Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(7) (2020) 499-502
DOI: 10.22060/mej.2019.15237.6066

Roll Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle with a Fish-like Hull Shape

A. Honaryar and M. Ghiasi*

Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: An autonomous underwater vehicle designed and manufactured with fish-like hull shape in order to survey subsea pipeline and cable is analyzed hydrodynamically. Not only does having high hydrodynamic stability increase course keeping ability, but it facilitates dynamic behavior control of robot regarding the disturbances like marine currents in the water. Roll dynamic instability would be an adverse phenomenon for underwater vehicles results in the deviation from the main path. After mentioning governing motion equations of vehicle, hydrodynamic moment acting on the body has been computed numerically using computational fluid dynamics. The robot is assumed to be a rigid body and the flow passing over it is considered steady and incompressible. Having extracted relationship between moment and flow angular velocity, the linear hydrodynamic coefficient needed for stability analysis is estimated. Using this damping coefficient, roll dynamic stability of the robot has been evaluated. To ensure the accuracy of numerical results, computations are compared with axisymmetric body designed and manufactured in Ship Hydrodynamic Department of David Taylor Research Center; Comparisons show firmly good agreement with experiments. Results reveal that roll dynamic stability of proposed hull shape with triangular cross-section is 10 times as great as that of conventional axisymmetric body with circular cross-section.

Review History:

Received: 03/11/2018
Revised: 02/01/2019
Accepted: 11/03/2019
Available Online: 25/03/2019

Keywords:

Autonomous underwater vehicle
Fish-like hull shape
Roll dynamic stability
Computational fluid dynamics
Hydrodynamic damping coefficient

1. INTRODUCTION

Much research in the field of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) hull shape has focused on reducing drag force and eventually some axisymmetric body forms have been proposed [1-3]. However, these conventional forms have not always been appropriate for every task defined for AUV. For example, Alvarez et al. [4] presented a suitable body for AUVs moving near the free surface which was different from typical hull shapes. Furthermore, inspired by some sea creatures, several forms were introduced [5-6]. Apart from velocity, hydrodynamic stability of an AUV should be considered. Numerous studies have found Computational Fluid Dynamics (CFD) as an effective tool in order to compute hydrodynamic damping coefficients needed for stability analysis [7-12].

In the current study, after proving high straight-line stability [13], roll dynamic stability of a fish-like AUV has been analyzed using CFD. The vehicle is assumed as a rigid body undergoing a rotational flow to simulate the axial rotation test. Obtaining relationship between hydrodynamic roll moment and flow angular velocity, the hydrodynamic roll damping coefficient needed for stability analysis has been extracted and compared to typical axisymmetric bodies.

2. ZAYANDEH RUD AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

Appreciating Zayandeh Rud river, an important river passing through the historic city of Isfahan in central part of Iran, fish-like vehicle inspired by catfish is called Zayandeh Rud Autonomous Underwater Vehicle (ZRAUV) and shown in Fig. 1.

As illustrated in Fig. 1, the proposed hull shape in contrast with typical AUVs which have circular cross section, has triangular cross section with a flat bottom.

3. MATHEMATIC MODEL

Motion equation in roll direction can be obtained as Eq. (1) when the origin of the Cartesian coordinate system is positioned in the center of gravity of the vehicle.

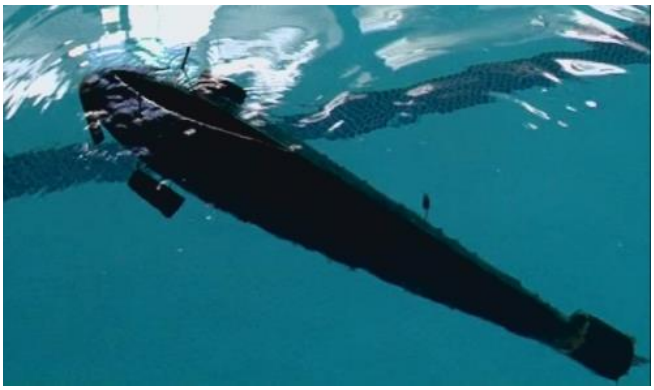


Fig. 1. Zayandeh Rud autonomous underwater vehicle

*Corresponding author's email: mghiasi@aut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

$$\left(I_{xx} - K_{\dot{p}}\right)\dot{p} = K_p p + K_\phi \phi \tag{1}$$

where I_{xx} denotes moment of inertia, $\dot{p}$ and p signify roll angular acceleration and velocity, respectively. ϕ is roll angle and $K_{\dot{p}}$ and K_p are hydrodynamic added mass and damping coefficients, respectively. In order to have the vehicle stable according to Routh-Hurwitz stability criterion the following requirement should be satisfied:

$$-K_p > 0 \tag{2}$$

Afterwards, roll hydrodynamic damping coefficient is computed numerically using simulation of axial rotating test. In virtual test, the body is fixed undergoing rotational flow. As a consequence, having identified the relationship between roll hydrodynamic moment and its angular velocity K_p is estimated.

4. RESULTS

Fig. 2 displays numerical estimations for moment compared to experiments provided by Roddy [14]. Numerical results conform to experimental data in a reasonably good agreement.

Moreover, as depicted in Fig. 3, rotational flow around the ZRAUV during simulation of the axial rotation test, manifests separation phenomenon that might be the main reason for increasing hydrodynamic moment imposing on the body. On the other hand, fluid flow around SUBOFF as a conventional body does not show such a behavior. Finally, Fig. 4 describes how larger the roll moment acting on ZRAUV is than that of SUBBOF which causes greater roll damping coefficient.

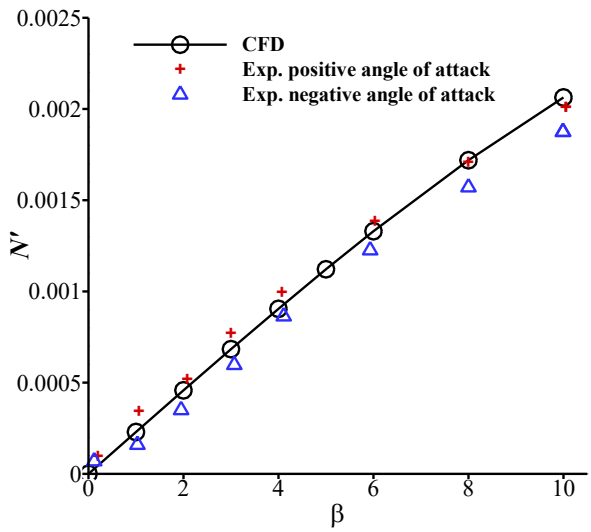


Fig. 2. Numerical results of moment in comparison with experiments for SUBOFF body

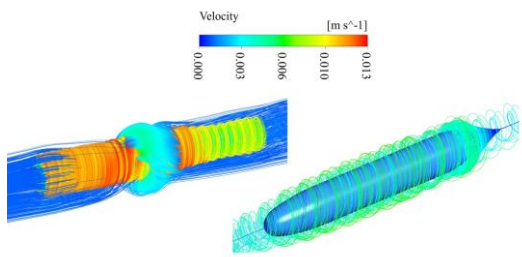


Fig. 3. Streamlines around SUBOFF (right) and ZRAUV (left) with angular velocity of 0.017 rad/s

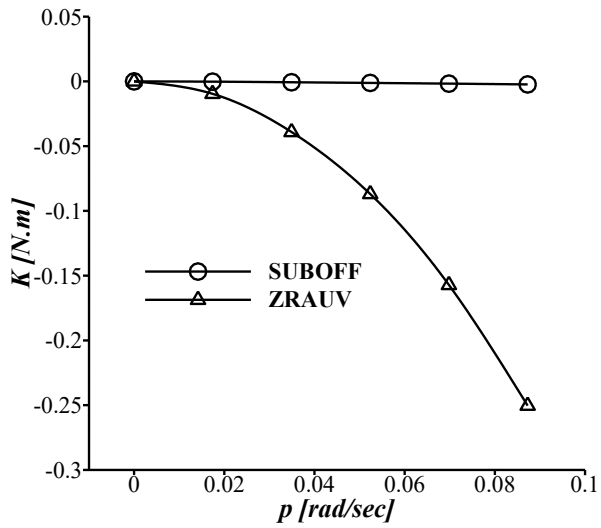


Fig. 4. Hydrodynamic moment around the longitudinal axis acting on ZRAUV and SUBOFF with respect to the angular velocity

5. CONCLUSIONS

Roll hydrodynamic stability for a fish-like autonomous underwater vehicle with a triangular cross section has been analyzed using computational fluid dynamics and compared with typical AUVs having circular cross section. Results revealed that the fluid flow properties such as pressure and velocity fields around ZRAUV in contrast to conventional AUV are completely asymmetric result in the high hydrodynamic damping moment. As a conclusion, having higher roll damping coefficient which is 10 times as great as that of typical AUVs, ZRAUV is more hydrodynamically stable.

REFERENCES

[1] J.S. Parsons, R.E. Goodson, F.R. Goldschmied, Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow, Journal of Hydronautics, 8(3) (1974) 100-107.

[2] D. Myring, A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow, The Aeronautical Quarterly, 27(3) (1976) 186-194.

[3] T. Lutz, S. Wagner, Numerical shape optimization of natural laminar flow bodies, in: Proceedings of 21st ICAS Congress, 1998.

[4] A. Alvarez, V. Bertram, L. Gualdesi, Hull hydrodynamic optimization of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth, Ocean Engineering, 36(1) (2009) 105-112.

[5] I. Nesteruk, J.H. Cartwright, Turbulent skin-friction drag on a slender body of revolution and Gray's Paradox, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2011, pp. 22-42.

[6] I. Nesteruk, G. Passoni, A. Redaelli, Shape of aquatic animals and their swimming efficiency, Journal of Marine Biology, 2014 (2014).

[7] P. Praveen, P. Krishnankutty, Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle,

Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 42(8) (2013) 1013-1022.

[8] A. Phillips, S. Turnock, M. Furlong, The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective hydrodynamic design of autonomous underwater vehicles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 224(4) (2010) 239-254.

[9] J. Zhang, J.A. Maxwell, A.G. Gerber, A.G.L. Holloway, G.D. Watt, Simulation of the flow over axisymmetric submarine hulls in steady turning, Ocean engineering, 57 (2013) 180-196.

[10] Z. Leong, D. Ranmuthugala, I. Penesis, H. Nguyen, RANS-based CFD prediction of the hydrodynamic coefficients of DARPA SUBOFF geometry in straight-line and rotating arm manoeuvres, International Journal of Maritime Engineering, 157(A1) (2015) A41-A52.

[11] L. s. Cao, J. Zhu, W. b. Wan, Numerical investigation of submarine hydrodynamics and flow field in steady turn, China ocean engineering, 30(1) (2016) 57-68.

[12] A. Honaryar, Investigation on the effect of body form on autonomous underwater vehicle maneuverability, Amirkabir University of Technology, 2014 (in Persian).

[13] A. Honaryar, M. Ghiasi, Design of a bio-inspired hull shape for an AUV from hydrodynamic stability point of view through experiment and numerical analysis, Journal of Bionic Engineering, 15(6) (2018) 950-959.

