Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 57(10) (2026) 1359-1386
DOI: 10.22060/mej.2026.25245.7933

Numerical Optimization of the Spacing Ratio in a Marine Toroidal Propeller Using CFD and Genetic Algorithm with Comparison to the KP505 Reference Propeller

Mohammad Hasan Ahmadi, Rouzbeh Shafaghat *, Mohsen Zamani, Behrad Alizadeh Kharkeshi

Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT: Marine toroidal propellers have recently attracted considerable attention in marine propulsion systems due to their potential to improve hydrodynamic performance by eliminating conventional blade tips and reducing tip vortex intensity. In this study, the effect of spacing ratio on the hydrodynamic performance of a marine toroidal propeller was numerically investigated, and the optimal spacing ratio was determined through optimization. Numerical simulations were performed using computational fluid dynamics in STAR-CCM+, while optimization was conducted using a genetic algorithm. The toroidal propellers were generated based on the KP505 reference propeller using an innovative geometrical approach. Six different spacing ratios were examined under various advance coefficients. Thrust coefficient, torque coefficient, and efficiency were considered as objective functions for performance evaluation and optimization. Results showed that the thrust coefficient exhibited decreasing, nonlinear, and increasing trends at low, medium, and high advance coefficients, respectively. The optimal spacing ratio was 0.2641, corresponding to maximum efficiency of 45.35%. Comparative analyses revealed that the optimized toroidal propeller increased thrust by up to 26% at an advance coefficient of 0.8 and improved efficiency by 7.84% at an advance coefficient of 1. Flow field analyses also indicated improved pressure distribution and higher wake velocity behind the optimized propeller.

Review History:

Received: Dec. 09, 2025
Revised: May, 09, 2026
Accepted: May, 16, 2026
Available Online: May, 23, 2026

Keywords:

Numerical Study
Toroidal Propeller
Spacing Ratio
Optimization
KP505 Propeller

1- Introduction

In recent years, toroidal propellers have emerged as a promising alternative to conventional propellers due to their unique closed-loop blade geometry. By connecting the blade tips and eliminating the free tip region, toroidal propellers can substantially weaken tip vortex structures and modify the wake flow characteristics [1]. Several recent studies have investigated the hydrodynamic and acoustic characteristics of toroidal propellers [2, 3]. Numerical and experimental investigations have demonstrated that toroidal propellers are capable of reducing vortex intensity, modifying wake structures, and improving thrust generation under certain operating conditions. In addition, some studies have reported reductions in hydrodynamic noise and cavitation intensity due to the suppression of concentrated tip vortices. Despite these advantages, the complex geometry of toroidal propellers introduces additional viscous losses and complicated flow interactions, which may negatively affect propeller efficiency in some operating conditions. Therefore, understanding the relationship between geometrical parameters and hydrodynamic performance remains an important research challenge.

In the present study, the effect of spacing ratio on the hydrodynamic performance of a marine toroidal propeller is numerically investigated using computational fluid dynamics simulations. The toroidal propeller geometry is developed based on the KP505 reference propeller through an innovative geometrical generation approach. Numerical simulations are performed in the STAR-CCM+ environment under several advance coefficients and spacing ratio configurations. Furthermore, a genetic algorithm is employed to determine the optimal spacing ratio corresponding to the best hydrodynamic performance. Thrust coefficient, torque coefficient, and propeller efficiency are selected as the principal performance indicators. Finally, the hydrodynamic performance of the optimized toroidal propeller is compared with that of the conventional KP505 propeller, and detailed flow field analyses are conducted to investigate the physical mechanisms governing the observed performance characteristics.

2- Methodology

In the present study, the geometry of the toroidal propeller was developed based on the KP505 reference propeller. To investigate the influence of geometrical spacing on the hydrodynamic performance, several toroidal propeller

*Corresponding author's email: rshafaghat@nit.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.

configurations with different spacing ratios were generated and analyzed. The spacing ratio was defined as the relative axial distance between the forward and aft sections of the toroidal blade structure. Six different spacing ratios were considered in the numerical simulations to evaluate their effects on thrust generation, torque characteristics, efficiency, and wake flow behavior. The numerical simulations were performed using the commercial computational fluid dynamics software STAR-CCM+. A three-dimensional computational domain was generated to simulate the open-water performance of the propellers. The computational domain consisted of two primary regions, including a stationary outer region and a rotating cylindrical region surrounding the propeller. The numerical simulations were conducted under steady-state conditions using the Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations. Turbulence effects were modeled using the Shear Stress Transport k−ω turbulence model due to its capability in accurately predicting adverse pressure gradients and near-wall flow behavior in marine hydrodynamic applications. In the numerical simulations of present study, the Navier-Stokes equations were used in the form of continuity and RANS equations. Also SST k−ω turbulent model is used for these simulations.

The simulations were performed for several advance coefficients to evaluate the hydrodynamic performance of the toroidal propellers under different operating conditions. The numerical model was validated through comparison with available experimental data for the KP505 reference propeller. Hydrodynamics coefficient of propeller used according equations (1) to (4) [4].

$$J = \frac{V_A}{nD} \tag{1}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{3}$$

$$\eta = \frac{J}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q} \tag{4}$$

A genetic algorithm was employed to determine the optimal spacing ratio corresponding to the best hydrodynamic performance of the toroidal propeller. The optimization procedure was integrated with the numerical simulation results to investigate the relationship between spacing ratio and propeller performance parameters.

3- Result and Discussion

The obtained results were compared with those of the conventional KP505 propeller in terms of thrust coefficient, torque coefficient, efficiency, and flow field characteristics. At low advance coefficients, increasing the spacing ratio generally resulted in a reduction in thrust coefficient. In the intermediate advance coefficient range, the thrust coefficient exhibited nonlinear behavior with respect to the spacing ratio. At high advance coefficients, increasing the spacing ratio produced a noticeable increase in thrust coefficient. Comparative analyses indicated that the toroidal propeller, prior to optimization, achieved approximately 15% higher thrust coefficient than the KP505 reference propeller at an advance coefficient of 0.8. Following the optimization process, the optimized toroidal propeller increased thrust by approximately 26% at the same operating condition. Despite the increase in torque coefficient, the optimized toroidal propeller demonstrated favorable efficiency characteristics under specific operating conditions. The maximum efficiency of the optimized toroidal propeller reached 45.35% at the optimal spacing ratio of 0.2641. A significant observation of the present study was the improvement in propeller efficiency at high advance coefficients. At an advance coefficient of 1.0, the optimized toroidal propeller exhibited approximately 7.84% higher efficiency compared with the KP505 reference propeller. This behavior indicates that the toroidal propeller performs more effectively under high-speed operating conditions where the adverse effects of flow interference are reduced and the suppression of tip vortices becomes more beneficial (Figure 1).

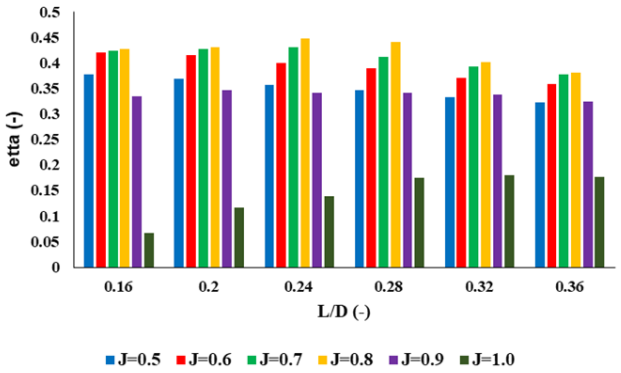
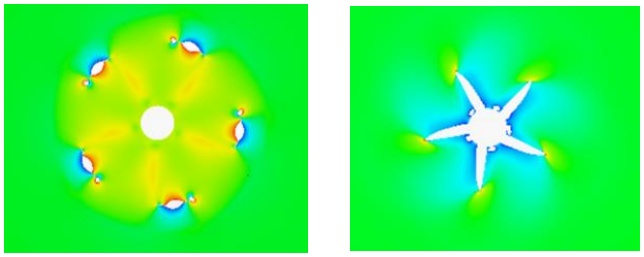


Fig. 1. Propeller efficiency changes versus spacing ratio for various advance ratios.

Pressure coefficient distributions further demonstrated the hydrodynamic advantages of the optimized toroidal configuration. The pressure field around the toroidal blades showed smoother pressure gradients and reduced low-pressure concentration regions near the blade tips. This behavior indicates a lower tendency for cavitation inception and improved pressure recovery around the propeller surfaces (Figure 2).

4- Conclusion

In this study, the effect of spacing ratio on the hydrodynamic performance of a marine toroidal propeller was numerically



(a) (b)

Fig. 2. Comparison of pressure coefficint for a) The optimal toroidal propeller and b) The KP505 propeller

investigated using CFD and a genetic algorithm optimization approach. The results demonstrated that the spacing ratio significantly affects thrust generation, torque characteristics, efficiency, and wake flow behavior. The optimization process identified an optimal spacing ratio of 0.2641, corresponding to a maximum efficiency of 45.35%. Comparative analyses showed that the optimized toroidal propeller increased thrust by up to 26% at an advance coefficient of 0.8 and improved efficiency by 7.84% at an advance coefficient of 1.0 compared with the KP505 reference propeller. Flow field also indicated improved wake uniformity, reduced vortex intensity, and smoother pressure distributions around the toroidal blades, suggesting enhanced hydrodynamic performance and reduced cavitation tendency. Overall, the findings confirm the potential of spacing ratio optimization for improving the performance of marine toroidal propellers, particularly under high-speed operating conditions.

References

[1] J. Bai, Y. Li, X. Liu, H. Zhang, L. Ren, Hydrodynamic Performance and Vortex Structure Analysis of a Toroidal Propeller, Journal of Marine Science and Engineering, 13(6) (2025) 1046.

[2] A. Nadery, H. Bahrami, A. Najafi, H. Ghassemi, M. Aminzadeh, G. He, Numerical investigation of toroidal propeller: hydrodynamic and hydroacoustic study, Ships and Offshore Structures, (2025) 1-16.

[3] Z. Tang, W. He, Z. Li, Research on the Open-Water Performance and Tip-Vortex of Toroidal Propeller, in: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2024, pp. ISOPE-I-24-582.

[4] R. Farhangi, R. Shafaghat, M. Zamani, B. Alizadeh Kharkeshi, Experimental Investigation of the Effects of Distance Ratio and Diameter Ratio on the Hydrodynamic Coefficients of the Tandem Canard Configuration of the KP505 Propeller, International Journal of Engineering, 39(9) (2026) 2309-2325.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۳۵۹ تا ۱۳۸۶
DOI: 10.22060/mej.2026.25245.7933

بهینه‌سازی عددی نسبت فاصله در پروانه حلقه‌بسته دریایی با استفاده از CFD و الگوریتم ژنتیک و مقایسه با پروانه مرجع KP505

محمدحسن احمدی، روزبه شفقت*، محسن زمانی، بهراد علی‌زاده خارکشی

گروه پژوهشی انرژی‌های دریا پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

خلاصه: به‌کارگیری پروانه‌های حلقه‌بسته در سامانه‌ی پیشرانش دریایی مورد توجه قرار گرفته‌است. در این پژوهش اثر تغییر در نسبت فاصله بر عملکرد پروانه حلقه‌بسته به صورت عددی بررسی و نسبت فاصله‌ی بهینه تعیین شد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار استار سی سی ام و بهینه‌سازی نیز با الگوریتم ژنتیک انجام شد. پروانه‌های حلقه‌بسته برپایه‌ی پروانه KP505 تولید شدند. شبیه‌سازی‌ها در ۶ نسبت فاصله انجام شد. نتایج نشان داد ضریب تراست با افزایش نسبت فاصله، در ضرایب پیشروی پایین رفتاری نزولی، در ضرایب پیشروی میانی رفتاری غیر خطی و در ضرایب پیشروی بالا رفتاری صعودی داشت. ضریب تراست پروانه حلقه‌بسته، پیش از بهینه‌سازی و در بهترین حالت، در ضریب پیشروی ۰/۸، ۱۵ درصد نسبت به پروانه KP505 بیشتر بود. نسبت فاصله بهینه، معادل ۰/۲۶۴۱ به‌دست آمد که بازدهی بیشینه‌ی پروانه حلقه‌بسته در این نسبت فاصله برابر با ٪۴۵/۳۵ بود. مقایسه عملکرد پروانه حلقه‌بسته بهینه با پروانه KP505 نشان داد، پروانه حلقه‌بسته بهینه قابلیت افزایش تراست تا ۲۶ درصد (ضریب پیشروی ۰/۸) نسبت به پروانه KP505 دارد و بازدهی آن در ضریب پیشروی ۱/۰ به میزان ۷/۸۴ درصد افزایش می‌یابد. تحلیل جریان نشان داد افزایش سرعت پشت پروانه و بهبود الگوی فشار در پروانه حلقه‌بسته بهینه، افزایش تراست و کاهش احتمال کاویتاسیون را نشان داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

کلمات کلیدی:
مطالعه عددی
پروانه حلقه بسته
نسبت فاصله
بهینه‌سازی
پروانه KP505

۱- مقدمه

مسیرهای آبی به عنوان شریان‌های اصلی تجارت و حمل‌ونقل جهانی، از اهمیت بسیاری برخوردارند و این امر نیاز به بهبود مستمر عملکرد شناورهای دریایی را ضروری می‌سازد. یکی از حیاتی‌ترین و مؤثرترین بخش‌های هر شناور، سیستم پیشرانش آن است که به‌طور مستقیم بر کارایی، مصرف انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی اثر می‌گذارد [۱]. در این میان، پروانه‌ها به عنوان مهم‌ترین عناصر تولیدکننده نیروی رانش، همواره در کانون توجه پژوهشگران بوده‌اند [۲]. در سال‌های اخیر، ظهور طرح‌های نوین پروانه، از جمله پروانه‌های حلقه‌بسته، فصل جدیدی را در فناوری پیشرانش دریایی گشوده است. این پروانه‌ها با حذف نوک پره و اتصال پره‌ها به یکدیگر، مزایای قابل توجهی را به همراه آورده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها کاهش چشم‌گیر گردابه‌های نوک پره، افزایش نیروی تراست و کاهش آلودگی صوتی ناشی از کاویتاسیون می‌شود [۳]. این ویژگی‌ها، پروانه حلقه‌بسته را به یک تکنولوژی پیشگام و با پتانسیل بالا برای کاربردهای نوین دریایی مبدل ساخته است.

با توجه به این که ایده اولیه طراحی پروانه‌های حلقه‌بسته برای استفاده در پهپادها بوده است، بخش زیادی از مطالعات انجام شده در مورد این پروانه‌ها معطوف به استفاده آن‌ها در سیستم‌های پیشرانش هوایی می‌باشد [۴]، [۵] و [۶]. این پروانه‌ها یک تکنولوژی جدید در حوزه پیشرانش دریایی محسوب می‌شوند و مطالعات موجود در زمینه استفاده از این پروانه‌ها به عنوان پیشبرنده‌های دریایی عمدتاً مربوط به سالیان اخیر می‌باشد. با توجه به ساختار هندسی نوآورانه این پروانه‌ها مطالعات مختلفی در مورد بررسی فرم هندسی این پروانه‌ها پرداخته شده است. به صورتی که مسکوپین و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثر ایجاد تغییر شکل‌های متنوع در هندسه پروانه‌های مرسوم پرداختند و پروانه حلقه‌بسته را به عنوان یکی از هندسه‌های نوین و موثر برای بهبود عملکرد پروانه‌های دریایی معرفی کردند. لی‌یو و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۴ یک روش ریاضیاتی برای تولید هندسه پروانه‌های حلقه‌بسته توسعه دادند که هندسه سه‌بعدی پروانه حلقه‌بسته با استفاده از روابط تحلیلی ریاضی تعیین می‌شوند. عطار و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۳ به بررسی پروانه‌های حلقه‌بسته با اعمال دندانه بایونیک بر لبه‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rshafaghat@nit.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.

