STG-Conference / Lectureday "CFD in Ship Design"*, Institute M-8 of Hamburg University of Technology, Germany.
- [16] Kim H, Cho H (2011) Numerical study on control derivatives of a high-speed underwater vehicle. *J Mech Sci Technol* 25(3): 759-765.
- [17] Chen CW, Yan NM (2017) Prediction of added mass for an autonomous underwater vehicle moving near sea bottom using panel method. In *Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017 4th International Conference on* (pp. 1094-1098). IEEE.
- [18] Nielsen JNN (1998) *Missile aerodynamics*.
- [19] Prestero TJ (2001) Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. *Doctoral Dissertation*, Massachusetts institute of technology.
- جرم افزوده دارد؛ در حالیکه نسبت به ترم‌های دمپینگ غیرخطی، کمترین حساسیت را دارد. قطر تاکتیکی که ترکیبی از قسمت گذرا و پایای مانور است، حساسیت متوسطی به همه ترم‌ها دارد.
- ### ۶- نتیجه گیری
- در تحقیق حاضر ابتدا ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی خودکنترل با روش تحلیلی-نیمه تجربی به دست آمده است. با حل معادلات دینامیکی ۶ درجه آزادی، مانور دور زدن این وسیله شبیه سازی شده است. در ادامه مانور دور زدن وسیله زیرسطحی مورد نظر با تغییرات ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی ضرایب، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با تعریف پارامتر حساسیت، میزان حساسیت فازهای مختلف مانور نسبت به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که شعاع دوران حالت پایای مانور، تقریباً به همان‌های جرم افزوده غیرحساس است. از طرفی طول ورودی که قسمت گذرای مانور است، حساسیت خود را حتی با تغییر ۲۵ درصدی ضرایب جرم مجازی نشان می‌دهد. با تغییر ۵۰ درصدی و ۷۵ درصدی ضرایب، هر چند حساسیت طول ورودی به ضرایب ترکیبی نیز مشخص می‌شود، ولی میزان این حساسیت نسبت به حساسیت به ضرایب جرم مجازی خطی، بسیار کمتر است.
- ### ۷- مراجع
- [1] Alijani M, Zeinali M, Nouri NM (2018) Designing of the body shape of an autonomous underwater vehicle using the design of experiments method. *P I Mech Eng C-J Mec* 0954406218820884.
- [2] Sahu BK, Bidyadhar S (2014) The state of art of autonomous underwater vehicles in current and future decades. *Automation, Control, Energy and Systems (ACES), First International Conference*.
- [3] AUVAC (2018) *Autonomous Undersea Vehicle Applications Center (AUVAC)*, URL:(<http://www.auvac.org/>).
- [4] Fossen TI (1994) *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Inc.
- [5] Abkowitz MA (1980) Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification. *Transactions SNAME* 88: 283-318.
- [6] Tiano A, Sutton R, Lozowicki A, Naeem W (2007) Observer Kalman filter identification of an

- [21] Abolvafaie M, Koofigar HR, Malekzadeh M (2018) Classification of hydrodynamic coefficients of autonomous underwater vehicles based on sensitivity analysis in standard maneuvers. J Mar Sci Tech-Taiw 26(1): 1-10.
- [20] De Barros E, Dantas JL, Pascoal AM, De SáE (2008) Investigation of normal force and moment coefficients for an AUV at nonlinear angle of attack and sideslip range. IEEE J Oceanic Eng 33(4): 538-549.