[14] R.F. Roddy, Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments, David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1990.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۷، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶
DOI: 10.22060/mej.2019.15237.6066

پایداری دینامیکی رول ربات خودکار زیرآبی با فرم بدنه شبه‌ماهی

امیر هنریار، محمود غیاثی *

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

خلاصه: ربات خودکار زیرآبی طراحی شده با فرم بدنه نوین شبه‌ماهی برای هدف بازرسی خطوط لوله و کابل زیردریا مورد ارزیابی هیدرودینامیکی قرار گرفته است. افزایش پایداری دینامیکی ربات بازرس زیرآبی علاوه بر افزایش قابلیت حفظ مسیر حرکت ربات، موجب تسهیل در کنترل رفتار دینامیکی آن در محیط پراغتشاش اعماق دریا می‌شود. پس از بیان معادلات حرکت حاکم بر وسیله، گشتاور هیدرودینامیکی وارد بر بدنه از طرف جریان سیال آب با مدل‌سازی عددی در دینامیک سیالات محاسباتی استخراج شده است. ربات به عنوان جسم صلب و جریان اطراف آن به صورت پایا و تراکم‌ناپذیر فرض شده‌است. با بیان ارتباط خطی بین گشتاور هیدرودینامیکی و سرعت زاویه‌ای جریان، ضریب هیدرودینامیکی خطی بازدارنده یا میرایی مورد نیاز محاسبه شده است. به کمک ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده استخراج شده، پایداری دینامیکی ربات حول محور طولی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت نتایج، یافته‌های پژوهش حاضر با داده‌های آزمایشگاهی بدنه متقارن محوری متعلق به دپارتمان هیدرودینامیک کشتی مرکز تحقیقات دیوید تیلور مقایسه شده است؛ یافته‌های عددی تطابق خوبی را با آزمایش نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پایداری دینامیکی رول برای ربات با فرم بدنه پیشنهادی با مقطع مثلثی در این مقاله ۱۰ برابر بیشتر از ربات‌های با فرم بدنه رایج متقارن محوری با مقطع دایروی است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۲-۰۸-۱۳۹۷
بازنگری: ۱۲-۱۰-۱۳۹۷
پذیرش: ۲۰-۱۲-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۰۵-۰۱-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
ربات خودکار زیرآبی
فرم بدنه شبه‌ماهی
پایداری دینامیکی رول
دینامیک سیالات محاسباتی
ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده

۱-مقدمه

ربات خودکار زیرآبی[1] برای اهداف مختلفی از جمله بازرسی تاسیسات دریایی و فراساحلی، بازرسی لوله‌ها و کابل‌های زیردریا، نقشه‌برداری از بستر دریا، اقیانوس‌شناسی، نمونه‌برداری، اکتشاف، نجات و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاهش مصرف انرژی هدفی است که همواره مورد توجه طراحان و سازندگان این‌گونه ربات‌ها بوده است. سرعت و پایداری دینامیکی دو مشخصه مهم هیدردینامیکی به شمار می‌آید که تابعی از فرم بدنه ربات است؛ زیرا فرم بدنه در میزان نیرو و گشتاوری که از آب به ربات وارد می‌شود، تاثیرگذار است.

در ابتدا پژوهش‌ها بر روی فرم بدنه ربات با هدف کاهش نیروی درگ[2] و در نتیجه آن افزایش سرعت انجام گرفت؛ پارسون و همکاران [۱] روشی را برای طراحی فرم‌های بدنه متقارن‌محوری[3] با حداقل نیروی درگ توسعه دادند. دو سال بعد، مایرینگ با روشی مشابه [۲] معادله‌ای را برای فرم بدنه‌های متقارن محوری با حداقل نیروی درگ ارائه داد. سپس لوتز و همکاران [۳] با استفاده از روابط نیمه‌تجربی، موقعیت نقطه گذار از رژیم جریان آرام به آشفته و مشخصات جریان در لایه مرزی آشفته را تخمین زدند و فرم جدیدی را برای بدنه‌های متقارن محوری با حداقل درگ معرفی کردند. ساده‌سازی‌های معادلات جریان اطراف بدنه برای تخمین مشخصات جریان به جهت محاسبه نیروی درگ و همچنین در نظر نگرفتن شرایط ماموریتی مختلف برای ربات‌های زیرآبی از جمله فرضیات ساده‌کننده‌ای بود که تا قبل از سال ۲۰۰۰ توسط محققان در نظر گرفته می‌شد و از این‌رو بدنه‌های پیشنهادی برای هر شرایط کاری و ماموریت‌های مختلف ربات مناسب نبودند. در سال ۲۰۰۹ آلوارز و همکاران [۴] دریافتند که فرم‌های بدنه رایج برای ربات‌های خودکار زیرآبی، در نزدیکی سطح آزاد آب (عمق کم) دارای درگ پایین نبوده و به همین علت به بهینه‌سازی فرم بدنه برای حرکت در نزدیکی سطح آزاد آب

1 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
2 Drag Force
3 Axisymmetric Bodies

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mghiasi@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

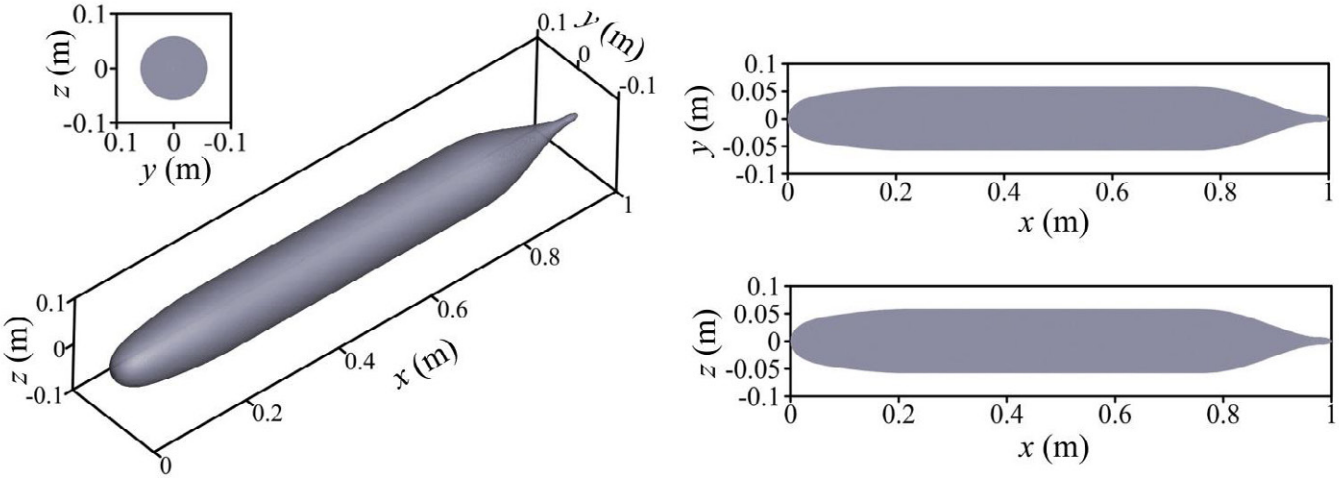
پرداختند. در ادامه محققان برای شناسایی فرم بدنه با کمترین نیروی درگ، که در دانش مهندسی دریا از آن با عنوان نیروی مقاومت[1] نیز یاد می‌شود، از طبیعت الهام گرفتند و فرم‌های بدن حیواناتی مانند دلفین [۵]، کوسه، پنگوئن و برخی ماهی‌های مدیترانه‌ای [۶] را مورد ارزیابی قرار دادند.

پژوهشگران مطالعات خود را تنها به محاسبه نیروی درگ ربات در مسیر مستقیم محدود نکردند و به جنبه‌های هیدرودینامیکی دیگر آن نیز پرداختند. به عنوان مثال، پرالت و همکاران [۸-۷]تاثیر فرم بدنه را بر روی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن و قابلیت مانورپذیری ربات زیرآبی بررسی کردند. تیاگی و همکاران [۹]نیز نیروهای عرضی هیدرودینامیکی وارد بر دو فرم بدنه مختلف را با حل معادلات رانز[2] به کمک حلگر فلوئنت محاسبه کردند. در روشی مشابه، پراوین و همکاران [۱۰] تاثیر طول بدنه را نه تنها بر روی نیروی درگ طولی بلکه بر روی نیروهای درگ عرضی نیز ارزیابی کردند. ایشان این نیروها را با استفاده از سری تیلور در قالب ضرایبی با عنوان ضرایب هیدرودینامیکی بسط دادند؛ روشی که قبلا توسط ابکوویچ [۱۱] معرفی شده‌بود. نیروهای درگ وارده بر بدنه در جهات مختلف در واقع نیروهای بازدارنده[3] یا میرایی می‌باشند که نقش تعیین‌کننده در پایداری دینامیکی ربات زیرآبی را دارند؛ زیرا بدون عامل بازدارندگی، پایداری دینامیکی هیچ سیستم دینامیکی ممکن نیست [۱۲]. به همین دلیل پراوین و همکاران [۱۰]، در کار خود ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی بازدارنده وارد بر بدنه ربات خودکار زیرآبی را ضرایب پایداری نامیدند و تغییرات این ضرایب با فرم بدنه را بررسی کردند.

همواره محاسبه عبارت‌های مربوط به بازدارندگی موجود در معادلات یک سیستم دینامیکی از جمله دشوارترین مراحل شناسایی سیستم است. زیرا این عبارت‌ها تابعی از سرعت بوده و با افزایش سرعت، ارتباط بین آن‌ها نیز غیرخطی شده و شناسایی رفتار سیستم را دشوار می‌کند [۱۳]. اهمیت این موضوع به ویژه در مورد ربات‌های زیرآبی که درون سیال آب حرکت می‌کنند، افزایش می‌یابد. محققان نشان داده‌اند که استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و معادلات رانز در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده ربات‌های خودکار زیرآبی درون جریان تراکم‌ناپذیر آب، یک ابزار مطمئن به شمار می‌آید [۲۱-۱۴]فیلیپس و همکاران [۱۴] نقش دینامیک سیالات محاسباتی را در مراحل طراحی ربات خودکار زیرآبی مورد بررسی قرار دادند. ایشان تاکید کردند که شبیه‌سازی عددی می‌تواند هزینه‌های طراحی هیدرودینامیکی ربات را به شدت کاهش دهد و همچنین به بررسی تاثیر روش عددی در تخمین پایداری ربات پرداختند و دریافتند که دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند ضرایب بازدارنده مربوط به نیروها را تا ۱۰ درصد و گشتاورها را تا ۲۰ درصد خطا تخمین بزند. واز و همکاران [۱۵] از دو حلگر مختلف برای شبیه‌سازی جریان سیال اطراف متحرک زیرآبی استفاده نمودند و تاثیر حل معادلات جریان سیال به کمک روش حل معادلات رانز و روش شبیه‌سازی گردابه‌های ادی را با هم مقایسه کردند و دریافتند که روش دوم به خصوص در مواقعی که زاویه حمله بین ربات و جریان افزایش می‌یابد و روابط موجود غیرخطی می‌شود، دقت بالاتری دارد. زنگ و همکاران [۱۶] نیز در ابتدا به تاثیر مدل‌های آشفتگی بر نتایج عددی حاصل از حل معادلات رانز پرداختند و سپس به تاثیر شبکه‌بندی دامنه حل و به خصوص پارامتر بی‌بعد فاصله اولین لایه شبکه‌بندی تا بدنه ربات پرداختند و دریافتند که مدل آشفتگی کا-امگا (اِس.اِس.تی)[4] و مقادیر ۴۰ تا ۱۰۰ برای فاصله بی‌بعد بین اولین لایه شبکه‌بندی تا بدنه در محاسبه ضرایب بازدارنده هیدرودینامیکی ربات مناسب می‌باشند. پن و همکاران [۱۷] نیز به محاسبه ضرایب بازدارنده هیدرودینامیکی ربات زیرآبی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و حل معادلات رانز پرداختند و موفق شدند با شبیه‌سازی تست مکانیزم حرکت صفحه‌ای، ضرایب بازدارنده را به روش حجم محدود و به کمک حلگر فلوئنت محاسبه کنند.