آن پرداختند. آن‌ها بیان کردند پروانه حلقه‌بسته با لبه بایونیک باعث بهبود ضرایب هیدرودینامیکی در مقایسه با پروانه حلقه‌بسته معمولی می‌شود. بخش دیگری از مطالعات انجام‌شده در مورد این پروانه‌ها معطوف به مقایسه عملکرد پروانه‌های حلقه‌بسته با پروانه‌های متداول در قالب مطالعات عددی مختلف بوده‌است. به صورتی که مسروپیان و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۳ با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس و مدل توربولانسی کا اپسیلن به بررسی اثر تغییر در نوع پروفیل پره و تعداد پره بر عملکرد پروانه حلقه‌بسته پرداختند. آن‌ها نشان دادند که پروانه حلقه‌بسته نهایی به بیشینه بازدهی ۶۵ درصد در ضریب پیشروی میانی ۰/۷۵ دست یافت. جورجیف و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۳ با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی به ارزیابی اثر تغییرات قطر و زاویه حمله پروانه حلقه‌بسته پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش قطر پروانه به تنهایی اثری بر ضرایب هیدرودینامیکی نداشته، با تغییر در زاویه حمله ضرایب هیدرودینامیکی بهبود می‌یابند؛ به صورتی که در ضرایب پیشروی میانی بازدهی پروانه به صورت چشم‌گیری افزایش خواهد یافت. وانگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۴ با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و بهره‌گیری از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز[1] و مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا–امگا[2] در نرم‌افزار استار سی سی ام، اثر تغییر در پارامترهای مختلف هندسی بر رفتار هیدرودینامیکی پروانه‌های حلقه بسته را بررسی کردند. در سال ۲۰۲۴ تانگ و همکاران [۱۳] مطالعه‌ای عددی به‌منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی و رفتار گردابه‌های نوک پره در پروانه‌های حلقه‌بسته انجام دادند. آن‌ها در پژوهش خود از روش معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز همراه با مدل آشفتگی اس اس تی کا امگا استفاده کردند و نشان دادند که افزایش ضریب پیشروی منجر به تأخیر در جدایش گردابه‌ی نوک پره می‌شود. در سال ۲۰۲۴ سیروسی و همکاران [۱۴] با استفاده از نرم‌افزار استار سی سی ام به بررسی عددی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه شارو در قطرهای مختلف و مقایسه آن با یک پروانه مرسوم سری B پرداختند. آن‌ها در شبیه‌سازی‌های خود از مدل قاب مرجع متحرک[3] استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده اثر ناچیز تغییر قطر بر ضرایب هیدرودینامیکی و افزایش تراست و بازدهی در پروانه شارو نسبت به پروانه متداول سری B بود. در سال ۲۰۲۴ گروور و همکاران [۱۵] با استفاده از نرم‌افزار زیمنس ان ایکس هندسه پروانه حلقه‌بسته را طراحی کرده و سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار استار سی سی ام، شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی[4] را برای پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیکی انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پروانه حلقه‌بسته می‌تواند بازدهی بالاتری نسبت به پروانه‌های رایج داشته باشد. در سال ۲۰۲۴ ژو و همکاران [۱۶] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا[5] در نرم‌افزار استار سی سی ام به بررسی عددی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه حلقه‌بسته پرداختند. نتایج نشان داد که منشأ تولید تراست در ضرایب پیشروی پایین از بخش جلویی و در ضرایب بالا از بخش پشتی پروانه است. همچنین وجود ناحیه‌ای با سرعت بالا بین بخش‌های جلویی و پشتی و ساختار پیچیده گردابه‌ها (شامل گردابه نوک و لبه فرار) گزارش شد. در مقایسه با پروانه معمولی، پروانه حلقه‌بسته دارای گردابه لبه فرار قوی‌تر، میدان ویک گسترده‌تر و مقادیر بیشتر تراست و گشتاور در ضریب پیشروی یکسان است و بیشینه راندمان آن در ضرایب پیشروی بالاتر حاصل می‌شود، که نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر در سرعت‌های بالا است. در سال ۲۰۲۴ وو و همکاران [۱۷] تأثیر پارامترهای هندسی شامل زاویه جانبی، زاویه گام و تعداد پره‌ها را بر عملکرد پروانه حلقه‌بسته با استفاده از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز و در نظر گرفتن کاویتاسیون بررسی کردند. نتایج نشان داد که راندمان و ضریب تراست با افزایش زاویه جانبی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و زاویه بهینه حدود ۲۳,۲۵ درجه است. کاهش زاویه گام موجب افزایش موقت راندمان و کاهش پیوسته تراست شد، در حالی‌که افزایش تعداد پره‌ها باعث افزایش تراست و کاهش بار هر پره گردید، اما تأثیر قابل‌توجهی بر راندمان نداشت. همچنین کاویتاسیون عمدتاً در ناحیه انتقالی پره رخ داده و محل آن به زاویه جانبی وابسته است. در سال ۲۰۲۵ نادری و همکاران [۱۸] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس روش حجم محدود از طریق نرم‌افزار تجاری استار سی سی ام در مقایسه‌ای عددی جامع با پروانه سری B، ثابت کردند که پروانه حلقه‌بسته نه تنها ۱۳/۳ درصد راندمان بالاتری دارد، بلکه به‌طور چشمگیری منجر به کاهش نویز (تا ۱۴ دسی‌بل) می‌شود. در سال ۲۰۲۵ مسعود و همکاران [۱۹] با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت به مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه متداول دریایی و مدل حلقه‌بسته آن پرداختند و ضمن حفظ راندمان مشابه، بهبود قابل‌توجهی در رفتار رانش مشاهده کردند. در سال ۲۰۲۵ بایی و همکاران [۲۰] از روش معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز به همراه مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا–امگا برای شبیه‌سازی جریان حول پروانه حلقه بسته استفاده کردند. عملکرد پروانه در ضرایب پیشروی مختلف بررسی شد و

1. Reynolds Avraged Navier-Stocks (RANS)
2. Shear Stress Transport k-omega (SST k-ω)
3. Moving Reference Frame
4. Computational fluid Dynamics
5. Detached eddy simulation

مشخص گردید که در ضرایب بالا، بازده رانشی افزایش یافته و بیشینه آن در بازه‌ی نسبت پیشروی ۱/۲–۱/۱ حاصل می‌شود. در سال ۲۰۲۵ پنگ و شواکیانگ لی [۲۱] با هدف طراحی یک مدل پارامتریک برای پروانه حلقه‌بسته و بررسی نویز هیدرودینامیکی آن، یک روش نوین مبتنی بر تابع تبدیل شکل–کلاس ارائه دادند. در این روش، مقاطع ایرفویلی ناکا در امتداد مسیر منحنی چیده شده و هندسه سه‌بعدی پروانه ایجاد شد. نتایج تحلیل آکوستیکی نشان داد که در شرایط تراست یکسان، پروانه حلقه‌بسته نسبت به پروانه مرجع DTMB 4119 کاهش نویز حدود ۴ دسی‌بل در صفحه شعاعی و ۴ تا ۶ دسی‌بل در صفحه محوری دارد.

همان‌طور که بیان شد مطالعات مربوط به پروانه‌های حلقه‌بسته در حوزه کاربرد دریایی محدود به سالیان اخیر می‌باشد. با توجه به بررسی مطالعات، مشاهده شد که مطالعات انجام‌شده در مورد مقایسه عملکرد پروانه‌های حلقه‌بسته با پروانه‌های متداول و یا تغییر در مشخصات هندسی پروانه مغروق بوده‌است. با توجه به این مطالعات مشاهده می‌شود که بررسی پروانه حلقه‌بسته و بهینه‌سازی عملکرد آن برای یک شناور مشخص و مقایسه عملکرد آن با پروانه متداول مورداستفاده برای این شناور صورت نپذیرفته است. برای این منظور در این پژوهش به بررسی استفاده از پروانه حلقه بسته برای شناور کانتینربر KCS پرداخته شده و ضرایب هیدرودینامیکی و مشخصات جریان این پروانه با پروانه متداول این شناور (پروانه KP505) مورد مقایسه قرار می‌گیرند. برای این کار از شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار استار سی سی ام استفاده می‌شود. در ابتدا پس از تعیین تنظیمات مراحل مختلف شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج این شبیه‌سازی‌ها با توجه به داده‌های موجود برای پروانه KP505 مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد و در ادامه شبیه‌سازی‌های مربوط برای پروانه حلقه‌بسته صورت می‌گیرد و به منظور بررسی پارامتریک پروانه حلقه‌بسته به بررسی تغییر در نسبت فاصله این پروانه پرداخته می‌شود. در ادامه با بهینه‌سازی عملکرد پروانه حلقه‌بسته با هدف دستیابی به بیشینه بازدهی آن، نسبت فاصله بهینه برای این پروانه تعیین شده و در نهایت عملکرد پروانه حلقه‌بسته بهینه با پروانه معیار KP505 مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

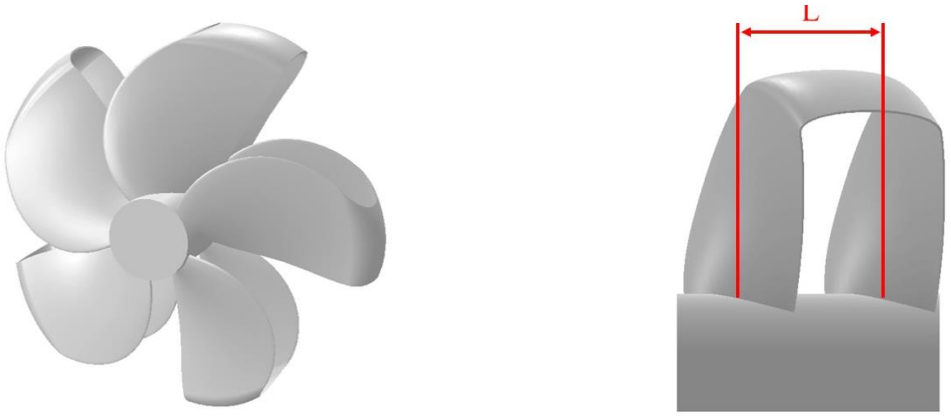
۲- تعریف مسئله

هدف این پژوهش بررسی عددی اثر تغییر در نسبت فاصله پروانه حلقه‌بسته (شکل ۱) بر مشخصه‌های عملکردی شامل ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه به‌همراه مشخصات جریان در اطراف پروانه حلقه‌بسته می‌باشد. نتایج به‌دست آمده برای پروانه حلقه‌بسته با پروانه معیار KP505 که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ معرفی شده است، مقایسه خواهند شد. بر این اساس ابتدا نتایج شبیه‌سازی‌های عددی پروانه KP505 با توجه داده‌های تجربی موجود اعتبارسنجی می‌شود [۲۲]. سپس ضرایب هیدرودینامیکی پروانه حلقه‌بسته در حالت‌های مختلف نسبت فاصله بررسی شده، بازدهی بیشینه پروانه حلقه‌بسته پس از بهینه‌سازی نتایج به‌دست می‌آید. در نهایت نیز ضرایب هیدرودینامیکی و مشخصات جریان اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه با پروانه معیار KP505 مقایسه می‌شود. شکل ۲ فلوچارت تعریف مسئله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات هندسی پروانه KP505.

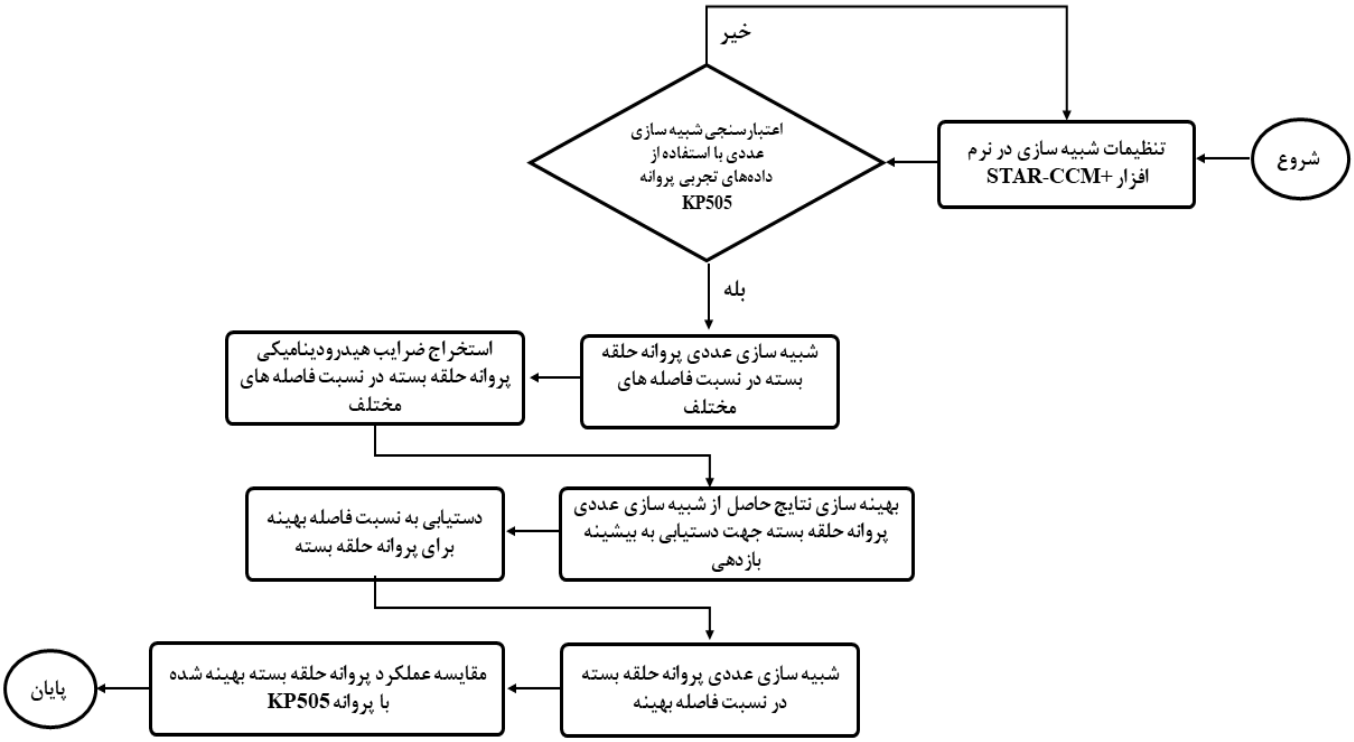
Table 1. Main geometric parameters of KP505 propeller.

پارامتر پروانه	مقدار پارامتر
قطر (متر)	۰/۲۵
نسبت گام (0.7R)	۰/۹۵
نسبت دیسک	۰/۸
تعداد پره	۵
جهت چرخش	راست‌گرد
مقطع پره	NACA 66
نسبت قطر هاب	۰/۱۸



شکل ۱. پروانه حلقه بسته و نسبت فاصله آن.

Fig. 1. Toroidal propeller and its spacing ratio.



شکل ۲. فلوچارت تعریف مسئله.

Fig. 2. Problem definition flowchart.

جدول ۲. طراحی آزمون انجام‌شده برای پژوهش حاضر.

Table 2. Design of experiments conducted for the present research.

ضریب پیشروی (J)	سرعت (m/s)	دور (rps)	نسبت فاصله (L/D)
۰/۵	۱/۵	۱۲	۰/۱۶، ۰/۲۰، ۰/۲۴، ۰/۲۸، ۰/۳۲، ۰/۳۶
۰/۶	۱/۸		
۰/۷	۲/۱		
۰/۸	۲/۴		
۰/۹	۲/۷		
۱/۰	۳		

۳- طراحی آزمون

همان‌طور که بیان شد، هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه حلقه‌بسته در نسبت فاصله‌های مختلف است. با توجه به داده‌های تجربی موجود برای پروانه KP505 [۲۲] و لزوم اعتبارسنجی این داده‌ها، بازه‌ی تغییرات ضریب پیشروی برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی این پروانه از ۰/۶ تا ۱/۰ درنظر گرفته شد. سرعت دورانی پروانه برای این منظور ثابت درنظر گرفته می‌شود و سرعت جریان با توجه به قطر پروانه در محدوده ۱/۵ تا ۳/۰ متر بر ثانیه تغییر خواهد کرد. پروانه حلقه‌بسته نیز برای حالت‌های مختلف نسبت فاصله از ۰/۱۶ تا ۰/۳۶ در محدوده ضرایب پیشروی مذکور شبیه‌سازی شده است. جدول ۲ طراحی آزمون انجام‌شده برای پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. کل حالت‌های شبیه‌سازی ۴۸ حالت می‌باشد که شامل ۶ ضریب پیشروی برای اعتبارسنجی داده‌های پروانه KP505، ۳۶ حالت برای نسبت‌های فاصله مختلف و ضرایب پیشروی پروانه حلقه‌بسته و نیز ۶ ضریب پیشروی برای پروانه حلقه‌بسته بهینه خواهد شد.

۴- مطالعه عددی

شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی با توجه به هندسه پیچیده پروانه‌های حلقه‌بسته و لزوم بررسی جزئیات مشخصات جریان در اطراف این هندسه، می‌تواند بسیار کارآمد باشد. شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش در محیط نرم‌افزار استار سی سی ام انجام شدند. لازم به ذکر است که در این پژوهش به‌منظور تمرکز بر استخراج پارامترهای عملکردی میانگین، از روش قاب مرجع متحرک استفاده شده است. در این روش، میدان جریان در چارچوبی چرخان به‌صورت پایا حل شده و اثرات زمانی به‌صورت غیرمستقیم در نتایج لحاظ می‌شوند. بنابراین، معادلات حاکم در فرم پایا حل شده و پارامتر گام زمانی در فرآیند حل وارد نمی‌شود. این رویکرد به‌طور گسترده در مطالعات تحلیل عملکرد پروانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و برای پیش‌بینی ضرایب هیدرودینامیکی میانگین نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۴- ۱- معادلات حاکم

معادله پیوستگی (معادله‌ی (۱)) و معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (معادلات (۲) تا (۴)) برای توصیف جریان در اطراف پروانه استفاده می‌شود ([۲۳]، [۲۴] و [۲۵]).

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left[\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}^2)+\frac{\partial}{\partial y}(\bar{u}\bar{v})+\frac{\partial}{\partial y}(\bar{u}\bar{w})\right]= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}-\rho\overline{u'u'}\right) +\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}-\rho\overline{u'v'}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}-\rho\overline{u'w'}\right) \qquad (۲)$$

$$\rho\left[\frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}\bar{u})+\frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}^2)+\frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}\bar{w})\right]= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}-\rho\overline{v'u'}\right) +\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}-\rho\overline{v'v'}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}-\rho\overline{v'w'}\right) \qquad (۳)$$

$$\rho\left[\frac{\partial}{\partial x}(\overline{w}\,\overline{u})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{w}\,\overline{v})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{w}^{2})\right]= -\frac{\partial \overline{P}}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial \overline{w}}{\partial x}-\rho\overline{w'u'}\right) +\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \overline{w}}{\partial y}-\rho\overline{w'v'}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial \overline{w}}{\partial z}-\rho\overline{w'w'}\right) \quad (۴)$$

همچنین مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا-امگا (معادلات (۵) و (۶)) برای مدلسازی آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲].

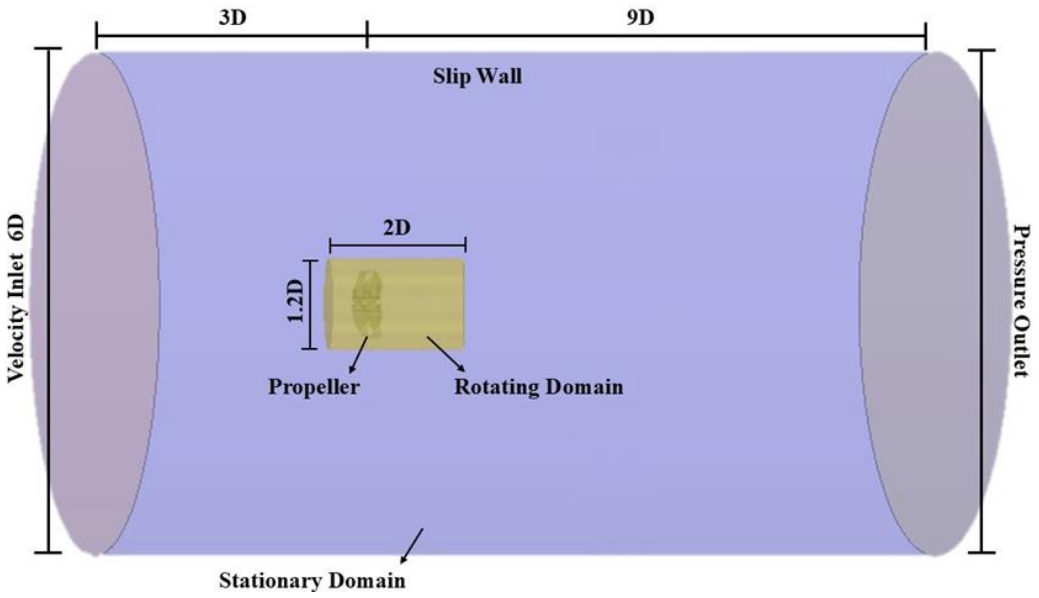
$$u_i\frac{\partial \omega}{\partial x_i}=\frac{\omega}{k}P_\tau-\beta\omega^2 +\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\sigma_\omega\frac{k}{\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+\frac{\sigma_d}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۵)$$

$$u_i\frac{\partial k}{\partial x_i}=P_\tau-\beta^*\omega k+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\sigma_k\frac{k}{\omega}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad (۶)$$

۴- ۲- فیزیک مسئله و هندسه شبیه‌سازی

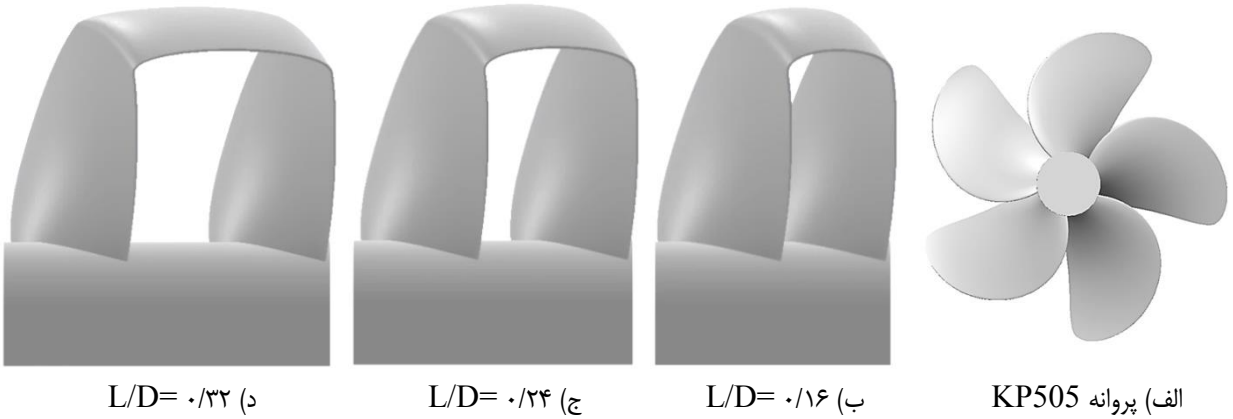
سیال مورداستفاده در شبیه‌سازی‌ها، آب بوده و پروانه به صورت کاملا مغروق در نظر گرفته شد. جریان اطراف پروانه نیز با فرض جریان پایا شبیه‌سازی شده است. حرکت دورانی پروانه در شبیه‌سازی‌های عددی به‌کمک روش قاب مرجع متحرک ایجاد شد. دو ناحیه محاسباتی مطابق شکل ۳ برای این منظور در نظر گرفته شد که شامل نواحی ثابت و چرخان هستند. ناحیه چرخان شامل یک استوانه بزرگ با ابعاد مشخص بوده، ورود و خروج جریان از مرزهای آن انجام می‌شود. هندسه پروانه نیز در ناحیه چرخان در قالب یک استوانه کوچک با ابعاد مشخص جانمایی و حرکت چرخشی با اعمال روش قاب مرجع متحرک و با ایجاد یک مختصات دورانی در این ناحیه شبیه‌سازی شد. لازم به ذکر است، ابعاد این نواحی (شکل ۳) بر اساس قطر پروانه تعیین شد [۲۶]. همچنین سرعت دورانی پروانه در کل شبیه‌سازی‌ها برابر با مقدار ثابت ۱۲ دور بر ثانیه درنظر گرفته شد و تغییر ضریب پیشروی با تغییر سرعت جریان ورودی تعیین گردید.

پروانه‌های شبیه‌سازی‌شده در این مطالعه، با توجه به طراحی آزمون انجام‌شده، شامل پروانه KP505 و پروانه‌های حلقه‌بسته با نسبت فاصله‌های مختلف می‌باشند (شکل ۴).



شکل ۳. نواحی ثابت و چرخان در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر.

Fig. 3. Stationary and rotating domains in the simulations of the present research.



شکل ۴. پروانه‌های شبیه‌سازی‌شده در پژوهش حاضر.

Fig. 4. Stationary and rotating domains in the simulations of the present research.

۴- ۳- شرایط مرزی

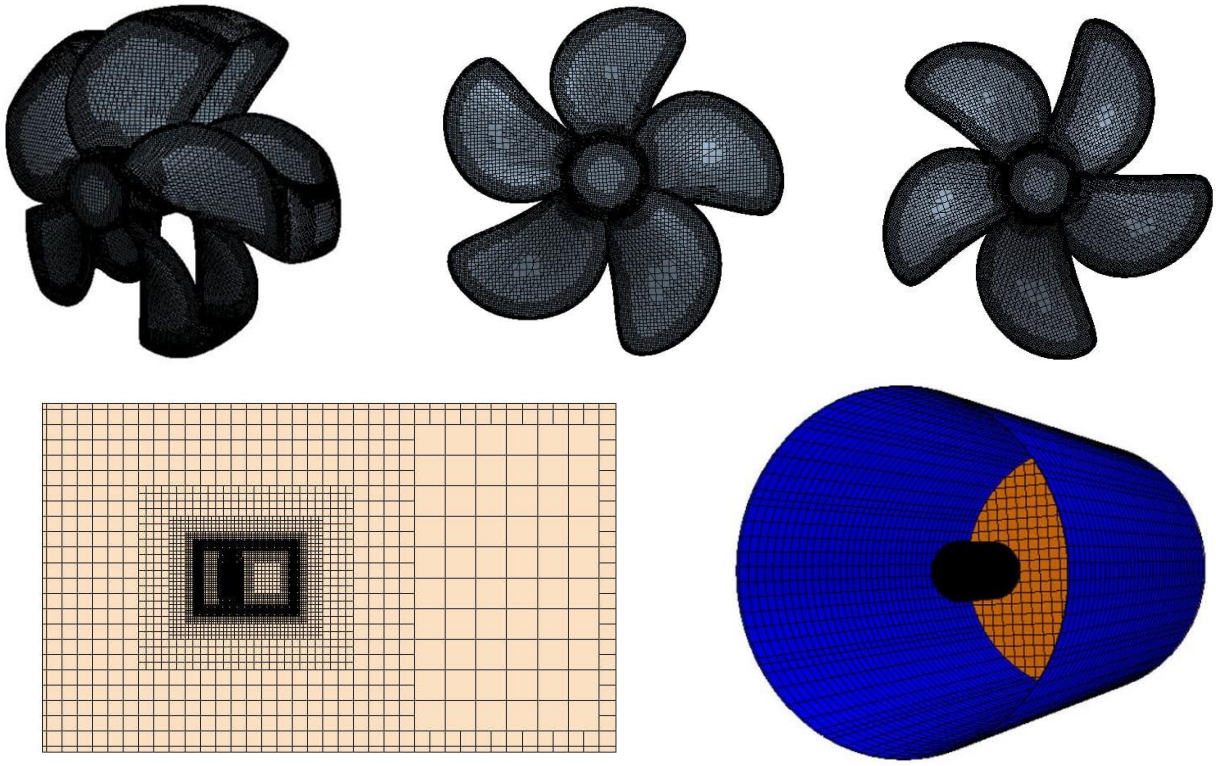
شرایط مرزی با درنظر گرفتن هندسه مسئله شامل یک دامنه ثابت و یک ناحیه چرخان اعمال شدند. شرط مرزی در ورودی دامنه ثابت، ورودی سرعت[1] و در خروجی دامنه‌ی ثابت، فشار خروجی[2] با فشاری معادل فشار اتمسفر در نظر گرفته شد. همچنین شرط تقارن برای پوسته استوانه غیرچرخان به دلیل تقارن هندسی دامنه اعمال گردید. نواحی چرخان و غیرچرخان هندسه توسط یک مرز مشترک[3] به یکدیگر متصل شدند که امکان تبادل جرم و انرژی بین آن‌ها در طول محاسبات فراهم است. در نهایت، پروانه به‌عنوان یک جسم جامد در حال چرخش درون جریان سیال، به عنوان یک دیواره در نظر گرفته شد تا نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از برخورد جریان به سطح آن به دقت محاسبه شوند.

۴- ۴- شبکه بندی

شبکه‌بندی به عنوان یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل در فرآیند تحلیل‌های عددی دینامیک سیالات، نقشی محوری در تعیین دقت، اعتبار و پایداری نتایج نهایی ایفا می‌کند. فرآیند شبکه‌بندی با دقت و توجه به جزئیات هندسه و شرایط جریان، برای دو بخش اصلی شامل دامنه چرخان و دامنه ثابت انجام پذیرفت. استراتژی شبکه‌بندی به گونه‌ای تعیین شد که اندازه المان‌های شبکه از بخش مرکزی شبیه‌سازی (پروانه حلقه‌بسته) به سمت خارج آن افزایشی باشد. این کار ضمن حفظ دقت در نواحی حساس، از افزایش بی‌رویه هزینه‌های محاسباتی جلوگیری می‌نماید. سه مدل اصلی شبکه‌بندی شامل مش سطحی[4]، تریمر[5] و مش لایه مرزی[6] مورد استفاده قرار گرفت. مدل مش سطحی برای ناحیه چرخان و برای بهبود کیفیت و یکنواختی شبکه سطحی هندسه، به ویژه در نواحی پیچیده پروانه، به کار گرفته شد تا از دقت هندسی بالا در مرحله شبکه‌بندی حجمی اطمینان حاصل شود. مدل تریمر نیز برای تولید شبکه حجمی سازمان‌یافته با سلول‌های مربعی استفاده گردید تا به دلیل ساختار منظم، به پایداری عددی کمک می‌کند. در نهایت، مدل مش لایه مرزی برای ایجاد لایه‌های مرزی در مجاورت دیواره‌های پروانه به کار رفت. این لایه‌ها برای تحلیل دقیق پدیده‌های لایه مرزی و گرادیان‌های شدید سرعت در نزدیکی سطوح اهمیت حیاتی دارند. شبکه‌بندی لایه مرزی برای دامنه‌ی ثابت شبیه‌سازی استفاده نشد. زیرا این دامنه در فاصله‌ی نسبتاً زیادی از سطوح جامد پروانه قرار دارد؛ بنابراین پدیده‌های لایه مرزی در آن نقش چندانی در دقت شبیه‌سازی ایفا نمی‌کنند. به جای آن، تمرکز اصلی بر روی شبکه‌بندی سطحی و کنترل دقیق اندازه‌ی سلول‌ها در ناحیه‌های کلیدی اطراف پروانه قرار گرفت تا هم دقت نتایج در نواحی حساس تضمین شود و هم هزینه‌های محاسباتی در مناطق دورتر از پروانه به شکل قابل توجهی کاهش یابد. شبکه‌بندی انجام‌شده در شکل ۵ ارائه شده است.

بررسی استقلال از شبکه، در قالب یک روند تکرار و چندمرحله‌ای انجام

1. Velocity Inlet
2. Pressure Outlet
3. Interface
4. Surface Remesher
5. Trimmer
6. Prism Layer Mesh



شکل ۵. شبکه‌بندی ایجادشده برای شبیه‌سازی پژوهش حاضر.

Fig. 5. Generated mesh for the simulations of the present research.