ژانگ و همکاران [۱۸] به بررسی انواع کارهای عددی انجام شده بر روی بدنه‌های مختلف متحرک‌های زیرآبی پرداختند و به طور خاص روش محاسبه ضرایب بازدارنده ربات را در تست بازوی چرخان بررسی کردند و پیشنهاداتی از جمله این‌که بهتر است شبکه‌بندی در راستای جریان دورانی انجام گیرد، ارائه دادند. لئونگ و همکاران [۱۹] نیز به بررسی عددی محاسبه ضرایب بازدارنده هیدرودینامیکی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند و تاثیر نوع شرایط مرزی انتخاب شده، شبکه‌بندی دامنه، و مدل آشفتگی در نتایج را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان نیز به کارایی مدل آشفتگی کا-امگا

1 Resistance
2 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)
3 Damping Forces
4 *k-w* (SST)



شکل ۱: فرم بدنه متقارن محوری متداول برای ربات خودکار زیرآبی (فرم بدنه سابُف)

Fig. 1. Conventional axisymmetric body for autonomous underwater vehicle (SUBOFF hull shape)

(اِس.اِس.تی) در محاسبه ضرایب بازدارنده ربات اشاره کردند. شوای و همکاران [۲۰] جریان سیال چرخشی اطراف بدنه ربات زیرآبی را به صورت عددی ارزیابی نمودند و ضرایب بازدارنده ربات را محاسبه کردند. ایشان به تاثیر مدل‌های آشفتگی در مدل‌سازی دورزدن ربات پرداختند و روش کا-امگا (اِس.اِس.تی) را در محاسبه ضرایب بازدارنده مناسب دانستند. هنریار و همکاران [۲۲-۲۱] به تاثیر فرم هندسی بدنه ربات خودکار زیرآبی ابتدا بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و سپس بر روی مانورپذیری آن پرداختند. ایشان دو مانور دایره‌چرخش و زیگزاگ را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. همچنین اشاره کردند که بخش‌های مختلف هندسه بدنه ربات می‌تواند تاثیر متفاوتی در مانورپذیری و پایداری دینامیکی آن داشته باشد. منصور زاده و همکاران [۲۳] پایداری دینامیکی در صفحه حرکت افقی یا اصطلاحا پایداری در مسیر مستقیم را برای یک ربات خودکار زیرآبی با فرم بدنه متقارن محوری به کمک شبیه‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند و کار خود را با نتایج آزمایشگاهی در حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان مقایسه کردند. ایشان دینامیک سیالات محاسباتی را به عنوان ابزار مناسب در بررسی پایداری دینامیکی ربات خودکار زیرآبی دانستند. گشتاسبی‌راد و همکاران [۲۴] به بررسی آزمایشگاهی اثر فرم دُم بر روی ضرایب بازدارنده یا میرایی آیرودینامیکی مدل هواپیما پرداختند و محدوده پایداری دینامیکی هواپیما را نسبت به زاویه حمله بررسی کردند.

در مقاله حاضر، با الهام‌گیری از یک نوع ماهی خاص، فرم بدنه شبه‌ماهی برای ربات خودکار زیرآبی با هدف بازرسی خطوط لوله و کابل زیردریا طراحی شده است. پس از ارزیابی پایداری هیدرودینامیکی در مسیر مستقیم یا در صفحه حرکت افقی برای ربات با فرم بدنه شبه‌ماهی [۲۵] و پایداری قابل توجه آن نسبت به بدنه‌های رایج متقارن محوری با مقطع دایروی، در مقاله حاضر پایداری دینامیکی رول بررسی شده است. ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده با استفاده از مدل‌سازی عددی جریان اطراف ربات در دینامیک سیالات محاسباتی و تغییرات گشتاور هیدرودینامیکی بر حسب سرعت زاویه‌ای محاسبه شده است. برای محاسبه این ضریب، آزمایش چرخش حول محور طولی به صورت عددی مدل شده است که برای محاسبه ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، آنالیز استقلال شبکه و همچنین مقایسه یافته‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی فرم بدنه رایج متقارن‌محوری، انجام گرفته است. برای حل عددی معادلات جریان سیال از روش گسسته‌سازی حجم محدود و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از روش مدل‌سازی کا-امگا (اِس.اِس.تی) با استفاده از حلگر سی‌اف‌ایکس[1] استفاده شده است. در پایان پایداری دینامیکی حول محور طولی برای ربات با فرم بدنه پیشنهادی در این مقاله با فرم‌های بدنه رایج مقایسه شده است.

۲- فرم بدنه پیشنهادی

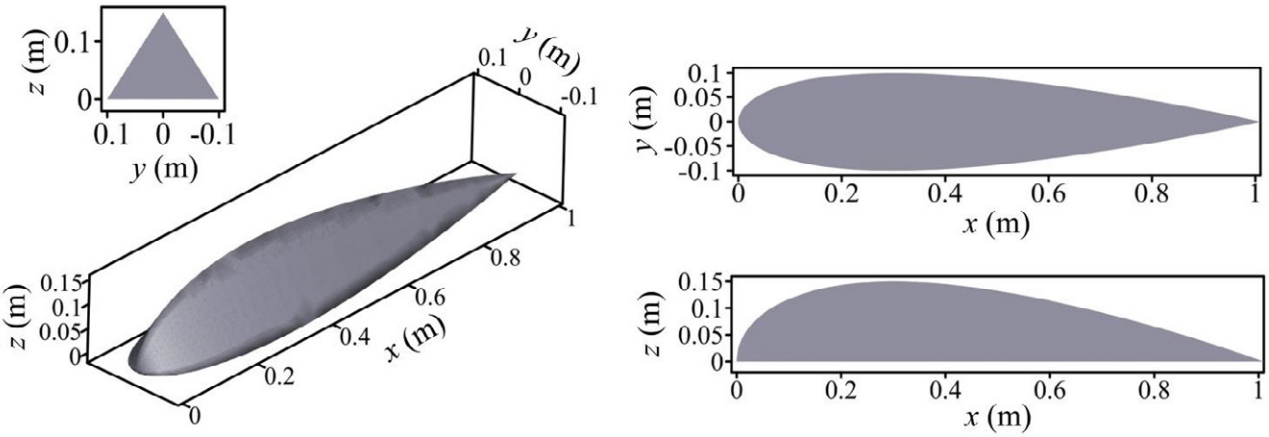
مقطع دایره‌ای شکل، فرمی است که از دیرباز همواره برای بدنه زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته‌است؛ به طوری‌که قسمت

1 CFX

جدول ۱: مشخصات هندسی بدنه‌های مورد بررسی

Table 1. Geometric characteristics for case studies of body forms

عنوان بدنه	حجم $V(\mathrm{m}^3)$	طول $l(\mathrm{m})$	فاصله مرکز حجم از دماغه $l_{CB}(\mathrm{m})$	بیشترین عرض $b(\mathrm{m})$	بیشترین ارتفاع $d(\mathrm{m})$
متقارن محوری (سابُف)	۰/۰۰۸	۱/۰۰	۰/٤٦١	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷
شبه‌ماهی (زاینده‌رود)	۰/۰۰۸	۱/۰۰	۰/۳۵۸	۰/۲۰۰	۰/۱۵۰



شکل ۲: فرم بدنه پیشنهادی برای ربات خودکار زیرآبی برای بازرسی خطوط لوله و کابل زیردریا با الهام‌گیری از گربه‌ماهی

Fig. 2. Proposed hull shape for subsea pipeline and cable survey autonomous underwater vehicle inspired by catfish

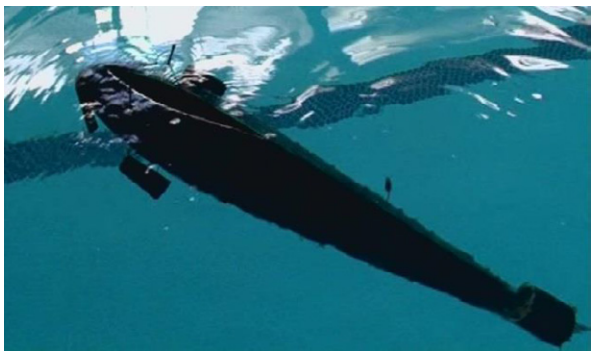
میانی بیشتر زیردریایی‌ها، کاملا به شکل استوانه‌ای می‌باشد. علت اصلی استفاده از چنین فرم بدنه‌ای این است که دایره، مقطع بسیار مناسبی برای تحمل فشار هیدرواستاتیک وارده از طرف آب بر روی سازه بدنه است و با توجه به این‌که زیردریایی‌ها برای اعماق بسیار بالا طراحی می‌شوند، این فرم بدنه از لحاظ استحکام سازه‌ای بسیار مناسب است. ربات‌های خودکار زیرآبی اولیه نیز از این قاعده مستثنی نبوده و به تبعیت از زیردریایی، دارای فرم بدنه دایره‌ای شکل بودند. البته امروزه نیز بسیاری از ربات‌های خودکار زیرآبی دارای فرم بدنه با مقطع دایره‌ای که از آن با عنوان بدنه متقارن محوری نیز یاد می‌شود، می‌باشند. از این‌رو این فرم بدنه به یک بدنه متداول و رایج برای ربات‌های خودکار زیرآبی تبدیل شده است. شکل ۱ فرم بدنه متقارن محوری رایج برای ربات‌های خودکار زیرآبی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقطع عرضی این بدنه کاملا به صورت دایره می‌باشد. این فرم بدنه با عنوان سابُف[1]، متعلق به دپارتمان هیدرودینامیک کشتی مرکز تحقیقات دیوید تیلور ایالات متحده [۲۶] می‌باشد و با توجه به این‌که داده‌های آزمایشگاهی آن موجود است، برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج عددی از این فرم بدنه استفاده شده است.

با پیشرفت تکنولوژی و به‌ویژه روش‌های ساخت و استفاده از جنس‌های پیشرفته (فولادها و آلومینیوم‌های دریایی با آلیاژهای خاص، کامپوزیت‌ها و ...) در بدنه زیردریایی‌ها، امروزه از فرم‌های بدنه نوین و جدیدی برای زیردریایی‌ها استفاده می‌شود به طوری‌که حتی زیردریایی‌های تفریحی پیشرفته نیز با فرمی شبیه به ماهی‌ها و موجودات زیرآبی طراحی و ساخته می‌شوند؛ و لزوما نیازی به استفاده از مقطع دایره‌ای برای تحمل فشارهای هیدرواستاتیک نیست و فرم‌های دیگر نیز با توجه به جنس ماده مورد استفاده در ساخت بدنه، قادر به تحمل این فشارها می‌باشند. این پیشرفت‌ها باعث شده است تا طراحان، به غیر از در نظر گرفتن استحکام سازه‌ای، فرم‌های بدنه را با در نظر گرفتن الزامات دیگری از جمله رسیدن به پایداری دینامیکی، مانورپذیری و سرعت مناسب طراحی کنند.

با الهام‌گیری از یک نوع ماهی خاص با نام گربه‌ماهی[2]، فرم بدنه‌ای مطابق با آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای ربات

1 SUBOFF

2 Catfish, Hypostomus



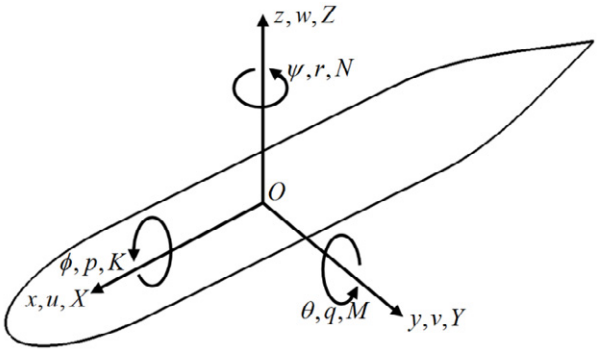
شکل ۳: گربه‌ماهی (راست)[۲۹]، ربات خودکار زیرآبی شبه‌ماهی زاینده‌رود (چپ)

Fig. 3. Catfish (right) [29], Zayandeh Rud autonomous underwater vehicle (left)

خودکار زیرآبی با هدف بازرسی خطوط لوله و کابل زیردریا پیشنهاد شده است. مطالعه رفتار گربه ماهی نشان می‌دهد که این نوع ماهی در بستر رودخانه با وجود جریان‌های رودخانه‌ای با سرعت بالا، به راحتی زندگی و از جلبک‌های موجود در لا به‌لای سنگ‌های قرار گرفته در بستر رودخانه تغذیه می‌کند [۲۸–۲۷]. بنابراین در مقاله حاضر، ایده طراحی فرم بدنه برای ربات خودکار زیرآبی با الگوگیری از گربه‌ماهی با توجه به اهداف مشترک به وجود آمد. همان‌طورکه گربه‌ماهی بر روی بستر رودخانه و دریا به دنبال جلبک‌های موجود بر روی سنگ‌های قرار گرفته در کف دریا برای تغذیه می‌گردد، ربات خودکار زیرآبی نیز وظیفه مشابه جستجو در بستر دریا در میان لوله یا کابل‌های زیردریا برای بازرسی را دارا می‌باشد. در واقع به عنوان مثال می‌توان چنین گفت که پیداکردن نشتی لوله در بستر دریا برای ربات خودکار زیرآبی همانند پیدا کردن جلبک (غذا) بر روی سنگ‌ها برای گربه‌ماهی می‌باشد. در طراحی فرم بدنه این ربات از پروفیل‌های استاندارد ناکا[1] استفاده شده است.