شد. در ابتدا، یک شبکه با اندازه بزرگ (چگالی کم) تولید و شبیه‌سازی با استفاده از آن انجام شد. سپس با کاهش اندازه سلول‌ها، شبکه‌های با چگالی بالاتر تولید شدند. شبیه‌سازی در هر مرحله تکرار و پارامترهای مورد نظر استخراج شدند. این روند تا جایی ادامه یافت که تغییرات نتایج برای پارامترهای موردنظر، در دو حالت متوالی به یک خطای تعیین‌شده و قابل چشم‌پوشی برسد. بررسی استقلال از شبکه مطابق جدول ۳، در قالب بررسی مقادیر ضریب تراست و گشتاور برای حالت‌های مختلف شبکه‌بندی انجام شد [۱۳]. اختلاف ضریب تراست و گشتاور را می‌توان برای حالت‌های مختلف بر اساس رابطه (۷) به‌دست آورد.

$$D_i = S_i - S_{i-1}, (i = 2,3,4) \quad (۷)$$

که در آن S مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای ضرایب تراست و گشتاور در هر حالت، D اختلاف ضریب تراست و گشتاور بین دو حالت متوالی و i نیز شماره حالت شبکه‌بندی می‌باشد. هم‌چنین پارامتر دیگری که در این بخش مورد بررسی قرار گرفت، نسبت اختلاف بین حالت‌های مختلف است (رابطه (۸)). اگر این پارامتر بین ۰ و ۱ باشد، نشان‌دهنده همگرایی فرآیند استقلال از شبکه است [۱۳]. مطابق با جدول ۳ حالت سوم شبکه‌بندی با ۳۹۸۵۱۳۱ المان مناسب‌ترین حالت برای شبکه‌بندی به‌دست آمد.

$$R_{D_i} = \frac{D_{i+1}}{D_i}, (i = 2,3) \quad (۸)$$

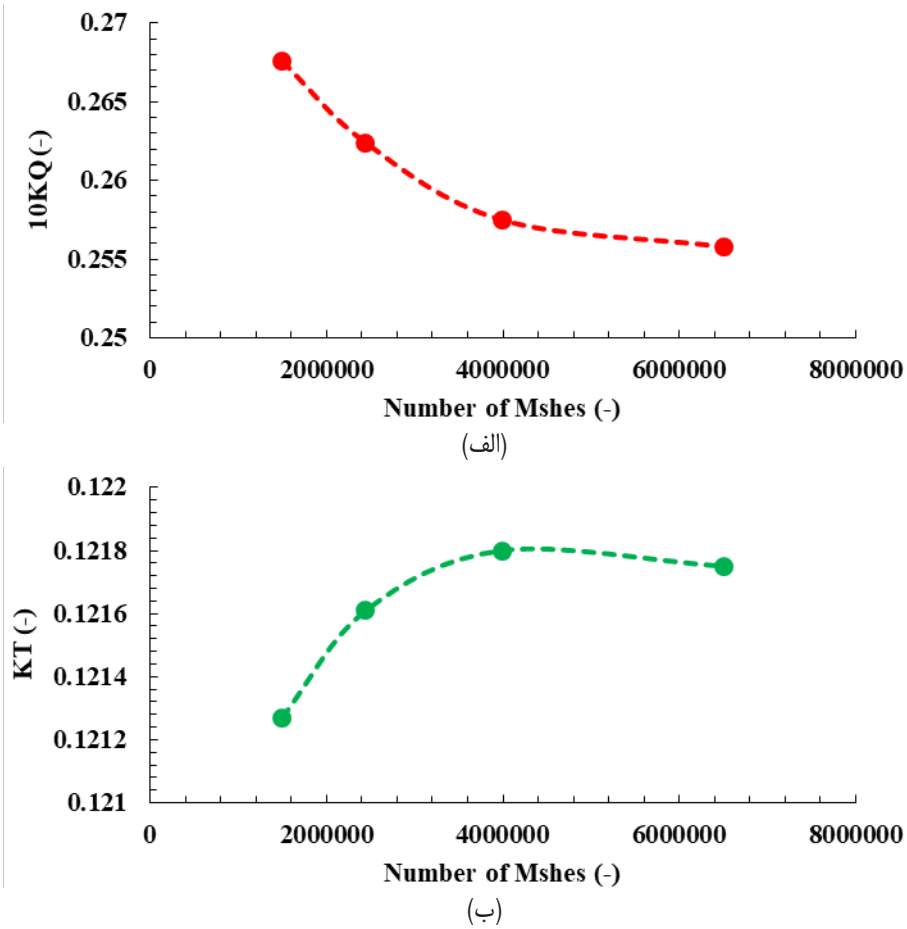
برای بررسی دقیق‌تر تغییرات پارامترهای مختلف با تغییر در تعداد شبکه‌ها می‌توان از شکل ۶ نیز استفاده کرد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، شبکه‌ی مناسب برای شبیه‌سازی از ۳۹۸۵۱۳۱ المان تشکیل شده است.

موضوع دیگری که در بحث شبکه‌بندی حائز اهمیت می‌باشد، بحث

جدول ۳. بررسی استقلال از شبکه برای پژوهش حاضر.

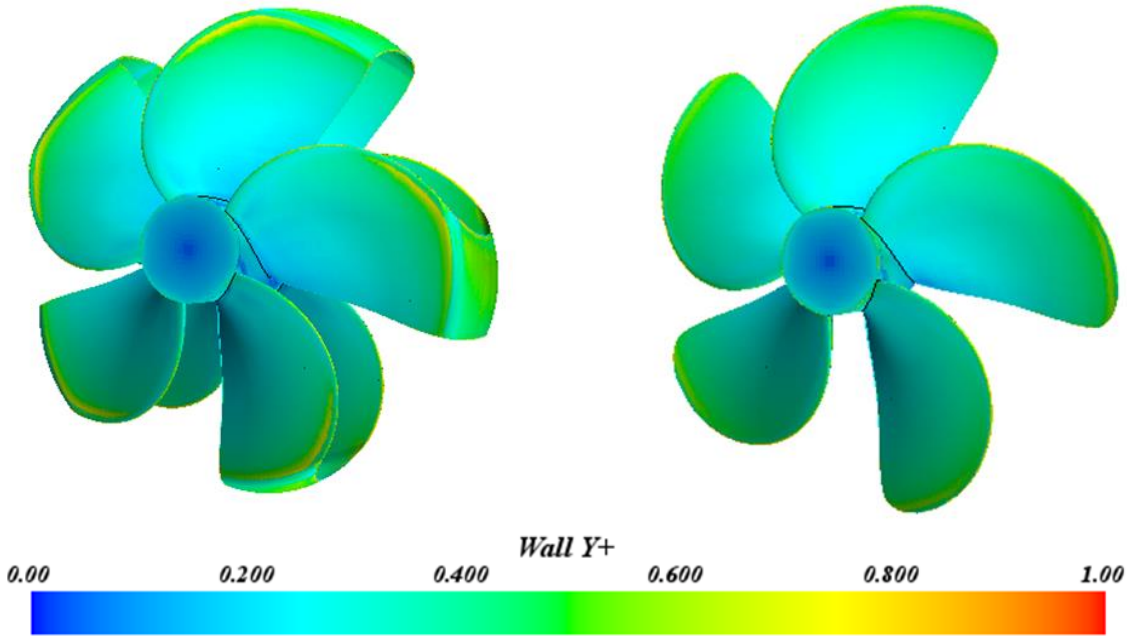
Table 3. Grid independence study for the present research.

شبکه	تعداد المان	ضریب تراست	اختلاف ضریب تراست	نسبت اختلاف ضریب تراست	ضریب گشتاور	اختلاف ضریب تراست	نسبت اختلاف ضریب گشتاور
حالت ۱	۱۴۹۵۱۳۶	۰/۱۲۱۲۷	–	–	۰/۲۶۷۶	–	–
حالت ۲	۲۴۴۳۳۵۱	۰/۱۲۱۶۱	۰/۰۰۰۳	–	۰/۲۶۲۴	−۰/۰۰۵۲	–
حالت ۳	۳۹۸۵۱۳۱	۰/۱۲۱۸۰	۰/۰۰۰۱۹	۰/۶۳۳	۰/۲۵۷۵	−۰/۰۰۴۹	۰/۹۴۲۳
حالت ۴	۶۵۰۲۰۳۳	۰/۱۲۱۷۵	−۰/۰۰۰۰۵	−۰/۲۶۳	۰/۲۵۵۸	−۰/۰۰۱۴	−۰/۲۶۹۲



شکل ۶. نمودارهای استقلال از شبکه بدست آمده بر اساس بررسی الف) ضریب گشتاور و ب) ضریب تراست.

Fig. 6. Grid independence plots based on the study of a) Torque coefficient and b) Thrust coefficient.



شکل ۷. بررسی مقادیر y+ برای شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر.

Fig. 7. y+ values for the simulations of the present study.

مربوط به مقادیر تابع دیواره[1] است. به‌منظور ارزیابی دقت شبکه‌بندی در ناحیه نزدیک دیواره و بررسی صحت استفاده از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا-امگا، توزیع پارامتر بی‌بعد تابع دیواره بر روی سطح پره‌های پروانه مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار تابع دیواره در همه نواحی کمتر از ۱ می‌باشد. این موضوع بیانگر آن است که شبکه‌بندی انجام‌شده قادر به تفکیک مستقیم زیرلایه لزج بوده و بنابراین لایه مرزی بدون استفاده از توابع دیواره مدل‌سازی شده است.

در انتهای بخش شبیه‌سازی عددی نیز می‌توان کلیه تنظیمات شبیه‌سازی را در قالب جدول ۴ نشان داد. در این جدول علاوه موارد مختلف در مورد هندسه شبیه‌سازی، شرایط مرزی و شبکه‌بندی، سایر تنظیمات مربوط به شبیه‌سازی‌های عددی این پژوهش ارائه شده است. با توجه به مطالب موجود مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی‌ها معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شدند. برای جملات جابجایی از طرح مرتبه دوم بالا استفاده شد. با توجه به کوپل معادلات سرعت و فشار نیز با توجه به حل پایا در این مطالعه روش نیمه‌ضمنی کوپل فشار-سرعت ساده[2] مورد استفاده قرار گرفت. برای همگرایی شبیه‌سازی‌ها نیز علاوه بر معیار باقیمانده‌ها کمتر از 10^{-5}، پایدار شدن مقادیر تراست و گشتاور نیز در نظر گرفته شد و تعداد تکرارها ها نیز برابر با ۱۰۰۰ تکرار لحاظ شد. هم‌چنین همان‌طور که بیان شد، با توجه به استفاده از روش قاب مرجع متحرک، میدان جریان به‌صورت پایا حل شده و نتایج به‌دست آمده بیانگر مقادیر میانگین زمانی می‌باشند. در این روش، تغییرات زمانی میدان جریان به‌صورت صریح مدل‌سازی نمی‌شوند.

۵- مشخصه‌های هیدرودینامیکی پروانه‌ها

چهار عدد بدون بعد به عنوان مشخصه‌های هیدرودینامیکی از اهمیت بالایی برخوردار هستند که به عنوان پارامترهای اصلی و کلیدی، امکان مقایسه و تعمیم نتایج آزمایشگاهی در مقیاس کوچک را به شرایط عملیاتی واقعی و نمونه‌های بزرگ‌تر فراهم می‌نمایند. این مشخصه‌های هیدرودینامیکی شامل ضریب پیشروی، ضریب رانش، ضریب گشتاور و بازدهی پروانه هستند (معادلات (۹) تا (۱۲)) [۲۷].

$$J = \frac{V_A}{nD} \qquad (۹)$$

1. Y^+
2. SIMPLE

جدول ۴. تنظیمات شبیه‌سازی پژوهش حاضر.

Table 4. Simulation settings of the present study.

دسته بندی	پارامتر	توضیحات
نوع حل	نوع شبیه‌سازی	پایا
	حرکت دورانی پروانه	قاب مرجع متحرک
سیال	نوع سیال	آب
	چگالی	ρ=۹۹۸Kg/m^3
	ویسکوزیته	μ=۰/۰۰۱Pa.s
مدل فیزیکی	معادلات حاکم	معادلات ناویر-استوکس میانگین‌شده رینولدز
	مدل توربولانسی	مدل آشفتگی انتقال تنش برشی کا-امگا
روش عددی	روش گسسته سازی	حجم محدود
	طرح جابجایی	مرتبه دوم
	کوپل سرعت و فشار	ساده
همگرایی	معیار باقیمانده	کمتر از 10^{-5}
	معیار تکمیلی	پایدار شدن ضرایب تراست و گشتاور
	تعداد Iterations	۱۰۰۰ تکرار
شبکه‌بندی	مدل شبکه‌بندی	Surface Remesher، Trimmer و Prism Layer
	لایه مرزی	Prism Layer Mesher
	مقادیر Y^+	کمتر از ۱
	روش بررسی استقلال از شبکه	مقایسه مقادیر ضریب تراست و گشتاور
	تعداد شبکه منتخب	حدود ۴ میلیون
هندسه شبیه‌سازی	دامنه حل	دو ناحیه (چرخان و ثابت)
شرایط مرزی	ورودی دامنه	ورودی سرعت
	خروجی دامنه	خروجی فشار
	دیواره دامنه	تقارن
	استوانه اطراف پروانه	Interface
	پروانه	دیواره

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (۱۰)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (۱۱)$$

$$\eta = \frac{J}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q} \quad (۱۲)$$

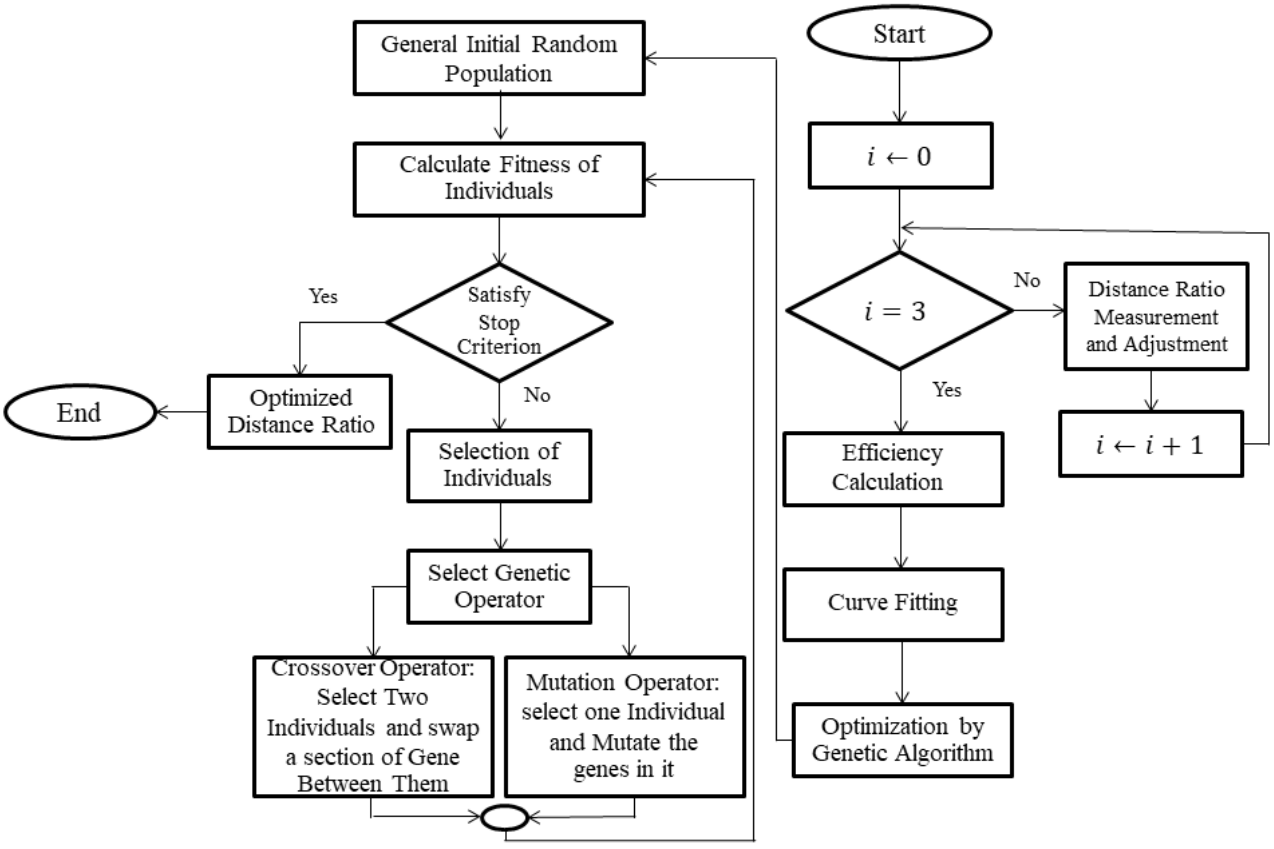
V_A سرعت پیشروی جریان به سمت پروانه، D قطر، n سرعت دورانی پروانه، T نیروی پیشرانش وارد بر پروانه، Q گشتاور مقاومتی پروانه و ρ دانسیته سیال می‌باشد.

۶- بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی در زمینه طراحی مهندسی می‌باشد [۲۸] که برای بهینه‌سازی عملکرد پروانه حلقه‌بسته در این پژوهش از ماژول بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. شکل ۸ فلوچارت الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بازدهی به‌عنوان تنها تابع هدف در این پژوهش درنظر گرفته شده است که بر مبنای تغییر نسبت فاصله پروانه حلقه‌بسته در محدوده ۰/۱۶ تا ۰/۳۶ بهینه‌سازی شده است.