مشخصات هندسی هر دو فرم بدنه متقارن‌محوری و شبه‌ماهی در جدول ۱ آمده‌است. فرم بدنه شبه‌ماهی پیشنهاد شده در مقاله حاضر برای ربات خودکار زیرآبی با هدف بازرسی خطوط لوله و کابل زیردریا، به افتخار مهمترین رودخانه فلات مرکزی ایران که پل‌های تاریخی متعددی بر روی آن قرار دارد، زاینده‌رود[2] نامیده شده است؛ به امید روزی که این رودخانه به روزهای پُر آب خود بازگردد. همان‌طورکه در جدول ۱ نشان داده شده است، طول و حجم هر دو بدنه ثابت و برابر در نظر گرفته شده تا بتوان تنها تاثیر فرم بدنه را مورد بررسی هیدرودینامیکی قرار داد. زیرا با ثابت نگه‌داشتن طول و حجم بدنه‌ها

1 NACA
2 ZRAUV (Zayandeh Rud Autonomous Underwater Vehicle)



شکل ۴: دستگاه مختصات متصل به بدنه برای ربات خودکار زیرآبی

Fig. 4. Body attached coordinate system for autonomous underwater vehicle

به ترتیب عدد رینولدز و میزان نیروی شناوری (ارشمیدس) برای هر دو فرم بدنه که پارامترهای مهمی به شمار می‌آیند، ثابت می‌ماند و تاثیری در نتایج نخواهد داشت. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که فرم بدنه متقارن محوری هم نسبت به صفحه xy و هم نسبت به صفحه xz متقارن است، اما مطابق با شکل ۲ فرم بدنه شبه‌ماهی تنها نسبت به صفحه xz متقارن است و این بدنه نسبت به صفحه xy نامتقارن است. مقطع عرضی فرم بدنه شبه‌ماهی با الهام گیری از گربه‌ماهی، مثلثی شکل است و دارای کف صاف می‌باشد که این موضوع نزدیک شدن به بستر دریا و حرکت در مجاورت خطوط لوله یا کابل زیردریا را فراهم می‌کند. شکل ۳ ربات خودکار زیرآبی زاینده‌رود را به همراه گربه‌ماهی نشان می‌دهد.

۳- مدل ریاضی

با مطالعه الگوی رفتاری گربه‌ماهی، این حدس می‌رود که این ماهی با فرم بدنه خاص خود دارای پایداری دینامیکی بالایی است. برای اثبات این ادعا نیاز است که ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده را

که نقش تعیین‌کننده در پایداری دینامیکی دارد، محاسبه کرد. معادله حرکت خطی برای ربات خودکار زیرآبی در سیستم مختصات کارتزین با محورهای مختصات x y و z مطابق با شکل ۴، حول محور طولی یا رول[1] (حرکت زاویه‌ای حول محور طولی x) در حالتی که مرکز مختصات بر روی مرکز جرم ربات قرار دارد، به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\left(I_{xx}-K_{\dot{p}}\right)\dot{p}=K_p p+K_\phi \phi \qquad (۱)$$

که در آن (x,y,z) محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتزین، (X,Y,Z) نیروهای وارد بر ربات به ترتیب در راستای محورهای (x,y,z)، (K,M,N) گشتاورهای وارد بر ربات به ترتیب حول محورهای (x,y,z)، (u,v,w) و $(\dot{u},\dot{v},\dot{w})$ سرعت‌ها و شتاب‌های خطی و نیز (p,q,r) و $(\dot{p},\dot{q},\dot{r})$ سرعت‌ها و شتاب‌های زاویه‌ای به ترتیب در راستا و حول محورهای مختصات (x,y,z) و همچنین (ϕ,θ,ψ) زاویه‌های حول محورهای مختصات (x,y,z) می‌باشد. m جرم ربات و I_{xx} ممان اینرسی جرمی حول محور طولی x می‌باشد. ضریب K_p ضریب بازدارنده و مشخص‌کننده تغییرات گشتاور بر حسب سرعت زاویه‌ای است. ضریب $K_{\dot{p}}$ نیز معرف ضرایب جرم‌اضافی و مشخص‌کننده تغییرات گشتاور بر حسب شتاب زاویه‌ای است. ضریب K_ϕ نیز ضریب بازگرداننده و نشان‌دهنده تغییرات گشتاور بر حسب زاویه حول محور x یا همان زاویه رول است.

برای بررسی پایداری دینامیکی رول از معیار روث هرویث[2] استفاده شده و شرط پایداری برای معادله حرکت به صورت زیر به دست می‌آید [۳۰]:

$$-K_p>0 \qquad (۲)$$

رابطه (۲) شرط پایداری رابطه (۱) می‌باشد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، ضرایب بازدارنده نقش مهمی در پایداری معادلات حرکت ایفا می‌کنند، به گونه‌ای که بدون این ضرایب، پایداری سیستم مکانیکی امکان‌پذیر نیست [۱۳]. بنابراین برای بررسی پایداری در راستای رول (رابطه (۲)) باید ضریب بازدارنده هیدرودینامیکی K_p بررسی شود. برای محاسبه این ضریب از شبیه‌سازی عددی تست آزمایشگاهی چرخش ربات حول محور طولی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است.

1 Roll
2 Routh-Hurwitz Stability Criterion

۴-شبیه‌سازی عددی

در این بخش مدل‌سازی عددی آزمایش مورد نیاز برای محاسبه ضریب بازدارنده (یا ضریب میرایی) ربات شامل معادلات حرکت حاکم بر سیال، مدل‌سازی آشفتگی، دامنه محاسباتی، آنالیز استقلال نتایج از شبکه‌بندی دامنه و نیز اعتبارسنجی نتایج عددی با مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. همچنین برای حل عددی از حلگر سی‌اف‌ایکس مبتنی بر روش حجم محدود استفاده شده است.

۴-۱-معادلات حرکت سیال

برای محاسبه ضریب بازدارنده K_p نیاز است که ارتباط بین گشتاور وارده از طرف سیال (آب) به ربات، با سرعت زاویه‌ای ربات به دست آید. با فرض جریان سیال آب به عنوان یک جریان تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی سیال و اندازه‌حرکت آن در فرم اندیسی به ترتیب به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0,\quad i=1,2,3 \qquad (۳)$$

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\rho\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u_j u_i\right)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\mu s_{ij}\right),\quad i,j=1,2,3 \qquad (۴)$$

که در آن u_i,u_j $(i,j=۱,۲,۳)$ مولفه‌های سرعت سیال در سیستم مختصات کارتزین، x_i,x_j $(i,j=۱,۲,۳)$ مولفه‌های بردار مکان در سیستم مختصات کارتزین، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، ρ چگالی سیال، و $s_{ij}=(۱/۲)\left(\partial u_i/\partial x_j+\partial u_j/\partial x_i\right)$ تانسور نرخ کرنش می‌باشد. دومین عبارت در سمت راست رابطه (۴) مربوط به نیروهای ویسکوز سیال می‌باشد که عامل بازدارندگی حرکت ربات در آب بوده و نقش اصلی در تعیین مقدار ضریب بازدارنده و پایداری دینامیکی ربات را دارد.

۴-۲- مدل‌سازی آشفتگی

با توجه به بیشتر بودن عدد رینولدز از میزان رینولدز بحرانی (۵×۱۰^۵) در جریان خارجی، رژیم جریان حاکم بر مسئله از نوع آشفته است؛ بنابراین خواص میدان جریان تابعی نوسانی از زمان و مکان می‌باشند. با استفاده از روش متوسط‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس[3]، به عبارت مربوط به نیروهای ویسکوز در رابطه (۴)،

3 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

$\partial/\partial x_j\left(2\mu s_{ij}-\rho\overline{u_i'u_j'}\right)$، عبارت تانسور تنش رینولدز $\tau_{ij}=\overline{u_i'u_j'}$ که تابعی از مولفه‌های نوسانی سرعت است، اضافه می‌شود. همچنین مابقی متغیرهای میدان جریان در دیگر عبارت‌های رابطه (۴) شامل فشار و سرعت، بر اساس میزان متوسط فرض می‌شود. برای مدل‌سازی تانسور تنش رینولدز از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا-امگا (اِس.اِس.تی) استفاده شده است. در این روش، تانسور تنش رینولدز با حل دو معادله انتقال یکی برای انرژی جنبشی آشفتگی k و دیگری برای فرکانس آشفتگی ω به صورت روابط (۵) و (۶) مدل می‌شود.

$$\frac{\partial\rho k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho k u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k \tag{۵}$$

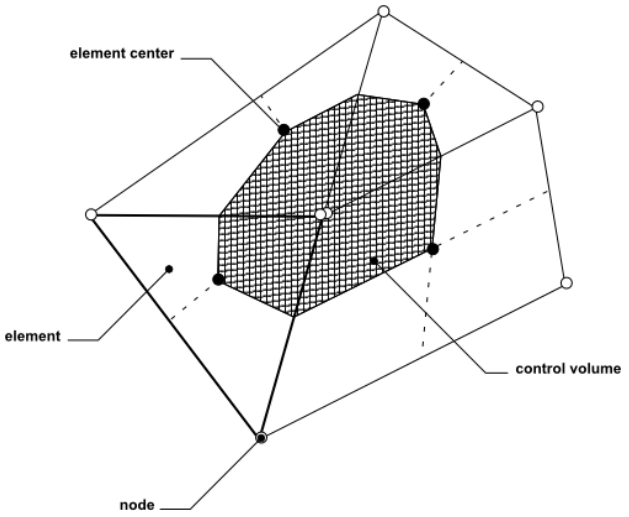
$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\omega u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\gamma_\omega\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega \tag{۶}$$

که در آن G_k و G_ω به ترتیب معرف تولید k و ω، و Y_k و Y_ω به ترتیب نشان‌دهنده هدررفت k و ω می‌باشد. D_ω عبارت پخش متقاطع[1] و γ_k و γ_ω به ترتیب بیانگر پخش موثر k و ω می‌باشد. مدل آشفتگی کا-امگا (اِس.اِس.تی) در پیش‌بینی جدایش جریان تحت شرایط گرادیان فشار مخالف با مد نظر دادن اثرات انتقال در فرمول‌بندی ویسکوزیته ادی[2]، از دقت مناسبی برخوردار است. این مدل، به نوعی ترکیبی از دو مدل $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ نیز می‌باشد به این صورت که در نواحی مجاور دیواره و داخل لایه مرزی از مدل $k-\omega$ و در نواحی دور از دیواره و عدد رینولدز بالا از مدل $k-\varepsilon$ بهره می‌برد. همچنین در این مدل آشفتگی فرمول‌بندی ویسکوزیته آشفتگی برای به حساب آوردن اثرات انتقال تنش‌های برشی اصلی آشفتگی نسبت به مدل $k-\omega$ اصلاح شده است.

۳-۴-روش های عددی استفاده شده در حل معادلات

همان‌طورکه پیش از این بیان شد، در مقاله حاضر از حلگر سی‌اف‌ایکس مربوط به نرم‌افزار انسیس[3] برای حل معادلات حاکم

1 Cross-Diffusion
2 Eddy-Viscosity
3 ANSYS-CFX



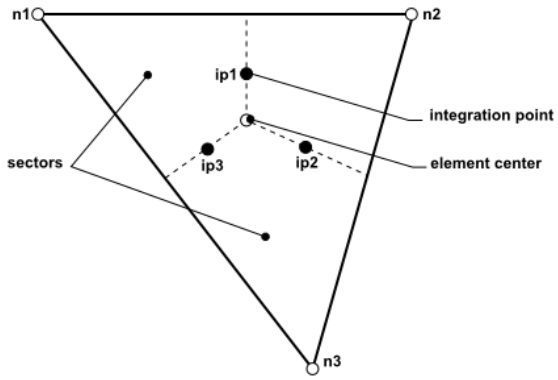
شکل ۵: حجم کنترل تعریف شده درون المان[۳۱]

Fig. 5. Control volume defined inside element [31]

بر جریان سیال استفاده شده است. در این حلگر از روش حجم محدود مبتنی بر المان[4] برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس حاکم بر جریان سیال استفاده می‌شود. بنابراین دامنه محاسباتی بر اساس حجم‌های محدود، که برای بیان فرم بقایی معادلات جرم و اندازه‌حرکت سیال مناسب است، شبکه‌بندی می‌شود. شکل ۵ حجم کنترل تعریف شده درون المان را نشان می‌دهد. همه متغیرهای حل شده و خاصیت‌های سیال در نقاط گره[5] ذخیره می‌شوند. اطراف هر گره، یک حجم کنترل (ناحیه هاشور خورده) با استفاده از روش دوگانه میانی[6] (در این روش میانه لبه‌های المان‌ها و مرکز المان‌ها به هم متصل می‌شوند) ایجاد شده است.

برای بیان بهتر روش حجم محدود، باید از معادلات بقای جرم (رابطه (۳)) و اندازه حرکت (رابطه (۴)) سیال روی هر حجم کنترل، انتگرال‌گیری نمود. سپس با استفاده از تئوری دیورژانس گاوس[7]، انتگرال‌های حجمی شامل عملگرهای دیورژانس و گرادیان به انتگرال‌های سطحی تبدیل می‌شود. در صورتی‌که حجم کنترل نسبت به زمان تغییر شکل ندهد، مشتق‌های زمانی را می‌توان به بیرون از انتگرال‌های حجمی انتقال داد و در این صورت معادلات بقای جرم (رابطه (۳)) و اندازه حرکت (رابطه (۴)) سیال را در فرم انتگرالی

4 Element-Based Finite Volume Method
5 Node
6 Median Dual
7 Gauss' Divergence Theorem



شکل ۶: المان شبکه [۳۱]

Fig 6. Grid element [31]

می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود.

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV + \int_s \rho u_j dn_j = 0 \qquad (۷)$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho u_i dV + \int_s \rho u_j u_i dn_j = -\int_s P dn_j + \int_s \mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)dn_j + \int_V S_{u_i} dV \qquad (۸)$$

که در آن V و s به ترتیب معرف ناحیه‌های حجمی و سطحی انتگرال، و dn_j مولفه کارتزین دیفرانسیلی بردار عمود بر سطح به طرف بیرون می‌باشد. S_{u_i} و μ_{eff} نیز به ترتیب معرف عبارت مربوط به منبع و ویسکوزیته دینامیکی موثر با در نظر گرفتن ویسکوزیته آشفتگی است. انتگرال‌های حجمی نشان‌دهنده عبارت‌های انباشتگی و انتگرال‌های سطحی نشان‌دهنده مجموع شارها می‌باشند. باید دقت نمود که برای مواقعی که نیاز است که شبکه‌بندی تغییر فرم دهد، این معادلات را باید کمی تغییر داد. اما به دلیل اینکه در مقاله حاضر مسئله مورد بررسی یک مسئله پایا می‌باشد و جسم در مدل‌سازی متحرک نیست، نیازی به استفاده از شبکه متحرک نمی‌باشد.

گام بعدی در الگوریتم عددی گسسته‌سازی انتگرال‌های حجمی و سطحی روابط (۷) و (۸) می‌باشد. همان‌طورکه در شکل ۶ نشان داده شده است، انتگرال‌های حجمی درون هر قطاع المان[1] گسسته‌سازی می‌شوند و به حجم کنترلی که قطاع المان به آن تعلق دارد، جمع می‌شوند. انتگرال‌های سطحی در نقاط انتگرالی[2] که در مرکز هر بخش سطح[3] درون المان قرار دارند، گسسته‌سازی می‌شوند و سپس به حجم‌های کنترل مجاور خود توزیع می‌شوند. از آنجایی‌که انتگرال‌های سطحی برای حجم‌های کنترل مجاور نقاط انتگرالی، برابر و در جهت مخالف می‌باشند، فرم بقایی انتگرال‌های سطحی به صورت محلی تضمین می‌شود.

پس از گسسته‌سازی انتگرال‌های سطحی و حجمی، معادلات انتگرالی (۷) و (۸) به ترتیب به صورت روابط (۹) و (۱۰) به دست می‌آیند.

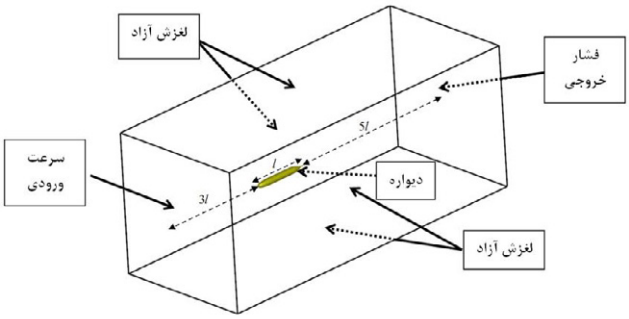
$$V\left(\frac{\rho-\rho^0}{\Delta t}\right)+\sum_{ip}\dot{m}_{ip}=0 \qquad (۹)$$

$$V\left(\frac{\rho u_i-\rho^0 u_i^0}{\Delta t}\right)+\sum_{ip}\dot{m}_{ip}\left(u_i\right)_{ip}=\sum_{ip}\left(P\Delta n_i\right)_{ip}+\sum_{ip}\left(\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\Delta n_j\right)_{in}+\bar{S}_{u_i}V \qquad (۱۰)$$

که در آن $\dot{m}_{ip}=\left(\rho u_j \Delta n_j\right)_{ip}$ شار جرمی، V حجم کنترل، Δt گام زمانی، Δn_j بردار عمود بر سطح به طرف بیرون گسسته شده، زیرنویس ip نشان‌دهنده انجام محاسبات در نقطه انتگرالی می‌باشد. عملیات جمع بر روی همه نقاط انتگرالی حجم کنترل انجام شده است. بالا نویس ^{0} به زمان قبلی اشاره دارد. باید توجه نمود که رویه اولری پس‌رو مرتبه اول[4] در این معادلات فرض شده است، اگرچه برای مسائل ناپایا و گذرا، رویه مرتبه دوم می‌تواند دقت بالاتری به دست دهد.

همان‌طورکه پیش از این بیان شد، میدان‌های حل (مانند میدان سرعت و فشار) و دیگر خاصیت‌های سیال در نقاط گره شبکه ذخیره می‌شوند. با این وجود، برای ارزیابی بسیاری از عبارت‌ها، میدان حل یا گرادیان‌های حل باید در نقاط انتگرالی تخمین زده شوند. در حلگر مورد استفاده در مقاله حاضر از توابع شکل المان محدود[5] برای این تخمین‌ها استفاده می‌شود. مقدار تابع شکل با توجه به نوع المان مورد نظر متغیر است. در این مقاله از المان‌های چهاروجهی، منشوری و هرمی[6] استفاده شده است که هر گره در هر یک از این المان‌ها، تابع شکل مخصوص به خود را دارد. عبارت مربوط به شتاب‌های جابجایی[7] جریان سیال، به مقادیر حل در نقاط انتگرالی نیاز دارد که توسط نقاط گره تخمین زده می‌شود. در اینجا از رویه رزولوشن بالا[8] برای

1 Element Sector
2 Integration Points (*ip*)
3 Surface Segment
4 First Order Backward Euler scheme
5 Finite Element Shape Functions
6 Tetrahedrons, Prisms, and Pyramids
7 Advection Term
8 High Resolution Scheme



شکل ۷: دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی آزمون چرخش حول محور طولی

Fig. 7. Computational domain for the numerical simulation of the axial rotating test

تخمین عبارت جابجایی استفاده شده است. برای ارزیابی مشتق‌های مکانی عبارت‌های مربوط به پخش[1] نیز با الگوبرداری از دیدگاه المان محدود استاندارد، از توابع شکل استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از شبکه هم‌مکان[2]، به‌گونه‌ای که حجم‌های کنترل برای همه معادلات انتقال برابر می‌باشند، برای حل معادله کوپل سرعت-فشار و روش ری و چو[3] برای گسسته‌سازی جریان‌های جرمی به منظور جلوگیری از دی‌کوپله شدن[4] میدان فشار استفاده شده است. در نهایت معادلات بقایی گسسته شده، مجموعه‌ای از معادلات جبری را تشکیل می‌دهند که با به کارگیری روش حجم محدود بر روی همه المان‌های دامنه به دست آمده‌اند. روش حل معادلات جبری به دست آمده به این صورت است که معادلات غیرخطی، خطی شده و در ماتریس حل قرار داده می‌شوند. پس از تولید ضرایب سیستم معادلات خطی شده، پاسخ‌ها با استفاده از روش چندشبکه‌ای جبری[5] به دست می‌آید.

۴-۴-دامنه محاسباتی و استقلال نتایج از شبکه‌بندی

برای تعیین ضریب بازدارنده یا میرایی ربات به شبیه‌سازی عددی آزمایش متداول چرخش حول محور طولی برای ربات‌های زیرآبی پرداخته‌شده است. برای شبیه‌سازی این آزمایش در دینامیک سیالات محاسباتی، ربات ثابت، اما سیال در جریان می‌باشد. دامنه محاسباتی همان‌طورکه در شکل ۷ نشان داده شده است، به صورت مکعب‌مستطیل است. در شبیه‌سازی آزمون چرخش ربات حول محور طولی، ربات ثابت، و جریان آب با سرعت زاویه‌ای ثابت p حول بدنه ربات دوران می‌کند و گشتاور وارد از طرف آب به ربات K حول محور طولی به دست می‌آید و ضریب بازدارنده $K_p = \partial K/\partial p\big|_{p=0}$ را می‌توان محاسبه کرد.

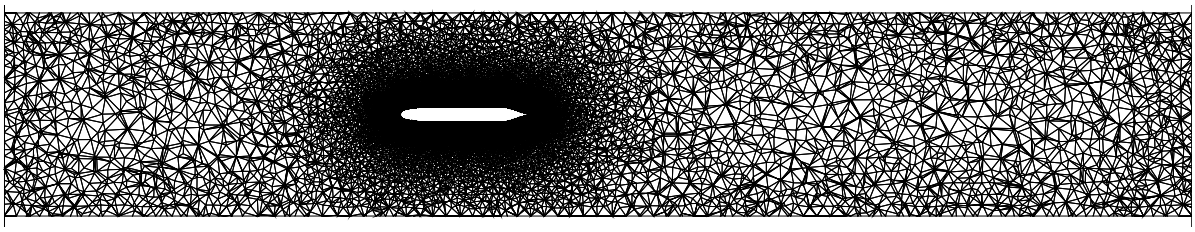
شرایط مرزی نیز همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، در مرز ورودی، سرعت خطی جریان (برابر با صفر) و در مرز خروجی، فشار تعیین شده است. بدنه ربات نیز به عنوان دیواره با هر دو شرط عدم نفوذ و عدم لغزش مشخص شده است. سایر جداره‌ها نیز معادل با دیواره لغزش آزاد فرض شده است که تنها شرط عدم نفوذ بر روی آن برقرار است. همچنین، سرعت زاویه‌ای ثابت p نیز حول محور طولی به میدان جریان اعمال شده است. جریان نیز به صورت پایا و تراکم‌ناپذیر فرض شده است. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی به صورت شبکه بی‌سازمان[6] مطابق با شکل ۸ انجام شده است. برای بهتر مدل کردن اثرات ویسکوزیته که نقش مهمی در میراکنندگی ربات دارا می‌باشد، از شبکه‌بندی منشوری با تراکم بیشتر در ناحیه مجاور بدنه که لایه‌مرزی را در بر می‌گیرد، استفاده شده است. این ناحیه همراه با شبکه‌بندی آن برای هر دو بدنه ربات زاینده‌رود و سابُف در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است.

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی، تعداد مش‌های اطراف بدنه درپنج وضعیت از درشت به ریز بررسی شده است که تعداد المان‌ها در حالت بسیار ریز همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است به ۶ میلیون المان نیز می‌رسد. شبکه‌بندی این پنج وضعیت به گونه‌ای است که فاصله بین اولین لایه شبکه‌بندی تا دیواره برای همه حالت‌ها ثابت است. شکل ۱۰ تعداد المان‌های دامنه محاسباتی را بر حسب میزان کمترین فشار سیال اطراف بدنه ربات ارائه می‌دهد. مطابق شکل، درصد اختلاف شبکه‌بندی چهارم با ریزترین شبکه کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد و از این‌رو برای کاهش زمان محاسبات، شبکه‌بندی چهارم با حدود ۴ میلیون المان برای ادامه محاسبات انتخاب شد.