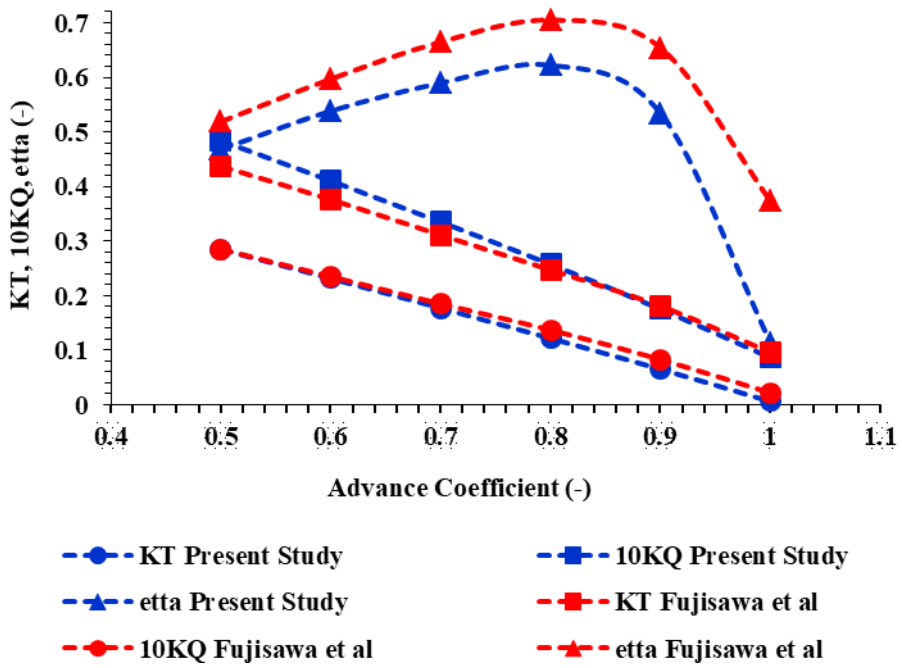
۷- نتایج و بحث

سازمان‌دهی بخش نتایج به این شکل است که ابتدا مطالعات اعتبارسنجی ارائه می‌شود. سپس ضرایب هیدرودینامیکی پروانه حلقه‌بسته با تغییر نسبت فاصله استخراج و پروانه حلقه‌بسته با نسبت فاصله بهینه و بازدهی بیشینه



شکل ۸. فلوچارت الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این پژوهش [۲۹].

Fig. 8. Flowchart of the genetic algorithm used in this research.



شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی برای ضرایب تراست و گشتاور پروانه KP505 در ضرایب پیشروی مختلف.

Fig. 9. Comparison of numerical simulation results with experimental data for thrust and torque coefficients of KP505 propeller at different advance coefficients.

تعیین خواهد شد. در نهایت نیز مشخصات هیدرودینامیکی و مشخصات جریان حول پروانه حلقه‌بسته بهینه با پروانه KP505 مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است، همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، تمامی نتایج ارائه‌شده در این بخش، شامل ضرایب هیدرودینامیکی و کانتورهای میدان جریان، بر اساس حل پایا به‌دست آمده و بیانگر رفتار میانگین زمانی جریان می‌باشند.

۷- ۱- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی

همان‌طور که بیان شد، پروانه حلقه‌بسته معرفی شده، بر اساس روشی نوآورانه و بر مبنای پروانه پایه KP505 طراحی شده است. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی پروانه KP505 با نتایج تجربی موجود اعتبارسنجی شده‌اند. شکل ۹ مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی را با نتایج تجربی حاصل از مطالعه فوجیساوا و همکاران [۳۰] نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نتایج عددی تطابق مناسب و روند یکسانی با نتایج تجربی دارند؛ به صورتی که میانگین خطای نسبی ضریب تراست و گشتاور به ترتیب برابر با ۶/۵۸ و ۷/۴۹ درصد می‌باشد.

برای بررسی دقیق‌تر اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی، می‌توان از جدول ۵ نیز استفاده کرد. در این جدول مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی به همراه قدر مطلق خطای نسبی آن‌ها ارائه شده‌است. مقادیر خطا و رفتار آن‌ها بر اساس الگوبرداری از مراجع مشابه مناسب ارزیابی می‌شود.

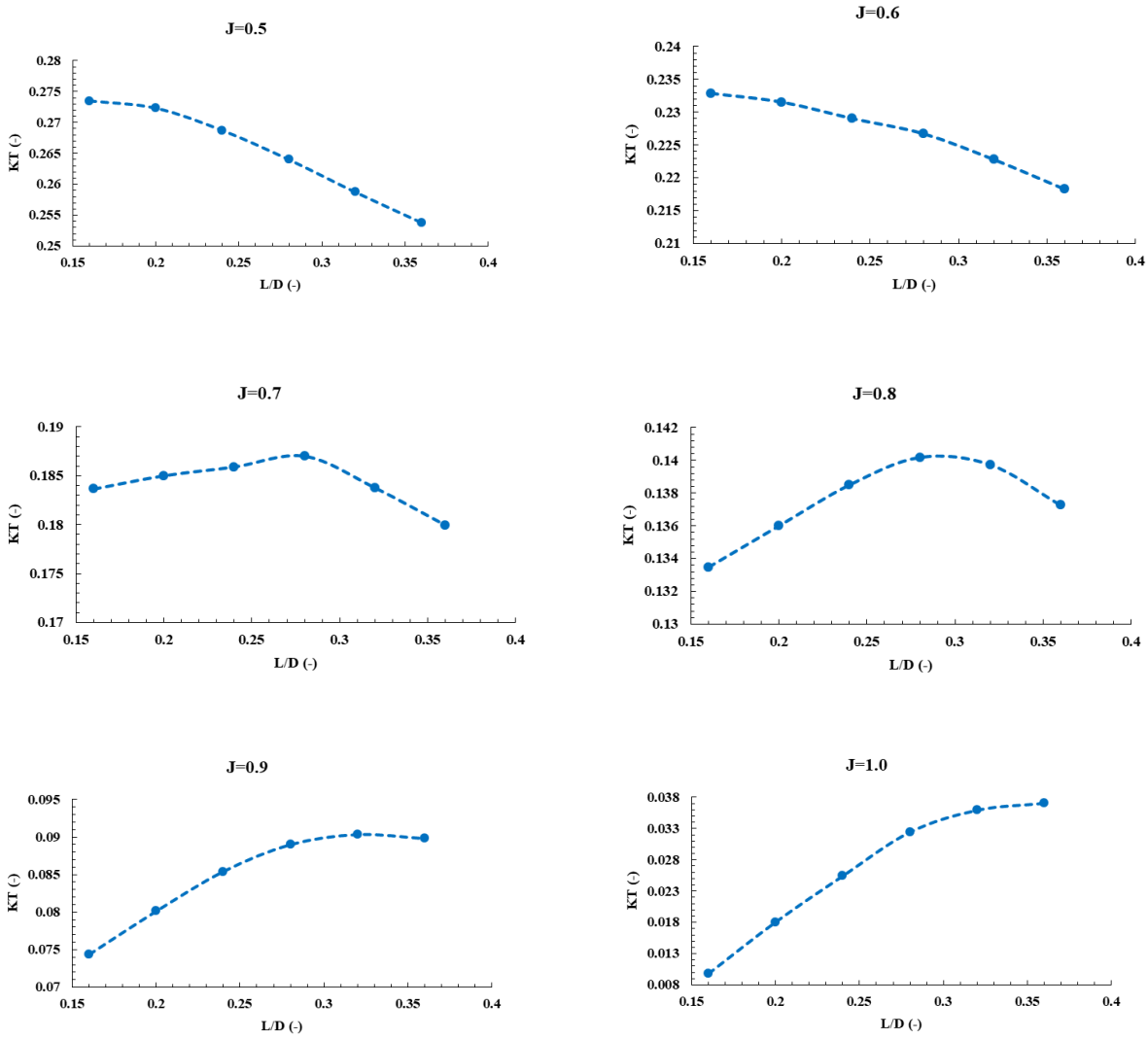
۷- ۲- مشخصه‌های عملکردی

شکل ۱۰ تغییرات ضریب تراست را بر حسب تغییر نسبت فاصله برای ضرایب پیشروی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند همه‌ی نمودارها یکسان نیستند؛ ولی مقایسه‌ی نقطه‌به‌نقطه نتایج نشان می‌دهد که ضریب تراست با افزایش نسبت پیشروی کاهش یافته‌اند. با توجه به این که محدوده‌ی ضریب پیشروی را می‌توان به سه بخش مجزای ضرایب پیشروی پایین، میانی و بالا تقسیم نمود که تغییرات ضریب تراست در هریک از محدوده‌های تعریف شده روندی منحصر به‌خود دارند. نتایج تغییرات ضریب تراست در ضرایب پیشروی پایین (۰/۵ و ۰/۶) که پروانه تحت بارگذاری بالا قرار دارد، نشان می‌دهد که تراست تولیدی با افزایش فاصله بین نواحی جلو و عقب کاهش می‌یابد؛ زیرا نسبت سرعت جریان به سرعت دورانی پروانه در این ضرایب پیشروی کمتر است و جریان سیال با

جدول ۵. اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی پژوهش حاضر.

Table 5. Validation of numerical simulations of present study.

نتایج شبیه‌سازی			نتایج مرجع		درصد خطای نسبی	
J	K_T	$10K_Q$	K_T	$10K_Q$	K_T	$10K_Q$
۰/۵	۰/۲۸۳	۰/۴۸۴	۰/۲۸۵	۰/۴۳۷	۰/۷۰	۱۰/۶۸
۰/۶	۰/۲۲۹	۰/۴۱۰	۰/۲۳۵	۰/۳۷۶	۲/۵۵	۹/۱۳
۰/۷	۰/۱۷۷	۰/۳۳۵	۰/۱۸۵	۰/۳۱۱	۴/۳۲	۷/۶۸
۰/۸	۰/۱۲۸	۰/۲۵۷	۰/۱۳۷	۰/۲۴۷	۶/۵۶	۴/۱۴
۰/۹	۰/۰۷۵	۰/۱۷۵	۰/۰۸۳	۰/۱۸۱	۹/۶۳	۳/۱۶
۱/۰	۰/۰۱۸	۰/۰۸۶	۰/۰۲۲	۰/۰۹۶	۱۵/۷۲	۱۰/۲

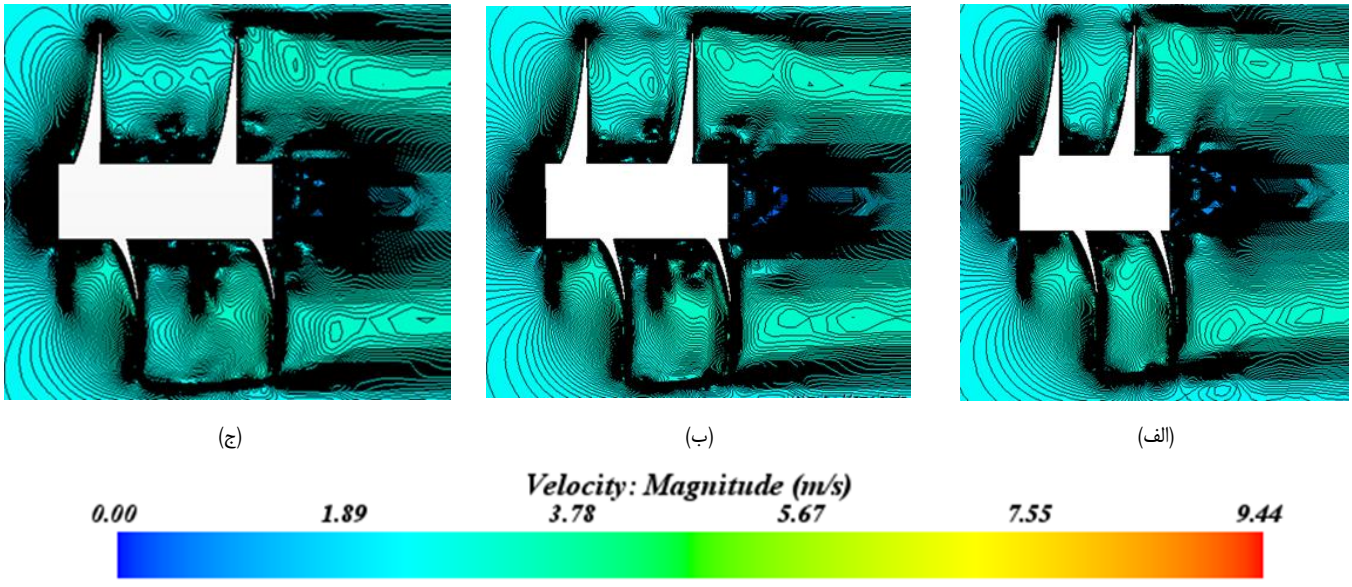


شکل ۱۰. تغییرات ضریب تراست بر حسب تغییر نسبت فاصله برای ضرایب پیشروی مختلف.

Fig. 10. Changes in thrust coefficient versus spacing ratio for various advance ratios.

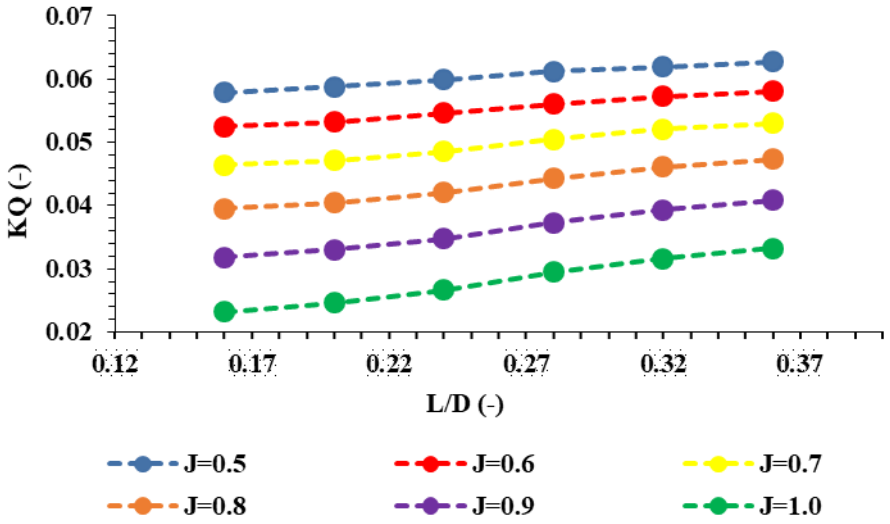
افزایش فاصله بین نواحی جلو و عقب پروانه حلقه‌بسته، کیفیت و یکنواختی خود را در ناحیه داخلی پروانه از دست داده، تراست کاهش می‌یابد. بیشترین تراست در این حالت در کمترین نسبت فاصله (۰/۱۶) مشاهده شده است. این رفتار را می‌توان ناشی از برهم‌کنش شدید جریان در ناحیه داخلی پروانه حلقه‌بسته دانست. در این شرایط، سرعت دورانی بالا بوده و سیال فرصت کافی برای عبور یکنواخت از ناحیه حلقه را ندارد، در نتیجه با افزایش نسبت فاصله نواحی بازچرخش و گرادیان‌های شدید سرعت شکل گرفته و باعث افزایش تلفات ویسکوز و کاهش تراست می‌گردد. تراست تولیدی در ضریب پیشروی ۰/۶ حدود ۱/۵ درصدی نسبت به پروانه KP505 افزایش یافته است. پروانه در ضرایب پیشروی میانی (۰/۷ و ۰/۸) تحت بارگذاری ملایم قرار دارد؛ بنابراین تغییرات ضریب تراست با تغییر فاصله نواحی جلو و عقب مشابه بوده، در هر دو حالت با افزایش فاصله محوری رفتاری غیرخطی مشاهده می‌شود. ضریب تراست ابتدا با افزایش نسبت فاصله افزایش یافته، سپس روندی کاهشی خواهد داشت. بیشترین تراست تولید شده در این حالت در نسبت فاصله ۰/۲۸ به‌دست آمد. به صورتی که ۵/۹ درصد افزایش تراست در ضریب پیشروی ۰/۷ مشاهده شد و ضریب تراست در ضریب پیشروی ۰/۸ حدود ۱۵ درصد نسبت به پروانه KP505 افزایش یافت. در این محدوده، تعادل نسبی بین سرعت پیشروی و سرعت دورانی برقرار شده و ساختار جریان در ناحیه داخلی پروانه پایدارتر می‌شود. به همین دلیل، با افزایش نسبت فاصله، تداخل جریان کاهش یافته و توزیع فشار روی پره‌ها یکنواخت‌تر شده که منجر به افزایش اولیه تراست می‌گردد. بررسی ضرایب پیشروی بالا (۰/۹ و ۱/۰) نیز نشان می‌دهد، ضریب تراست در این حالت که پروانه تحت بارگذاری سبک قرار دارد، با افزایش نسبت فاصله روندی افزایشی دارد و ضریب تراست با افزایش نسبت فاصله افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار تراست در نسبت فاصله ۰/۳۶ تولید شد، زیرا سرعت پیشروی پروانه در این ضرایب پیشروی بالاتر می‌باشد و تداخل جریان در درون ناحیه حلقه‌بسته پروانه ایجاد نمی‌شود. شناور در این حالت دارای سرعت بالاتری است و عملکرد پروانه حلقه‌بسته در تولید تراست بسیار مناسب بوده، افزایش تراست در ضریب پیشروی ۰/۹ حدود ۳۵ درصد خواهد بود. افزایش تراست در ضریب پیشروی ۱/۰ بسیار چشم‌گیر می‌باشد که بیانگر عملکرد مناسب پروانه‌های حلقه‌بسته (از دیدگاه تولید تراست) در ضرایب پیشروی بالاتر است. از دیدگاه فیزیکی در ضرایب پیشروی بالا، کاهش اثرات القایی و تضعیف گردابه‌های ثانویه موجب بهبود کیفیت جریان عبوری از پروانه می‌شود. در این شرایط، افزایش فاصله محوری باعث کاهش تداخل بین بخش‌های جلویی و پشتی پره‌ها شده و در نتیجه انتقال مومنتوم به سیال با کارایی بالاتری انجام می‌گیرد که به افزایش تراست منجر می‌شود.