۵-۴-اعتبارسنجی نتایج

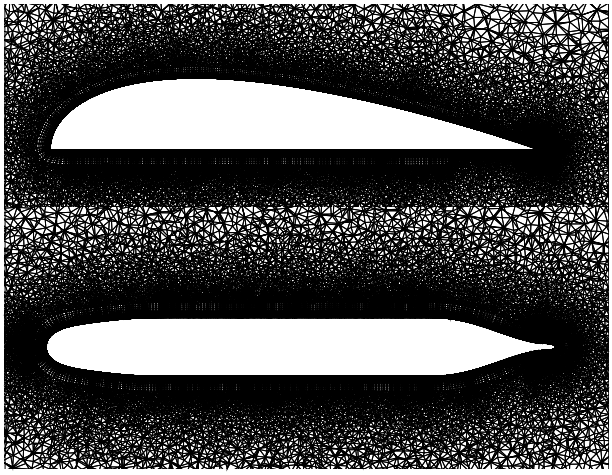
برای صحه‌گذاری بر نتایج حاصل از آزمایشگاه مجازی و عددی تولید شده برای بررسی پایداری دینامیکی ربات در مقاله حاضر،

1 Diffusion
2 Co-Located (Non-Staggered) Grid
3 Rhie and Chow
4 Decoupling
5 Algebraic Multigrid Method
6 Unstructured Mesh



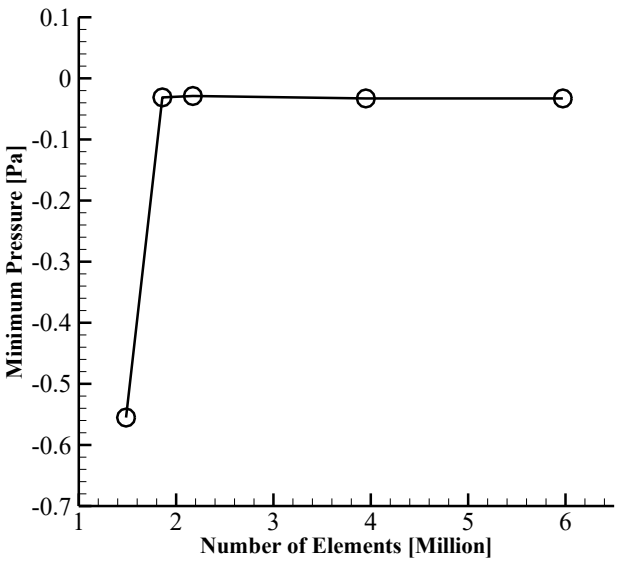
شکل ۸: شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

Fig 8. Grid generated for the computational domain



شکل ۹: شبکه منشوری در لایه مرزی مجاور بدنه و شبکه تتراهدران دور از بدنه زاینده‌رود (بالا)، سابُف (پایین)

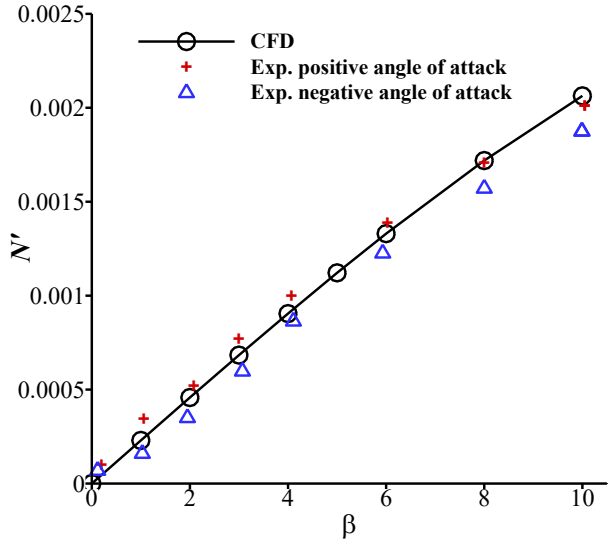
Fig. 9. Prismatic mesh in the boundary layer adjacent to the hull and tetrahedron mesh far from ZRAUV (up), SUBOFF (down)



شکل ۱۰: بررسی استقلال مقدار کمترین فشار اطراف بدنه از تعداد المان های مورد استفاده در شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

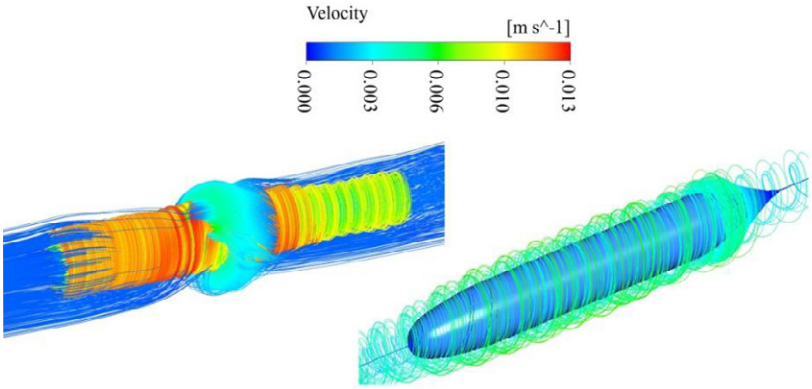
Fig. 10. Mesh study independency of the minimum pressure around body from the number of elements in the computational domain

یافته‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی رادی [۳۲] از دپارتمان هیدرودینامیک کشتی مرکز تحقیقات دیوید تیلور که مربوط به بدنه سابُف می‌باشد، مقایسه شده است. البته نتایج آزمایشگاهی مربوط به گشتاور حول محور عمودی (محور z) ربات می‌باشد که با توجه به ماهیت مشابه آن با گشتاور حول محور طولی (محور x) این اعتبارسنجی منطقی به نظر می‌رسد؛ ضمن این‌که ابعاد دامنه محاسباتی و تعداد مش‌های آن ثابت است. در آزمایش رادی [۳۲] بدنه سابف با زاویه حمله β درون حوضچه آب کشیده شد و میزان گشتاور وارد بر آن حول محور عمودی اندازه‌گیری و نتایج آزمایش به صورت بی بعد شده $N' = N/\left(۰/۵\rho U^2 l^3\right)$ برای زاویه‌های حمله مثبت و منفی مطابق با شکل ۱۱ به دست آمد. U سرعت ثابت در راستای محور طولی است. نتایج عددی گشتاور محاسباتی در مقاله حاضر نیز به‌گونه‌ای به‌دست آمده که بدنه ثابت و سیال پیرامون آن در جریان می‌باشد. این نتایج نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده



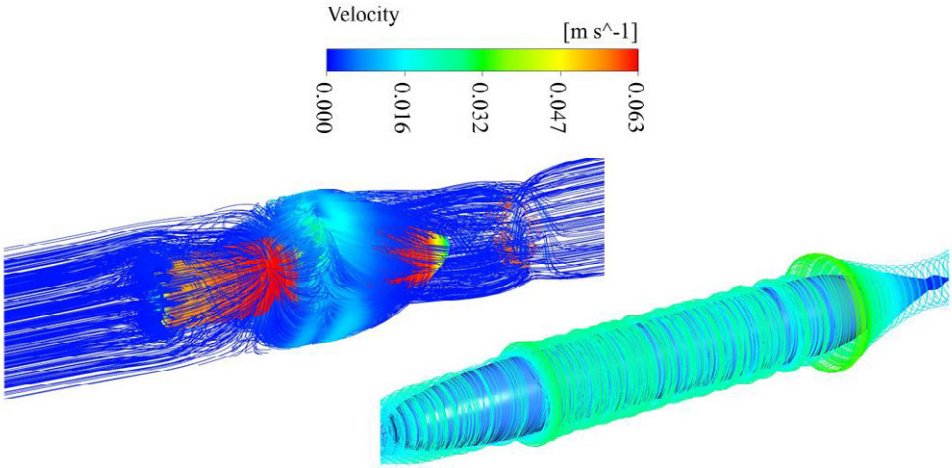
شکل ۱۱: مقایسه گشتاور محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی برای بدنه سابُف

Fig. 11. Numerical results of the moment in comparison with experiments for SUBOFF body



شکل ۱۲: خطوط جریان اطراف بدنه سابف (راست) و زاینده‌رود (چپ) با سرعت زاویه ای ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه

Fig. 12. Streamlines around SUBOFF (right) and ZRAUV (left) with angular velocity of 0.017 rad/s



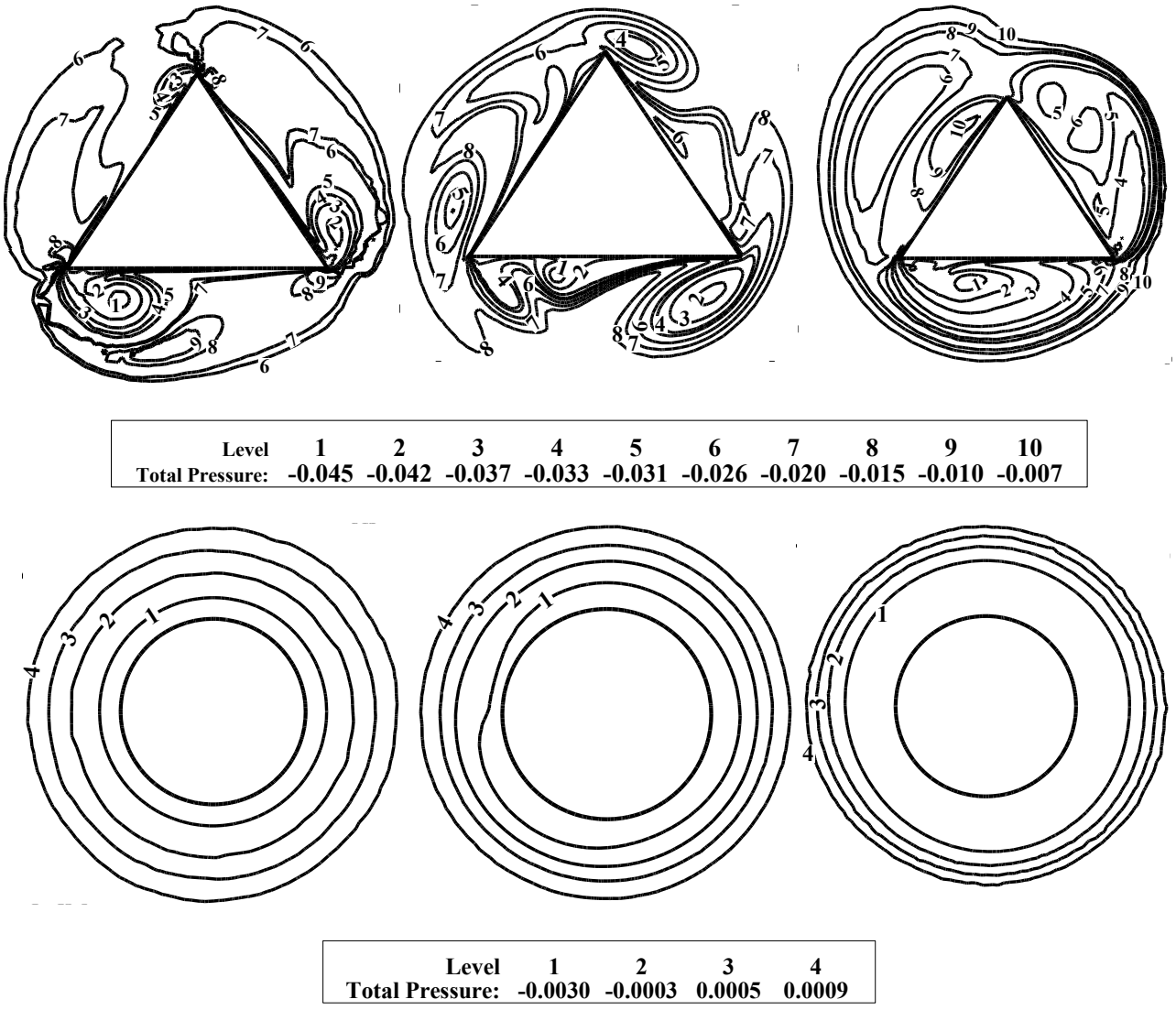
شکل ۱۳: خطوط جریان اطراف بدنه سابف (راست) و زاینده‌رود (چپ) با سرعت زاویه ای ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه

Fig. 13. Streamlines around SUBOFF (right) and ZRAUV (left) with the angular velocity of 0.087 rad/s

است. یافته‌های عددی نشان می‌دهد که میزان خطای محاسباتی برای گشتاور نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای مقدار بیشینه ۱۱ درصد می‌باشد که تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌تواند ناشی از دو نوع خطای آزمایشگاهی و عددی باشد. خطای آزمایشگاهی مربوط به دقت نیروسنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری گشتاور است و خطای عددی نیز ناشی از گسسته‌سازی معادلات و دامنه حل و همچنین دقت مدل آشفتگی برای آنالیز جریان است.

۵-نتایج و بحث

همان‌طورکه پیش از این بیان شد، در شبیه‌سازی عددی، بدنه ثابت و سیال آب پیرامون بدنه با سرعت زاویه‌ای ثابت جریان دارد. میزان گشتاور برای سرعت‌های زاویه‌ای ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه با مقدار گام ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه محاسبه شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب خطوط جریان اطراف بدنه سابف و زاینده‌رود را برای سرعت‌های زاویه‌ای ۰/۰۱۷ و ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، خطوط جریان اطراف بدنه زاینده‌رود هم از منظر سرعت و هم الگوی جریان با خطوط جریان اطراف بدنه سابف کاملا متفاوت می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که خطوط جریان اطراف بدنه زاینده‌رود بیشترین تاثیرپذیری را از بدنه دارد؛ علت اصلی این اختلاف واضح، می‌تواند تفاوت در شکل سطح مقطع باشد به طوری‌که بدنه سابف با سطح مقطع دایره‌ای تاثیر کمتری بر خطوط جریان نسبت به بدنه زاینده‌رود با سطح مقطع مثلث دارد. سرعت جریان در نزدیکی بدنه برابر با سرعت بدنه و صفر



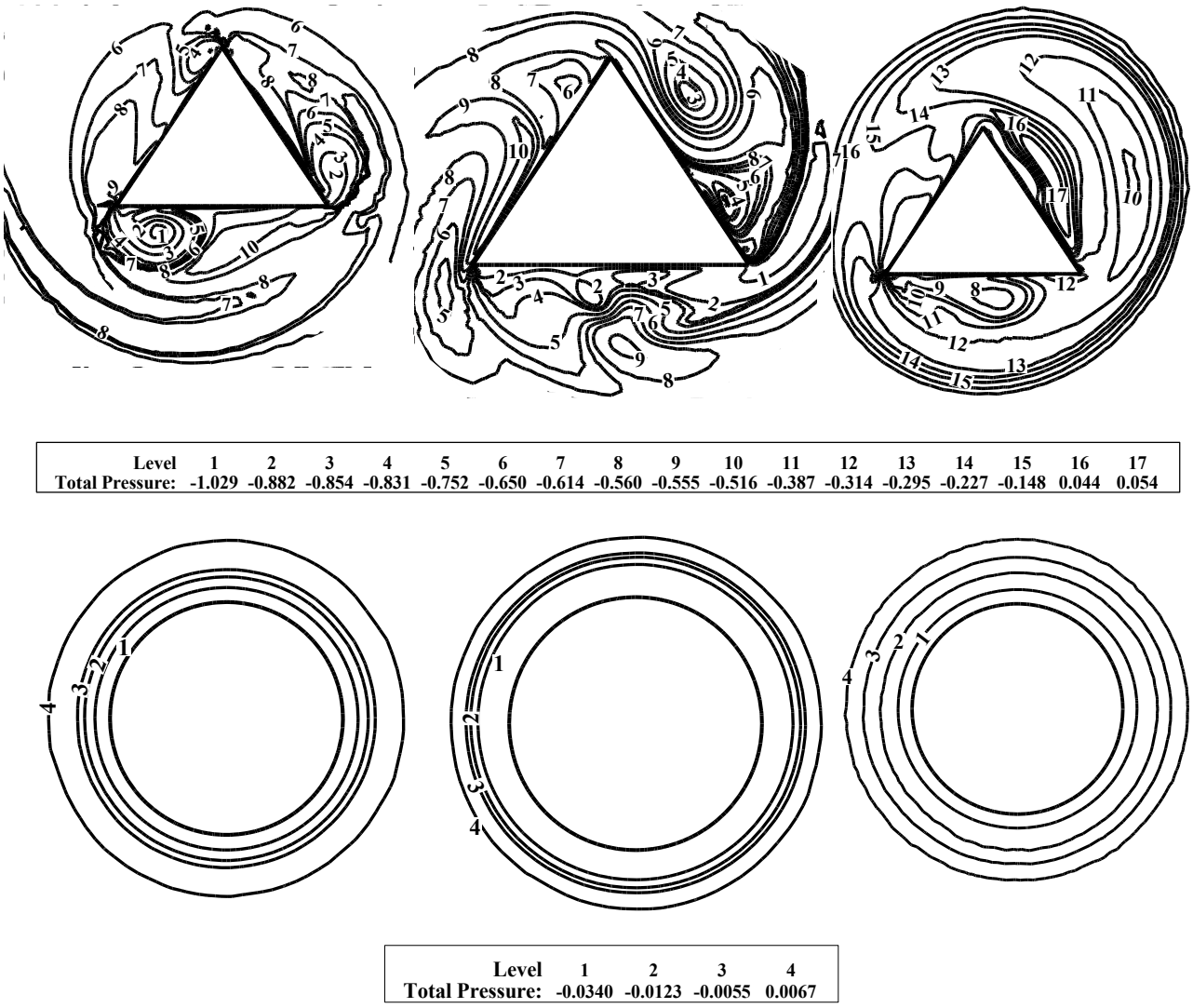
شکل ۱۴: میدان فشار (بر حسب پاسکال) اطراف بدنه زاینده‌رود (بالا)، سابف (پایین) برای حالت سرعت زاویه ای جریان آزاد ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه در سه موقعیت طولی جلوی ربات (چپ)، میانه ربات (وسط) و انتهای ربات (راست)

Fig. 14. Pressure field (in Pascal) around ZRAUV (up), SUBOFF (down) for free stream angular velocity of 0.017 rad/s in three cross sections located in fore (left), middle (middle) and aft (right) part

می‌باشد و با دور شدن از بدنه سرعت جریان افزایش می‌یابد. همچنین با نگاهی جزئی‌تر در خطوط جریان اطراف بدنه زاینده‌رود، می‌توان متوجه پدیده جدایش جریان از روی بدنه شد.

شکل ۱۳ خطوط جریان اطراف دو بدنه را برای حالتی که سرعت زاویه‌ای جریان یکنواخت برابر با ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه می‌باشد، نشان می‌دهد. در این حالت برای هر دو بدنه نسبت به حالت ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه، خطوط جریان تاثیرپذیری بیشتری از بدنه داشته و مشاهده می‌شود که برای بدنه سابف الگوی خطوط جریان و میدان سرعت تقریبا مشابه با حالت ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه می‌باشد، هر چند که در ناحیه انتهایی بدنه کمی الگوی خطوط جریان متفاوت است. الگوی خطوط جریان اطراف بدنه زاینده‌رود در حالت سرعت زاویه‌ای ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه نسبت به ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه بسیار آشفته‌تر به نظر می‌رسد.

برای درک بهتر میدان فشار جریان اطراف دو بدنه مورد بررسی، پروفیل فشار اطراف مقطع عرضی در سه مقطع طولی جلوی ربات، میانه و انتهای ربات در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برای مقادیر سرعت‌های زاویه‌ای ۰/۰۱۷ و ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طورکه در شکل ۱۴ نشان داده شده است، میدان فشار جریان اطراف دو بدنه کاملا با هم متفاوت است. اثر دیواره بدنه سابف بر پروفیل فشار اطراف آن نسبتا ناچیز است؛ این درحالی است که



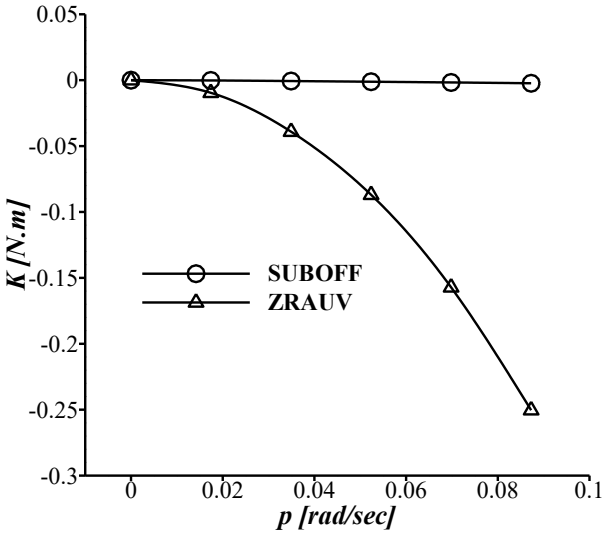
شکل ۱۵: میدان فشار (بر حسب پاسکال) اطراف بدنه زاینده‌رود (بالا)، سابف (پایین) برای حالت سرعت زاویه‌ای جریان آزاد ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه در سه موقعیت طولی جلوی ربات (چپ)، میانه ربات (وسط) و انتهای ربات (راست)

Fig 15. Pressure field (in Pascal) around ZRAUV (up), SUBOFF (down) for free stream angular velocity of 0.087 rad/s in three cross sections located in fore (left), middle (middle) and aft (right) part

بدنه زاینده‌رود کاملا بر پروفیل فشار جریان اطراف بدنه تاثیر گذاشته و این می‌تواند نشان‌دهنده توان بازدارندگی بالاتر بدنه زاینده‌رود نسبت به سابف درحرکت زاویه‌ای حول محور طولی باشد.

تاثیر بدنه زاینده‌رود به خصوص در نواحی نزدیک راس‌های مثلث بر پروفیل فشار کاملا قابل مشاهده است. پروفیل فشار در اطراف مقطع دایروی (بدنه سابف) کاملا متقارن و یکنواخت است و فشار جریان از مقدار ۰/۰۰۳- تا مقدار بیشینه ۰/۰۰۰۹ پاسکال تغییر می‌کند. اما برای بدنه با مقطع مثلث (بدنه زاینده‌رود) پروفیل فشار کاملا نامتقارن و غیرخطی است و فشار جریان از مقدار ۰/۰۴۵- تا مقدار بیشینه ۰/۰۰۷- پاسکال تغییر می‌کند. علت نامتقارن بودن میدان فشار نسبت به محور تقارن عمودی یا محور z، جهت سرعت زاویه‌ای جریان است که در شکل ۱۴ پاد ساعت‌گرد می‌باشد و با توجه به مقطع مثلثی بدنه، پروفیل فشار را به صورت نامتقارن در می‌آورد. وجود گردابه‌های جریان به خوبی در راس‌های مثلث قابل مشاهده است که در طول بدنه رشد می‌کنند.

با پنج برابر شدن سرعت زاویه‌ای جریان (شکل ۱۵)، می‌توان مشاهده نمود که میدان فشار اطراف بدنه با مقطع دایروی (بدنه سابف) تغییر محسوسی نداشته و تنها تغییرات کمی به وجود آمده است که نشان می‌دهد با افزایش سرعت زاویه‌ای تاثیر گذاری دیواره‌های بدنه سابف بر پروفیل فشار جریان اطراف آن افزایش می‌یابد و همچنان



شکل ۱۶: گشتاور هیدرودینامیکی حول محور طولی وارد بر بدنه‌های زاینده‌رود و سابف بر حسب سرعت زاویه‌ای

Fig. 16. Hydrodynamic moment around the longitudinal axis acting on ZRAUV and SUBOFF with respect to the angular velocity

پروفیل فشار اطراف بدنه متقارن و تقریبا به صورت خطی از ۰/۰۳۴- تا ۰/۰۰۶۷ پاسکال می‌باشد. در مورد بدنه زاینده‌رود باید اشاره نمود که جریان اطراف این بدنه همچنان نامتقارن می‌باشد و فشار جریان از مقدار ۱/۰۲۹- تا مقدار بیشینه ۰/۰۵۴ پاسکال تغییر می‌کند و به نظر می‌رسد که شدت غیرخطی بودن ارتباط بین پروفیل فشار اطراف بدنه و سرعت زاویه‌ای جریان آزاد بیشتر شده است. به علاوه این‌طور استنباط می‌شود که همانند حالت سرعت زاویه‌ای ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه (شکل ۱۴) احتمال وقوع پدیده جدایش جریان در راس‌های مثلث بیشتر از بقیه نواحی است. زیرا که در نزدیکی راس‌های مثلث، فشار جریان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده فشار هیدرودینامیکی بالا در این ناحیه‌ها است که احتمال وقوع پدیده جدایش جریان پس از آن وجود دارد. وجود گردابه‌ها این موضوع را اثبات می‌کند. با توجه به هندسه و الگوی جریان می‌توان دریافت که راس پایینی و سمت چپ مثلث محتمل‌ترین مکان برای وقوع پدیده جدایش جریان است که می‌تواند باعث افزایش گشتاور شود.