شکل ۱۱ که کانتور تغییرات سرعت را در اطراف پروانه در حالت‌های مختلف نسبت فاصله در ضریب پیشروی میانی ۰/۸ نشان می‌دهد، برای



شکل ۱۱. کانتور خطوط تغییرات سرعت در اطراف پروانه در حالت‌های مختلف نسبت فاصله الف)۰/۲، ب) ۰/۲۸ و ج) ۰/۳۶ در ضریب پیشروی ۰/۸.

Fig. 11. Contour plots of velocity variations around the propeller at different spacing ratios: a) 0.2, b) 0.28, and c) 0.36.



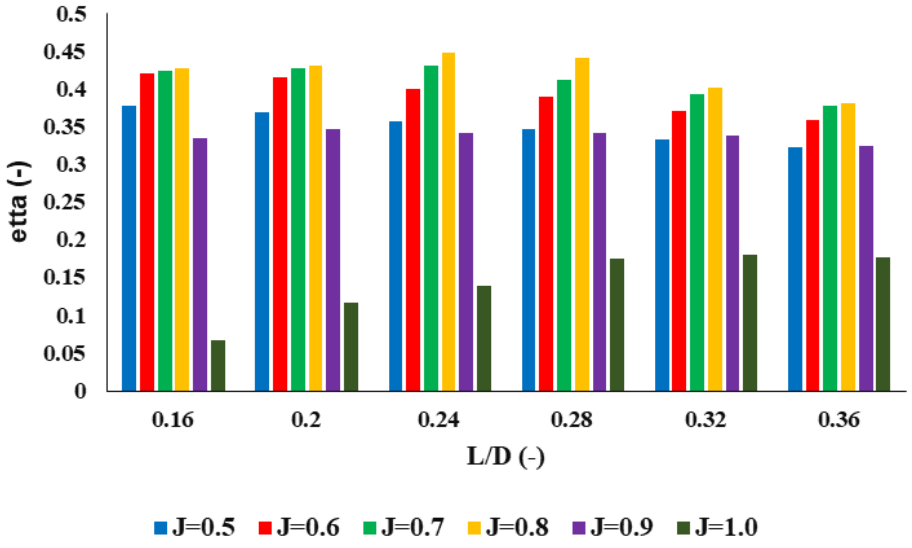
شکل ۱۲. تغییرات ضریب گشتاور بر حسب تغییر نسبت فاصله در ضرایب پیشروی مختلف برای پروانه حلقه بسته.

Fig. 12. Changes in torque coefficient versus spacing ratio at various advance ratios for the toroidal propeller.

بررسی دقیق‌تر اثر تغییر در نسبت فاصله بر عملکرد پروانه حلقه‌بسته ارائه شده است. با توجه به خطوط جریان مشاهده می‌شود که گردابه‌های ایجادشده در پشت ناحیه انتقالی پروانه حلقه‌بسته در نسبت فاصله پایین (۰/۲) دارای شدت بیشتری بوده، تولید تراست پروانه در این نسبت فاصله تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد. گردابه‌های پشت پره‌های پروانه حلقه‌بسته با افزایش نسبت فاصله و در نسبت فاصله میانی (۰/۲۸) کاهش یافته، با جلوگیری از جریان برگشتی باعث عبور مناسب جریان و افزایش تراست می‌شود. تشکیل این گردابه‌ها در پشت پره‌های پروانه حلقه‌بسته با افزایش نسبت فاصله و در نسبت فاصله بالا (۰/۳۶) مجددا مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر در بررسی ضریب تراست پروانه در این ضریب پیشروی نیز اشاره شد، باعث کاهش تراست تولیدی در این نسبت فاصله خواهد شد.

شکل ۱۲ تغییرات ضریب گشتاور را بر حسب تغییر نسبت فاصله در ضرایب پیشروی مختلف را نشان می‌دهد. به صورت کلی مشاهده می‌شود که ضریب گشتاور با افزایش ضریب پیشروی مشابه ضریب تراست یک روند کاهشی خطی دارد. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که ضریب گشتاور با افزایش نسبت فاصله، روندی خطی و نزولی دارد که علت اصلی آن افزایش سطح در معرض جریان به واسطه افزایش سطح ناحیه انتقالی است. هم‌چنین افزایش ضریب گشتاور با افزایش نسبت فاصله را می‌توان به افزایش مقاومت هیدرودینامیکی وارد بر پره‌ها نسبت داد. با پیچیده‌تر شدن مسیر جریان در پروانه حلقه‌بسته، تنش‌های برشی افزایش یافته و انرژی بیشتری برای غلبه بر این مقاومت مورد نیاز است، که این امر به افزایش گشتاور مصرفی منجر می‌شود. بررسی دقیق‌تر شکل، با در نظر گرفتن شیب مربوط به هر یک از خطوط مشخص می‌کند، شیب تغییرات ضریب گشتاور با افزایش ضریب پیشروی افزایش یافته، گشتاور با نرخ شدیدتری روند افزایشی را در فواصل بیشتر طی می‌کند. بنابراین می‌توان گفت: «حساسیت تغییرات گشتاور نسبت به تغییر فاصله در ضرایب پیشروی پایین کم است؛ تا جایی که ضریب گشتاور را در برخی از حالات می‌توان مستقل از نسبت فاصله دانست؛ حساسیت در ضرایب پیشروی بالاتر که پروانه تحت بارگذاری پایین و سبک قرار دارد، افزایش می‌یابد. با توجه به این روند و رابطه بین ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی، در ضرایب پیشروی پایین، بازدهی پروانه اثرپذیری بیشتری از تراست تولیدی پروانه داشته، در ضرایب پیشروی بالاتر این اثرپذیری از ضریب گشتاور بیشتر خواهد بود که این موارد در بررسی بازدهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۱۳ تغییرات بازدهی پروانه را بر حسب تغییر نسبت فاصله برای ضرایب پیشروی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بازدهی روندی غیر خطی داشته، در ضریب پیشروی میانی ۰/۸ به مقدار بیشینه می‌رسد. بررسی دقیق‌تر و ارزیابی اثر تغییر در نسبت فاصله بر تغییرات بازدهی نشان می‌دهد که مشابه روندی که برای تراست پروانه در نظرگرفته شد، افزایش



شکل ۱۳. تغییرات بازدهی پروانه بر حسب تغییر نسبت فاصله برای ضرایب پیشروی مختلف.

Fig. 13. Propeller efficiency changes versus spacing ratio for various advance ratios.

نسبت فاصله در ضرایب پیشروی پایین، باعث کاهش بازدهی می‌شود. کاهش تراست و افزایش گشتاور در این ضرایب پیشروی زمینه‌ساز کاهش بازدهی با افزایش نسبت فاصله می‌باشد. افزایش بازدهی در ضرایب پیشروی بالا نیز با افزایش نسبت فاصله قابل مشاهده است؛ به طوری که بازدهی در ضریب پیشروی ۱/۰ و نسبت‌های فاصله ۰/۳۲ و ۰/۳۶ در حدود ۷ درصد نسبت به پروانه KP505 بیشتر است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که بیشینه بازدهی در ضرایب پیشروی میانی در نسبت فاصله‌های ۰/۲۴ و ۰/۲۸ حاصل شده‌است. به طوری که بیشینه بازدهی در ضریب پیشروی ۰/۸ و در نسبت فاصله ۰/۲۴ برابر با ۴۴/۷۸ درصد به‌دست آمده است. از دیدگاه فیزیکی، بازدهی تابعی از نسبت توان مفید تولیدی به توان مصرفی است. در پروانه حلقه‌بسته، اگرچه افزایش سطح خیس و تلفات ویسکوز موجب افزایش توان مصرفی می‌شود، اما در ضرایب پیشروی بالا، بهبود ساختار جریان و کاهش تلفات القایی باعث افزایش سهم توان مفید شده و در نتیجه بازدهی بهبود می‌یابد. همان‌طور که مشاهده شد بازدهی پروانه حلقه بسته در مقایسه با پروانه‌های متداول دریایی که معمولاً بازدهی بالاتر از ۶۰ درصد دارند، در بخش قابل توجهی از بازه ضریب پیشروی کمتر است. این کاهش بازدهی را می‌توان به ویژگی‌های هندسی خاص این نوع پروانه نسبت داد. به‌طور مشخص، ساختار پیوسته حلقه‌ای پره‌ها منجر به افزایش سطح خیس[1] نسبت به پروانه‌های معمولی می‌شود که در نتیجه آن، نیروی پسا اصطکاکی افزایش یافته و بخشی از انرژی ورودی به‌صورت تلفات ویسکوز از دست می‌رود. با این وجود، یکی از نتایج قابل توجه این پژوهش، بهبود عملکرد پروانه حلقه‌بسته در ضرایب پیشروی بالا است. این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی، الگوی جریان اطراف پروانه حلقه‌بسته به سمت شرایطی حرکت می‌کند که در آن تلفات نسبی کاهش یافته و توزیع بار بر روی پره‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. از دیدگاه فیزیکی، در ضرایب پیشروی بالا، شدت گردابه‌های القایی کاهش یافته و اثرات منفی ناشی از تداخل جریان در ساختار حلقه‌ای کمتر می‌شود، در حالی که مزیت کاهش گردابه‌های نوک پره همچنان حفظ می‌گردد. این موضوع می‌تواند منجر به بهبود نسبت توان مفید به توان ورودی شده و در نتیجه افزایش بازدهی در این محدوده از شرایط کاری گردد. همچنین لازم به ذکر است که در این پژوهش، تنها اثر پارامتر نسبت فاصله به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی طراحی مورد بررسی قرار گرفته و سایر پارامترهای پروانه حلقه بسته ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است که با انجام یک فرآیند بهینه‌سازی چندپارامتری، امکان دستیابی به طراحی‌هایی با بازدهی بالاتر در کنار حفظ یا حتی افزایش تراست وجود خواهد داشت. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده وجود یک مصالحه میان افزایش تراست و بازدهی در پروانه‌های حلقه‌بسته است. در حالی‌که این نوع پروانه قادر به تولید نیروی رانش بیشتر و کاهش گردابه‌های نوک نسبت

1. Wetted Area

به پروانه مرجع می‌باشد، بازدهی آن در برخی شرایط کاهش می‌یابد. با این حال، عملکرد بهتر در ضرایب پیشروی بالا و همچنین قابلیت بهینه‌سازی هندسی، این نوع پروانه را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای کاربردهایی نظیر شناورهای پرسرعت و شرایط عملیاتی خاص تبدیل می‌نماید.

۷- ۳- بهینه‌سازی

بررسی پارامتریک اثر تغییر نسبت فاصله بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی پروانه در بخش گذشته انجام شده است. بر این اساس، نتایج بهینه‌سازی عملکرد پروانه حلقه‌بسته در قالب دستیابی به بهترین نسبت فاصله با بازدهی بیشینه در ادامه ارائه خواهد شد. کانتور سه‌بعدی تغییرات بازدهی بر حسب ضریب پیشروی و نسبت فاصله در شکل ۱۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود، بازدهی با تغییر ضریب پیشروی رفتاری غیرخطی داشته، بازدهی بیشینه در ناحیه ضریب پیشروی میانی به‌دست می‌آید. هم‌چنین بررسی نسبت فاصله نشان می‌دهد، بازدهی در محدوده نسبت فاصله‌های کم تا میانی مقادیر بالاتری دارد و در نسبت فاصله‌های بالا با افت شدیدی مواجه می‌شود. منحنی برازش شکل ۱۴ با دقت مناسب (R^2=۰/۹۸۵۴) استخراج شده است و معادله (۱۳) رابطه‌ی رگرسیونی مربوطه را نشان می‌دهد.

$$\eta\left(J,\frac{L}{D}\right)=1.625-7.07(J)+1.004(\frac{L}{D})$$
$$+12.71(J)^2-3.798(J)(\frac{L}{D})+1.6476(\frac{L}{D})^2 \qquad (۱۳)$$
$$-7.455(J)^3+5.078(J)^2(\frac{L}{D})-4.817(J)(\frac{L}{D})^2$$

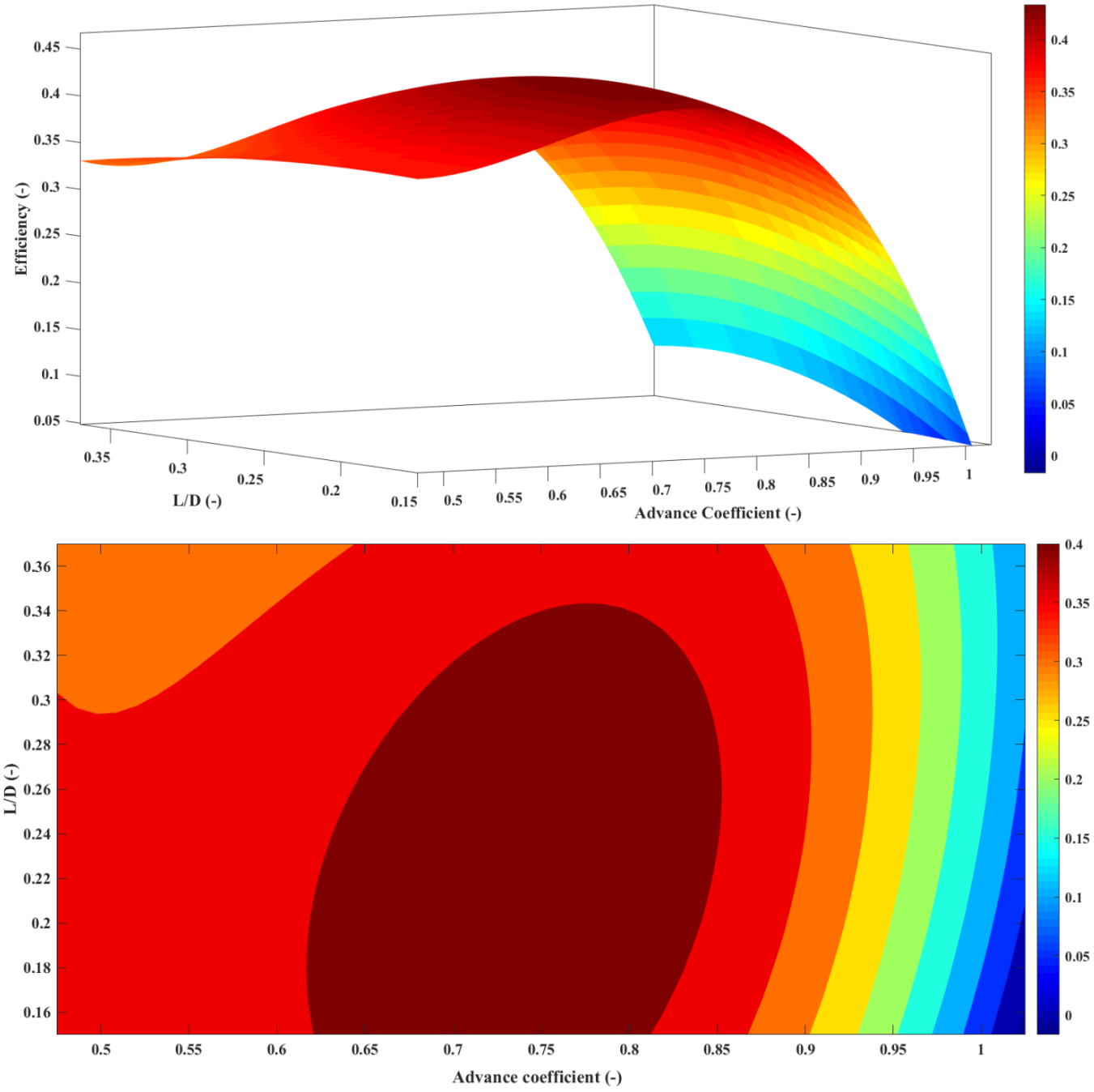
با توجه به این که بیشینه بازدهی پروانه حلقه‌بسته در همه حالات در ضریب پیشروی ۰/۸ حاصل شده‌است، با ثابت در نظر گرفتن این پارامتر و بهینه‌سازی پارامتر نسبت فاصله در محدوده ۰/۱۶ تا ۰/۳۶ می‌توان به نسبت فاصله بهینه ۰/۲۶۴۱ برای پروانه حلقه‌بسته برای بازدهی بیشینه دست یافت. جدول ۶ مقایسه بازدهی پروانه حلقه‌بسته در حالت‌های مختلف و حالت بهینه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش بازدهی نسبت به حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی پروانه حلقه‌بسته حاصل شده‌است.