تفاوت چشم‌گیر در میدان فشار جریان اطراف دو بدنه، می‌تواند موجب تفاوت در گشتاور هیدرودینامیکی وارده از طرف آب به بدنه و در نتیجه تفاوت در قدرت بازدارندگی جریان در حرکت ربات حول محور طولی نیز شود. برای بررسی این موضوع میزان گشتاور محاسباتی وارد بر بدنه‌ها بر حسب سرعت زاویه‌ای در شکل ۱۶ ارائه شده است. برای حذف اثر مقیاس‌بندی، نتایج هر دو بدنه زاینده‌رود و سابف با مقیاس برابر با نمونه آزمایشگاهی مرکز تحقیقات دیوید تیلور (طولی برابر با ۴/۳۵۶ متر) به دست آمده‌است.

همان‌طورکه در شکل ۱۶ نشان داده شده است، اختلاف چشم‌گیری بین دو منحنی وجود دارد. به طور کلی با افزایش سرعت زاویه‌ای، اندازه گشتاور وارد بر بدنه سابف تقریبا به صورت خطی و با شیب کم افزایش می‌یابد به طوری‌که می‌توان تقریبا آن را ثابت فرض نمود؛ در حالی‌که اندازه گشتاور وارد بر بدنه زاینده‌رود با افزایش سرعت زاویه‌ای به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و همواره دارای گشتاور بزرگتر از بدنه سابف می‌باشد. در سرعت‌های زاویه‌ای پایین مقادیر گشتاور وارد بر هر دو بدنه تقریبا نزدیک به هم می‌باشد، به طور مثال در سرعت زاویه‌ای ۰/۰۱۷ رادیان بر ثانیه اختلاف گشتاور وارد بر دو بدنه برابر با ۰/۰۰۹ نیوتن‌متر است. با افزایش سرعت زاویه‌ای اختلاف گشتاور دو بدنه نیز افزایش می‌یابد و به عنوان مثال در سرعت زاویه‌ای ۰/۰۸۷ رادیان بر ثانیه این اختلاف به مقدار ۰/۲۴۸ نیوتن‌متر می‌رسد. با به دست آوردن منحنی گشتاور بر حسب سرعت زاویه‌ای (منحنی $K-p$)، می‌توان مقدار ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده $K_p = \partial K/\partial p|_{p=0}$ را محاسبه و در نتیجه میزان پایداری دینامیکی دو بدنه را طبق رابطه (۲) ارزیابی کرد. جدول ۲ مقادیر ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده یا میرایی K_p را برای هر دو بدنه سابف و زاینده‌رود نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۲ و بر اساس رابطه (۲) با توجه به اینکه ضریب هیدرودینامیکی میرایی بدنه زاینده‌رود حدود ۱۰ برابر ضریب بدنه سابف می‌باشد، پایداری دینامیکی بدنه زاینده‌رود نیز به همان نسبت بیشتر است.

جدول ۲: ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده یا میرایی برای بدنه‌های سابف و زاینده‌رود

Table 2. Hydrodynamic damping coefficient for ZRAUV and SUBOFF body forms

عنوان بدنه	ضریب هیدرودینامیکی بازدارنده یا میرایی K_p [kg.m²/s]
متقارن محوری (سابُف)	۰/۰۰۸-
شبه‌ماهی (زاینده‌رود)	۰/۰۸۱-

۶-نتیجه‌گیری

پایداری دینامیکی حول محور طولی یا پایداری رول ربات خودکار زیرآبی با فرم بدنه شبه‌ماهی با مقطع عرضی مثلثی شکل به کمک دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی و با بدنه‌های متقارن محوری رایج با مقطع دایره مقایسه شد. برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی ربات درون سیال آب، معادله حرکت در یک درجه آزادی حول محور طولی بیان گردید و شرط پایداری با استفاده از ضریب میرایی ربات استخراج شد. برای صحت‌سنجی نتایج عددی، مقادیر گشتاور هیدرودینامیکی حاصل از مدل‌سازی عددی برای بدنه سابف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و بیشترین خطا در حدود ۱۱ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد میدان فشار اطراف بدنه زاینده‌رود در مدل‌سازی عددی آزمایش حرکت حول محور طولی بر عکس بدنه متقارن محوری سابف، کاملا نامتقارن است به نحوی‌که احتمال وقوع پدیده جدایش جریان که موجب افزایش اثر غیرخطی‌شدن معادلات و آشفتگی بیشتر جریان می‌شود، اطراف بدنه زاینده‌رود کاملا منطقی به نظر می‌رسد. این مهم را می‌توان به خوبی از نمودار گشتاور بر حسب سرعت زاویه‌ای نیز دریافت؛ زیرا که این منحنی برای بدنه زاینده‌رود با مقطع مثلث کاملا غیرخطی است اما برای بدنه سابف با مقطع دایره خطی و تقریبا ثابت است. به‌گونه‌ای که گشتاور وارد بر بدنه دایروی سابف تقریبا مستقل از سرعت زاویه‌ای است. همچنین اختلاف بین گشتاور دو بدنه نیز با افزایش سرعت زاویه‌ای افزایش یافت. در نهایت نتایج نشان داد که پایداری دینامیکی حول محور طولی یا رول ربات خودکار زیرآبی شبه‌ماهی زاینده‌رود با ضریب میرایی ۰/۰۸۱- به میزان ۱۰ برابر بیشتر از بدنه متقارن‌محوری سابف با ضریب میرایی ۰/۰۰۸- می‌باشد. در پژوهش حاصل بر خلاف سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه که با روش‌های پر هزینه و پیچیده کنترلی مانند اضافه کردن سطوح کنترلی یا اضافه کردن پروانه عکس‌چرخنده در ربات، پایداری دینامیکی آن را تا حدودی افزایش می‌دهند، با الهام‌گیری از طبیعت و یک نوع ماهی خاص با عنوان گربه‌ماهی، پایداری دینامیکی ربات خودکار زیرآبی با تغییر فرم بدنه آن نسبت به بدنه‌های رایج به طور قابل توجهی افزایش یافت.

مراجع

[1] J.S. Parsons, R.E. Goodson, F.R. Goldschmied, Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow, Journal of Hydronautics, 8(3) (1974) 100-107.

[2] D. Myring, A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow, The Aeronautical Quarterly, 27(3) (1976) 186-194.

[3] T. Lutz, S. Wagner, Numerical shape optimization of natural laminar flow bodies, in: Proceedings of 21st ICAS Congress, 1998.

[4] A. Alvarez, V. Bertram, L. Gualdesi, Hull hydrodynamic optimization of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth, Ocean Engineering, 36(1) (2009) 105-112.

[5] I. Nesteruk, J.H. Cartwright, Turbulent skin-friction drag on a slender body of revolution and Gray's Paradox, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2011, pp. 22-42.

[6] I. Nesteruk, G. Passoni, A. Redaelli, Shape of aquatic animals and their swimming efficiency, Journal of Marine Biology, 2014 (2014).

[7] D. Perrault, N. Bose, S. O'Young, C.D. Williams, Sensitivity of AUV added mass coefficients to variations in hull and control plane geometry, Ocean engineering, 30(5) (2003) 645-671.

[8] D. Perrault, N. Bose, S. O'Young, C.D. Williams, Sensitivity of AUV response to variations in hydrodynamic parameters, Ocean Engineering, 30(6) (2003) 779-811.

[9] A. Tyagi, D. Sen, Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach, Ocean Engineering, 33(5-6) (2006) 798-809.

[10] P. Praveen, P. Krishnankutty, Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 42(8) (2013) 1013-1022.

[11] M. Abkowitz, Stability and motion control of ocean vessels, in, MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, 1969.

[12] J. Billingsley, Essentials of Dynamics and Vibrations, Springer, 2017.

[13] K. Ogata, Y. Yang, Modern control engineering, 4 ed., Prentice-Hall, 2002.

[14] A. Phillips, S. Turnock, M. Furlong, The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective

[23] S. Mansoorzadeh, A.R. Pishevar, E. Javanmard, Numerical investigation of dynamic stability of an autonomous underwater vehicle, Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics, 2(1) (2013) 69-81 (in Persian).

[24] E. Goshtasbi Rad, S.M. Eatesami Renani, Experimental investigation of effect of H type tail on aerodynamic coefficients of aircraft model, with and without external fuel tank,, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(3) (2016) 305-314 (in Persian).

[25] A. Honaryar, M. Ghiasi, Design of a bio-inspired hull shape for an AUV from hydrodynamic stability point of view through experiment and numerical analysis, Journal of Bionic Engineering, 15(6) (2018) 950-959.

[26] N.C. Groves, T.T. Huang, M.S. Chang, Geometric characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF models (DTRC model numbers 5470 and 5471), DAVID TAYLOR RESEARCH CENTER BETHESDA MD SHIP HYDROMECHANICS DEPT, 1989.

[27] J. Garavello, J. Garavello, Spatial distribution and interaction of four species of the catfish genus Hypostomus Lacépède with bottom of Rio São Francisco, Canindé do São Francisco, Sergipe, Brazil (Pisces, Loricariidae, Hypostominae), Brazilian Journal of Biology, 64(3B) (2004) 103-141.

[28] J.L. Birindelli, A.M. Zanata, F.C. Lima, Hypostomus chrysostiktos, a new species of armored catfish (Siluriformes: Loricariidae) from rio Paraguaçu, Bahia State, Brazil, Neotropical Ichthyology, 5(3) (2007) 271-278.

[29] M. Jesse, Plecostomus Information, in, https://aquaticmag.com/freshwater/plecostomus-information/.

[30] M. Renilson, Submarine hydrodynamics, Springer, 2015.

[31] in, https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx/.

[32] R.F. Roddy, Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments, David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1990.

hydrodynamic design of autonomous underwater vehicles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 224(4) (2010) 239-254.

[15] G. Vaz, S. Toxopeus, S. Holmes, Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers, in: ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 2010, pp. 621-633.

[16] G. h. Zeng, J. Zhu, Study on Key Techniques of Submarine Maneuvering Hydrodynamics Prediction Using Numerical Method, in: 2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, IEEE, 2010, pp. 83-87.

[17] Y. c. Pan, H. x. Zhang, Q. d. Zhou, Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 24(6) (2012) 840-847.

[18] J. Zhang, J.A. Maxwell, A.G. Gerber, A.G.L. Holloway, G.D. Watt, Simulation of the flow over axisymmetric submarine hulls in steady turning, Ocean engineering, 57 (2013) 180-196.

[19] Z. Leong, D. Ranmuthugala, I. Penesis, H. Nguyen, RANS-based CFD prediction of the hydrodynamic coefficients of DARPA SUBOFF geometry in straight-line and rotating arm manoeuvres, International Journal of Maritime Engineering, 157(A1) (2015) A41-A52.

[20] L.s. Cao, J. Zhu, W.b. Wan, Numerical investigation of submarine hydrodynamics and flow field in steady turn, China ocean engineering, 30(1) (2016) 57-68.

[21] A. Honaryar, Investigation on the effect of body form on autonomous underwater vehicle maneuverability, Amirkabir University of Technology, 2014 (in Persian).

[22] A. Honaryar, M. Ghiasi, S.H. Mousavizadegan, Investigation on the effect of tail form on autonomous underwater vehicle maneuverability, Journal of Marine Engineering, 12(24) (2016) 89-101 (in Persian).