۷- ۴- عملکرد پروانه حلقه‌بسته بهینه

مقایسه و بررسی ضرایب هیدرودینامیکی و مشخصات جریان حول پروانه حلقه‌بسته بهینه و پروانه پایه KP505 در این بخش ارائه شده است. شکل ۱۵ مقایسه تغییرات ضرایب تراست و بازدهی را برای بارگذاری سنگین (ضریب پیشروی ۰/۵)، بارگذاری میانی (ضریب پیشروی ۰/۸) و بارگذاری سبک (ضریب پیشروی ۱/۰) برای پروانه حلقه‌بسته بهینه و پروانه KP505 نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تراست در پروانه حلقه‌بسته بهینه دارای مقادیر بالاتری نسبت به پروانه KP505 می‌باشد. به صورتی که در بارگذاری سنگین این افزایش تراست جزئی بوده، در ضریب پیشروی ۰/۸ (که در آن بیشینه بازدهی پروانه حلقه‌بسته رخ می‌دهد) در حدود ۲۶ درصد است. هم‌چنین بررسی بازدهی نشان می‌دهد که پروانه حلقه‌بسته در ضرایب پیشروی پایین و میانی بازدهی پایین‌تری نسبت به پروانه KP505 دارد؛ اما پروانه حلقه‌بسته در ضرایب پیشروی بالا، بازدهی بالاتری نسبت به پروانه KP505 خواهد داشت. به صورتی که در ضریب پیشروی ۱/۰ پروانه حلقه‌بسته دارای ۷/۸۴ درصد بازدهی بیشتر نسبت به پروانه KP505 می‌باشد. زیرا تراست در این ضریب پیشروی نسبت به پروانه KP505 افزایش چشم‌گیری دارد.

مقایسه مشخصات جریان اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه و پروانه KP505 در ادامه ارائه شده است. شکل ۱۶ کانتور تغییرات سرعت را در راستای جریان اطراف پروانه در ضرایب پیشروی مختلف برای پروانه حلقه‌بسته بهینه و پروانه KP505 نشان می‌دهد. در این شکل جهت امکان تعمیم نتایج و بررسی دقیق‌تر از فرم بدون بعد سرعت به شکل V/V_A استفاده شده است که نشان دهنده نسبت سرعت جریان اطراف پروانه به سرعت پیشروی آن است. مشاهده می‌شود که سرعت جریان پشت پروانه با افزایش ضریب پیشروی افزایش می‌یابد؛ زیرا سرعت ورودی به پروانه با افزایش ضریب پیشروی افزایش خواهد یافت. هم‌چنین مقایسه سرعت جریان برای پروانه حلقه‌بسته و پروانه KP505 نشان می‌دهد که سرعت جریان در پشت پروانه حلقه‌بسته بهینه در ضرایب پیشروی ثابت دارای مقادیر بیشتری نسبت به پروانه KP505 است که زمینه‌ساز افزایش تراست در ضرایب پیشروی مختلف برای این پروانه می‌شود.

تغییرات فشار در اطراف پروانه‌ها برای بررسی دقیق‌تر مشخصات جریان در ضریب پیشروی ۰/۸ بررسی شده است (شکل ۱۷). برای برای این منظور جهت بررسی دقیق‌تر و امکان تعمیم از کانتور تغییرات ضریب فشار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب فشار در اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه دارای مقادیر بالاتری نسبت به پروانه KP505 می‌باشد که می‌تواند موجب افزایش تراست تولیدی و کاهش احتمال ایجاد پدیده کاویتاسیون در روی سطح پره‌ها و اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه نسبت به پروانه KP505



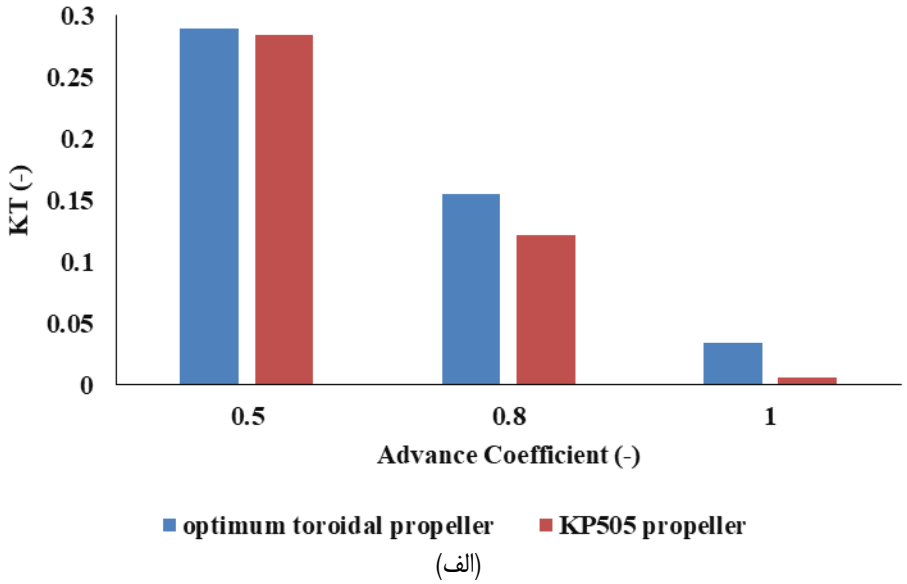
شکل ۱۴.کانتور سه‌بعدی تغییرات بازدهی بر حسب ضریب پیشروی و نسبت فاصله برای پروانه حلقه بسته.

Fig. 14. 3D contour plot of efficiency changes versus advance ratio and spacing ratio for the toroidal propeller

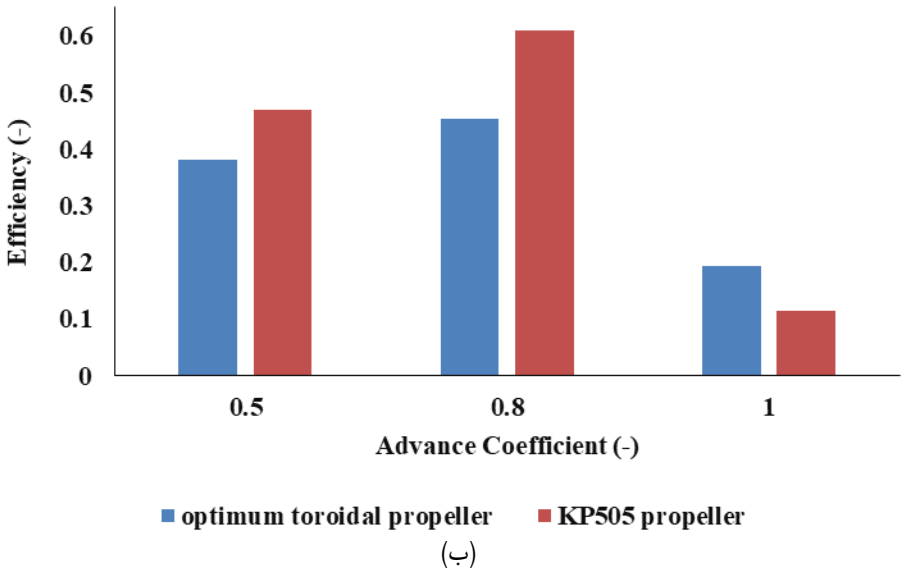
جدول ۶. مقایسه بازدهی پروانه حلقه‌بسته در حالت بهینه و سایر حالت‌ها.

Table 6. Comparison of toroidal propeller efficiency in optimal and other states .

Advance coefficient	L/D	Efficiency
۰/۸	۰/۲۰	۰/۴۳۰۳
۰/۸	۰/۲۴	۰/۴۴۷۸
۰/۸	۰/۲۶۴۱	۰/۴۵۳۵
۰/۸	۰/۲۸	۰/۴۴۱۵



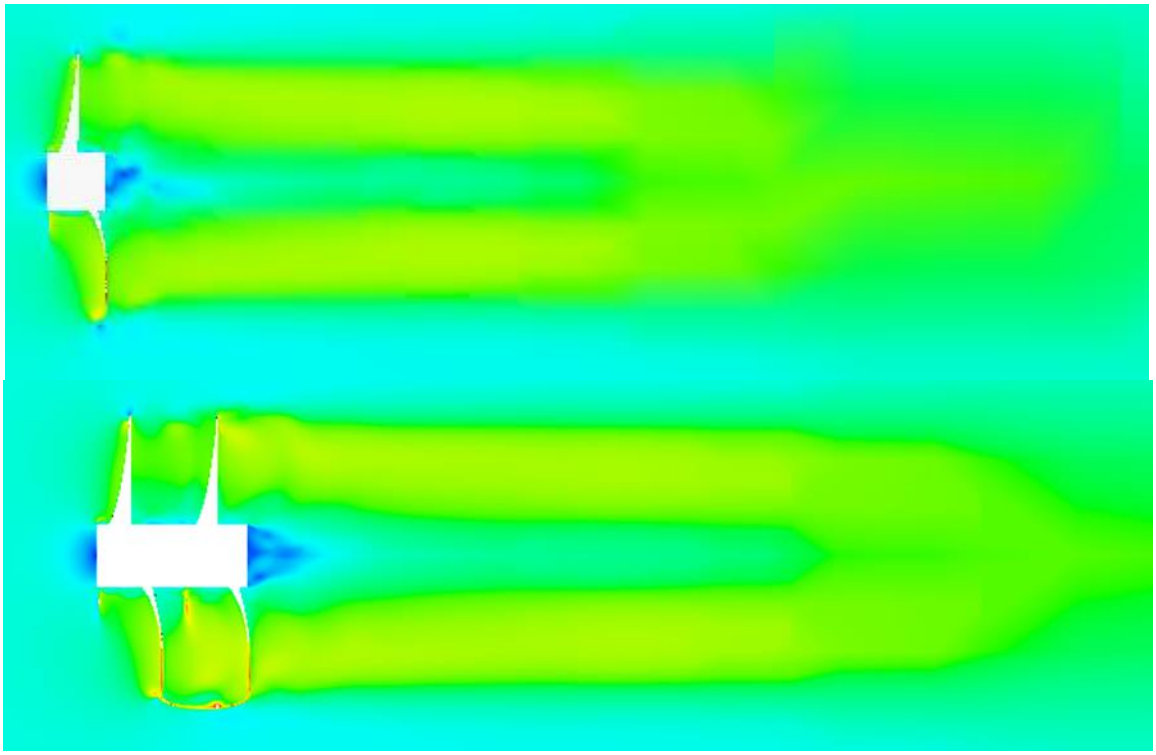
(الف)



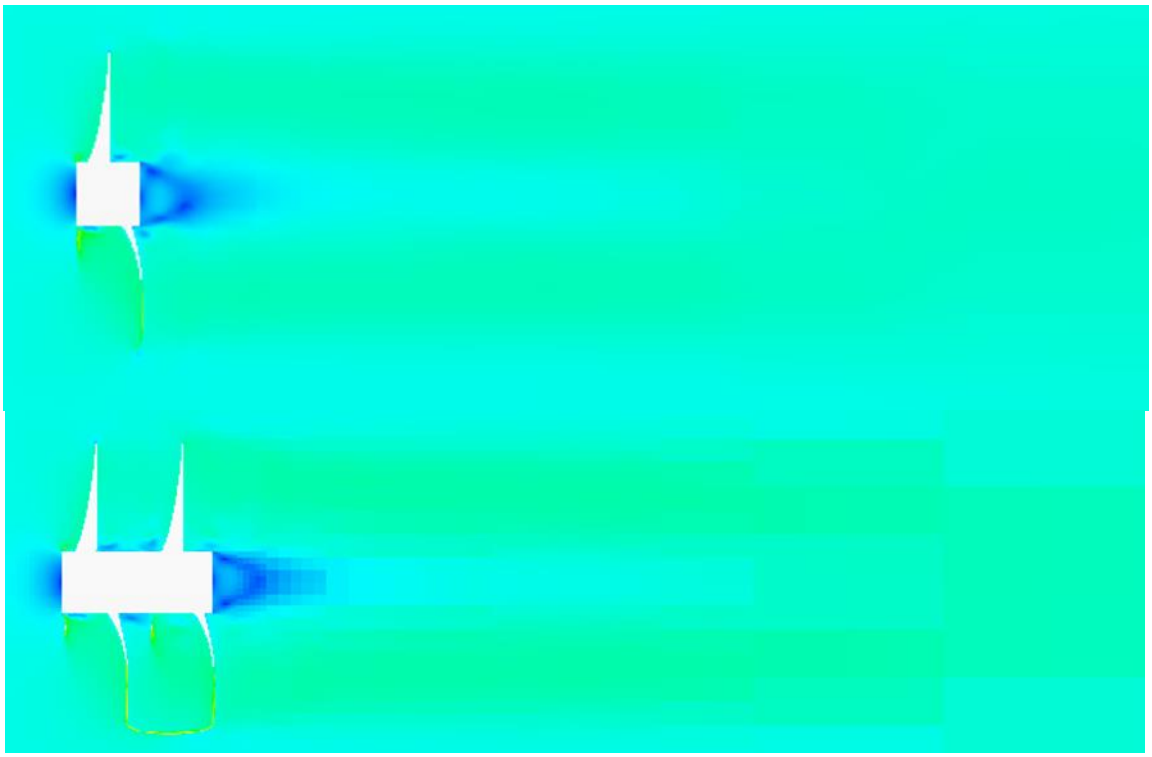
(ب)

شکل ۱۵. مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه حلقهبسته بهینه و پروانه KP505.

Fig. 15. Comparison of hydrodynamic coefficients of the optimal toroidal propeller and the KP505 propeller.



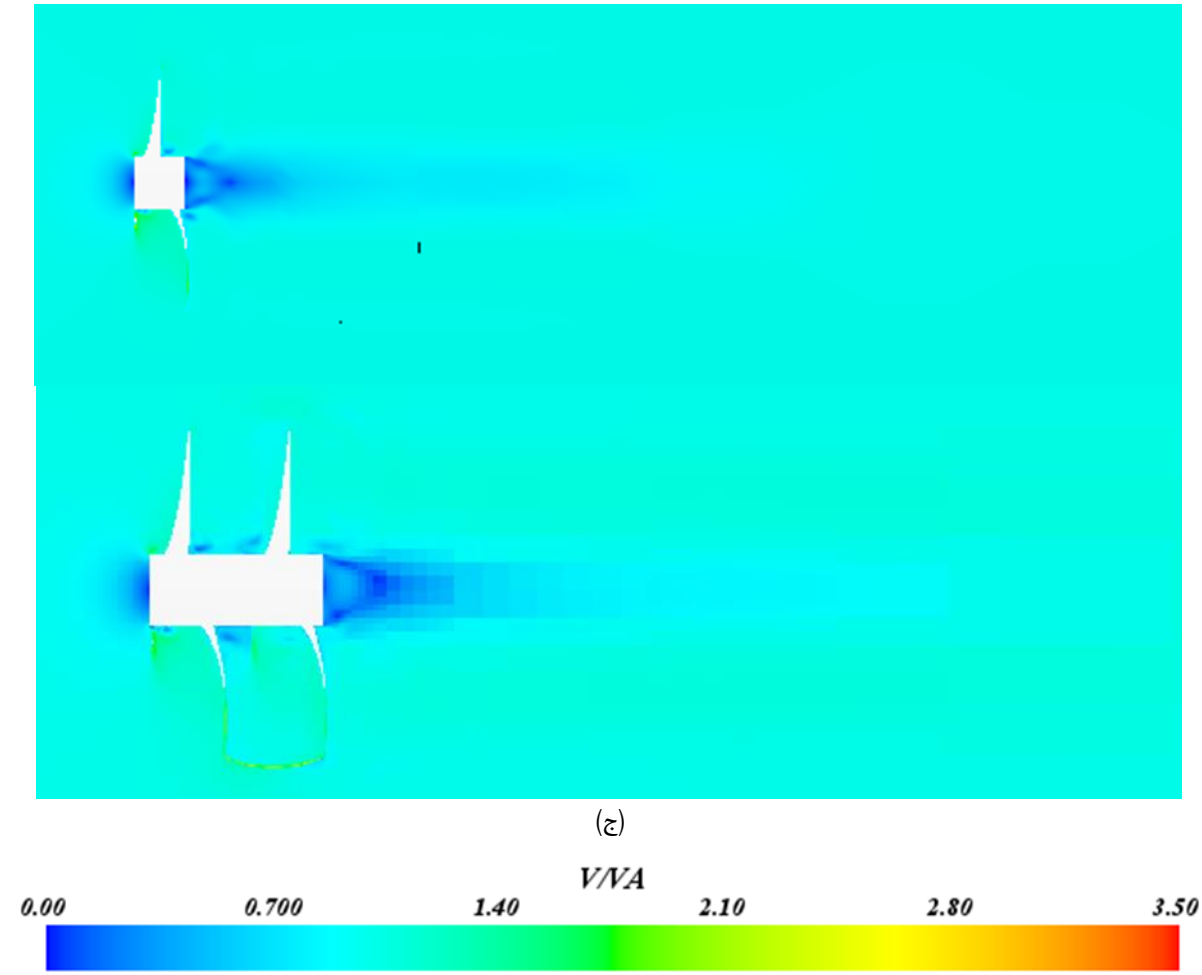
(الف)



(ب)

شکل ۱۶. کانتور تغییرات سرعت در راستای جریان اطراف پروانه در ضرایب پیشروی مختلف را برای پروانه حلقهبسته بهینه و پروانه KP505 الف) J=۰/۵، ب) J=۰/۸ و ج) J=۱/۰. (ادامه دارد)

Fig. 16. Contour plots of streamwise velocity variations around the propeller for the optimal toroidal propeller and the KP505 propeller at various advance Ratios: a) J = 0.5, b) J = 0.8, and c) J = 1.0. (Continued)



شکل ۱۶. کانتور تغییرات سرعت در راستای جریان اطراف پروانه در ضرایب پیشروی مختلف را برای پروانه حلقهبسته بهینه و پروانه KP505 الف) J=۰/۵، ب) J=۰/۸ و ج) J=۱/۰.

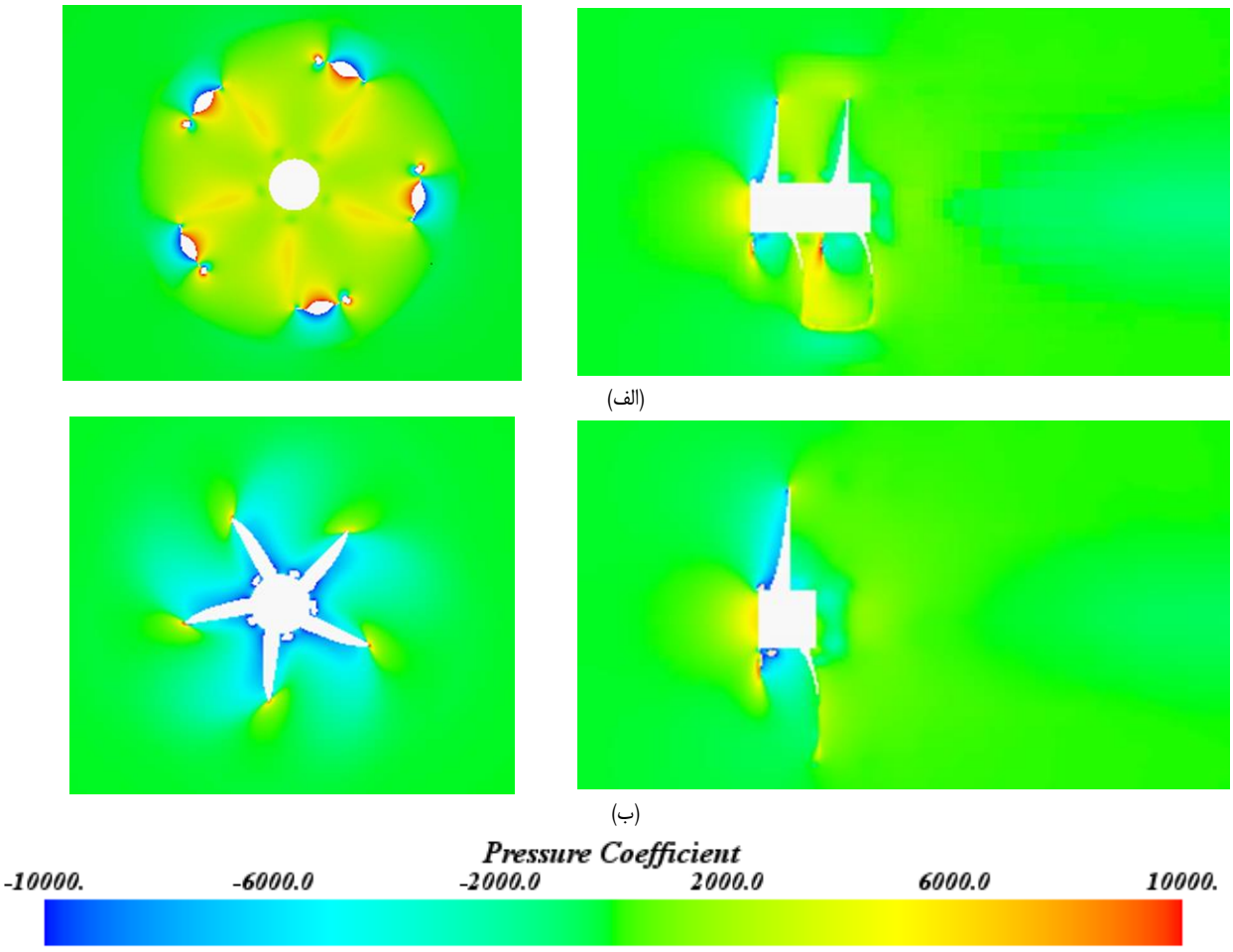
Fig. 16. Contour plots of streamwise velocity variations around the propeller for the optimal toroidal propeller and the KP505 propeller at various advance Ratios: a) J = 0.5, b) J = 0.8, and c) J = 1.0.

در این ضریب پیشروی باشد.

۸- نتیجه‌گیری

اثر تغییر نسبت فاصله بر عملکرد یک پروانه حلقه‌بسته و بهینه‌سازی عملکرد آن در نرم‌افزار استار سی سی ام بررسی عددی شده است. در این راستا، ابتدا پس از تعیین تنظیمات شبیه‌سازی، نتایج تجربی موجود برای پروانه متداول KP505 اعتبارسنجی شد. سپس پروانه‌های حلقه‌بسته در ۶ نسبت فاصله ۰/۱۶، ۰/۲، ۰/۲۴، ۰/۲۸، ۰/۳۲ و ۰/۳۶ شبیه‌سازی شده، پس از تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی شامل ضریب تراست، ضریب گشتاور و بازدهی، نتایج با هدف دستیابی به بیشینه بازدهی پروانه حلقه‌بسته با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی شد. مشخصات عملکردی پروانه حلقه‌بسته بهینه و پروانه متداول KP505 پس از دستیابی به نسبت فاصله بهینه مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج کلی و مهم این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- ضریب گشتاور پروانه حلقه‌بسته با افزایش نسبت فاصله روند صعودی دارد.
- ضریب تراست پروانه حلقه‌بسته با افزایش نسبت فاصله، در ضرایب پیشروی پایین روند نزولی، در ضرایب پیشروی میانی روند غیرخطی و



شکل ۱۷. مقایسه تغییرات ضریب فشار در ضریب پیشروی ۰/۸ برای الف) پروانه حلقه بسته بهینه و ب) پروانه KP505.

Fig. 16. Comparison of pressure coefficint variations at an advance ratio of 0.8 for a) The optimal toroidal propeller and b) The KP505 propeller

در ضرایب پیشروی بالا روند صعودی دارد.

- نسبت فاصله بهینه برابر با ۰/۲۶۴۱ به‌دست آمد که مربوط به بیشینه بازدهی پروانه حلقه‌بسته برابر با ۴۵/۳۵ درصد می‌باشد.
- پروانه حلقه‌بسته بهینه قابلیت افزایش تراست تولیدی به میزان ۲۶ درصد (در ضریب پیشروی ۰/۸) نسبت به پروانه متداول KP505 داشت.
- بازدهی پروانه حلقه‌بسته بهینه در ضریب پیشروی ۱/۰ به میزان ۷/۸۴ درصد نسبت به پروانه KP505 افزایش یافت.
- پروانه حلقه‌بسته باعث افزایش سرعت جریان در پشت پروانه شد که افزایش تراست تولیدی را در پی داشت.
- مقادیر فشار در اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه دارای مقادیر بالاتری نسبت به پروانه KP505 می‌باشد که می‌تواند موجب کاهش احتمال ایجاد پدیده کاویتاسیون در روی سطح پره‌ها و اطراف پروانه حلقه‌بسته بهینه باشد.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر پروانه، m	
J	ضریب پیشروی، -	
K_T	ضریب تراست، -	

K_Q	ضریب گشتاور، -
L	فاصله نواحی پروانه حلقه بسته، m
n	سرعت دورانی، rps
Q	گشتاور مقاومتی ، N.m
T	نیروی تراست ، N
V_a	سرعت پیشروی، m/s

علائم یونانی

η	بازدهی، -
ρ	چگالی، kg/m^3

منابع

[1] M. Beykani, R. Shafaghat, a. Yousefi, M. Yousefifard, Experimental study of scale effect and immersion ratio on the performance characteristics of a surface piercing propeller, Marine Engineering, 18(35) (2022) 129-140.

[2] M. Barzegar Rahimi, Barzegar Rahimi, Y., and Salari, M., "Investigation of the effect of creating a vertical groove on the blade surface of a surface-piercing propeller," Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, vol. 56, pp. 765-790, 2024. (In Persian).

[3] M.N. H. Sirousi, Numerical study and hydrodynamic analysis of Sharrow propeller, Journal of Marine Engineering, 20(44) (2024) (in Persin).

[4] H. Jansen, Impact of toroidal propeller design on unmanned aerial vehicle acoustic signature and aerodynamic performance, Int. J. Aerosp. Eng.(IJASE), 2 (2024) 1-11.

[5] I. Gabriel, I. Simion, Performance of 3D printed conventional and toroidal propeller for small multirotor drones, Journal of Industrial Design and Engineering Graphics, 18(1) (2023) 27-32.

[6] M. Chirita, A. Ieta, Toroidal counter electrode for ionic propulsion, Scientific Reports, 12(1) (2022) 19002.

[7] А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник, О способах повышения эффективности водоходных движителей, Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 48(3) (2021) 39-51.

[8] Y. Liyu, W. Chao, S. Cong, G. Chunyu, Mathematical expression method for geometric shape of toroidal propeller, Chinese Journal of Ship Research, 19(3) (2024) 224-233.

[9] A. Attar, S.M. Deshmukh, A. Shinde, Advancements in Marine Propulsion: Design, Development, and Testing of a Bionic-Toroidal Propeller.

[10] А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник, К вопросу об эффективности рабочего процесса петлевидных гребных винтов, Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение», 7(2) (2023) 15-21.

[11] E.M.K. E.V. Georgiev, E.N. Tanase, Investigating The Application Of A Toroidal Propeller In Vessels Through Fluid Dynamics Simulation, Proceedings Of University Of Ruse, 62 (2023).

[12] C. Wang, S. Liu, K. Xia, C. Wang, L. Ye, Numerical research on hydrodynamic performance of toroidal propeller under the influence of geometric parameters, Ocean Engineering, 314 (2024) 119704.

[13] Z. Tang, W. He, Z. Li, Research on the Open-Water Performance and Tip-Vortex of Toroidal Propeller, in: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2024, pp. ISOPE-I-24-582.

[14] H. Sirousi, M. Negahdari, Numerical study and hydrodynamic analysis of Sharrow propeller, Journal Of Marine Engineering, 20(44) (2024) 24-39.

[15] H.M. C. Grover, J. Lewis, J. Lin, S. Lupica-Tondo, Enhancing Marine Propulsion Efficiency: Design, Simulation, And Testing Of A High-Efficiency Toroidal Propeller For Solar Splash Competition, Advanced Mechanical Design, University of Rochester, (2024).

[16] P. Xu, Y. Guo, L. Ye, K. Song, Hydrodynamic Performance of Toroidal Propeller Based on Detached Eddy Simulation Method, Journal of Marine Science and Engineering, 12(12) (2024) 2132.

[17] J. Wu, Q. Wang, H. Deasy, J. Hang, A Study on the Effect of Toroidal Propeller Parameters on Efficiency and Thrust, Energies, 17(23) (2024) 5938.

[18] A. Nadery, H. Bahrami, A. Najafi, H. Ghassemi, M. Aminzadeh, G. He, Numerical investigation of toroidal propeller: hydrodynamic and hydroacoustic study, Ships and Offshore Structures, (2025) 1-16.

[19] J. Masud, J. Rafique, A. Kazmi, M.M. Safdar, A Study on Converting a Conventional Marine Propellor to Its Toroidal Equivalent and Evaluating Its Performance, in: AIAA SCITECH 2025 Forum, 2025, pp. 1885.

[20] J. Bai, Y. Li, X. Liu, H. Zhang, L. Ren, Hydrodynamic Performance and Vortex Structure Analysis of a Toroidal Propeller, Journal of Marine Science and Engineering, 13(6) (2025) 1046.

[21] L.S. L. Peng, Design of a new parametric method for low-noise toroidal propeller and its hydrodynamic noise study, Chinese Journal of Ship Research, 21 (2025).

[22] A. Lungu, Numerical simulation of the cavitating KP505 propeller working in open water conditions, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2018, pp. 042035.

[23] H. Haimov, J. Vicario, J. Del Corral, RANSE code application for ducted and endplate propellers in open water, in: Proceedings of the Second International Symposium on Marine Propulsors, 2011, pp. 1-9.

[24] M. Zamani, R. Shafaghat, B. Alizadeh Kharkeshi, Numerical study of the hydrodynamic behavior of an archimedes screw turbine by experimental data in order to optimize turbine performance: The genetic algorithm, Journal of Applied and Computational Mechanics, 9(4) (2023) 1060-1075.

[25] S.H. Rhee, S. Joshi, CFD validation for a marine propeller using an unstructured mesh based RANS method, in: Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2003, pp. 1157-1163.

[26] A. Lungu, Energy-saving devices in ship propulsion: effects of nozzles placed in front of propellers, Journal of Marine Science and Engineering, 9(2) (2021) 125.

[27] R. Farhangi, R. Shafaghat, M. Zamani, B. Alizadeh Kharkeshi, Experimental Investigation of the Effects of Distance Ratio and Diameter Ratio on the Hydrodynamic Coefficients of the Tandem Canard Configuration of the KP505 Propeller, International Journal of Engineering, 39(9) (2026) 2309-2325.

[28] M. Zamani, R. Shafaghat, B. Alizadeh Kharkeshi, Enhancing Performance Evaluation of Archimedes Screw Turbines under Optimal Conditions: A Focus on Flow Rate Analysis, Empirical Equations, and Comparative Scaling Methods, Iranica Journal of Energy & Environment, 15(2) (2024) 123-134.

[29] B.A. Kharkeshi, R. Shafaghat, O. Jahanian, R. Alamian, K. Rezanejad, Experimental study of an oscillating water column converter to optimize nonlinear PTO using genetic algorithm, Energy, 260 (2022) 124925.

[30] J. Fujisawa, Y. Ukon, K. Kume, Local velocity field measurements around the KCS model (SRI MS No. 631) in the SRI 400 m towing tank: ship performance division report: 00-003-02, Sl]: Ship Research Institute, 2000.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Hasan Ahmadi, R. Shafaghat, M. Zamani, B. Alizadeh Kharkeshi, Numerical Optimization of the Spacing Ratio in a Marine Toroidal Propeller Using CFD and Genetic Algorithm with Comparison to the KP505 Reference Propeller, Amirkabir J. Mech Eng., 57(10) (2026) 1359-1386.

DOI: 10.22060/mej.2026.25245.7933