



Investigating the effect of creating a vertical groove on the surface of a semi-submerged propeller blades

Mojtaba Barzegar Rahimi¹, Yasin Barzegar Rahimi², Mahmoud Salari^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

² Department of Chemical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

ABSTRACT: The semi-submerged propeller is a type of marine propeller that is used in high-speed vessels. This propeller has attracted designer's attention; because it resists the destructive phenomenon of cavitation. Also Semi-submerged propellers have suitable thrust and torque stability at high speeds and offer high maneuverability. Therefore, further investigation around it is important. The current research aims to examine the effect of creating a vertical groove on the surface of the blades of a semi-submerged propeller, an idea inspired by the grooved or corrugated surface on the bottom of some high-speed vessels. The propeller examined in this study is the semi-submerged propeller 841-B known as Olofsson. The 3D domain meshing and numerical simulation have been done in the Star CCM software. The specific condition considered in this numerical simulation is a submergence depth ratio of 33%, an advance coefficient of 0.8, a cavitation number of 2.3, a Froude number of 6, and a shaft angle of zero degrees (horizontal position). The results showed that the efficiency of the grooved propeller is 44.5%, which is less than the efficiency of the ungrooved propeller. In the end, it can be said that the created groove has an adverse effect on the efficiency and performance of the propeller and it is not recommended to use it in the working conditions of the investigated propeller.

Review History:

Received: May, 06, 2024

Revised: Jul. 30, 2024

Accepted: Oct. 06, 2024

Available Online: Oct. 16, 2024

Keywords:

Grooved Semi-Submerged Propeller

841-B

Numerical Simulation

Star CCM

1- Introduction

Propellers are one of the most important and widely used components of the marine propulsion system. Therefore, it is necessary to investigate the hydrodynamic performance of propellers. By improving them or having access to the knowledge of designing high-efficiency propellers, the thrust force can be increased and the power required to turn the propeller can be reduced. The surface-mounted or semi-submerged propeller is a special type of supercavitation propeller that has recently been proposed and as its name suggests, it works in a semi-submerged mode. It is also used in high-speed boats. This Propeller is of great importance because it resists the destructive phenomenon of cavitation and blade corrosion [1]. According to Hudler and Hacker's research [2], the first patent of semi-submerged propeller was made in the United States of America in 1869. Due to the better thrust of semi-submersible propellers, these propellers are widely used recently [3]. In another research, Hacker [4] did some tests on an 8-blade propeller. He concluded that the immersion depth has the greatest effect on the vertical force in a semi-submerged propeller. Ferrando and her colleagues [5] in 2002 investigated the effects of immersion depth and axis angle on propeller performance. Olofsson [6] designed a semi-submersible propeller named 841-B in 1993. In 1996, he analyzed the effect of horizontal and vertical axis angles

on the performance and efficiency of 841-B semi-submerged propeller [3]. In this research, the effect of creating a vertical groove on the surface of the semi-submerged propeller 841-B has been analyzed. This change is a structural passive control factor. The reason for creating a groove on the surface of a semi-submerged propeller and adopting this innovative idea is based on creating a fracture in the bottom of high-speed boats to increase speed and efficiency and improve its performance. The purpose of this research was to investigate the effect of creating a vertical groove on the surface of the semi-submerged 841-B propeller on the efficiency, performance, and distribution of pressure and shear stress on the surface of the propeller blades.

2- Methodology

The present problem is the numerical simulation of the semi-submerged 841-B propeller in the state with and without grooves (with vertical grooves on its surface). The said propeller consists of 4 blades and has a diameter of 250 mm. Figure 1 is a view of the entire solution domain.

Numerical simulation is done in Star CCM software. The time step is 0.0003 seconds. The maximum residuals for solving the equations are considered to be 10^{-3} . In this numerical simulation, the immersion depth ratio is 33%, the

*Corresponding author's email: m.salari@gmail.com



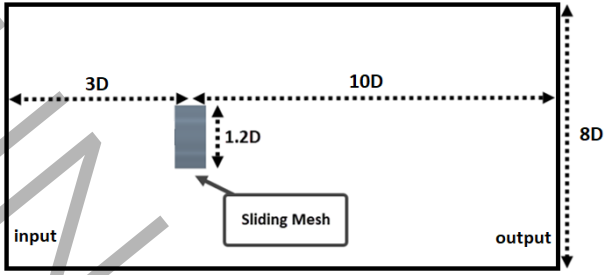


Fig. 1. Fixed solution domain in the simulation of the semi-submerged propeller model 841-B

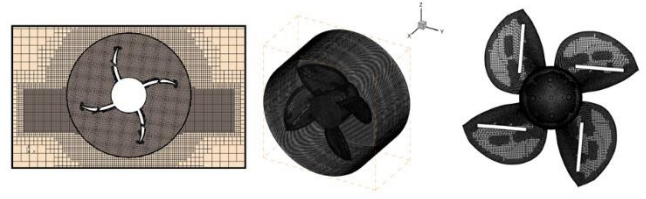


Fig. 3. Meshing of the sliding area and the surface of the propeller without grooves

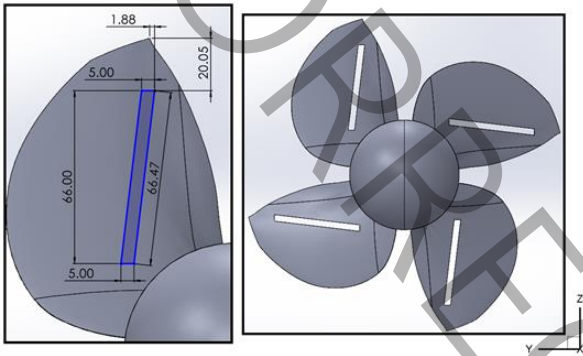


Fig. 2. Grooved propeller 841-B and dimensions and size of the groove on the surface of the blade.

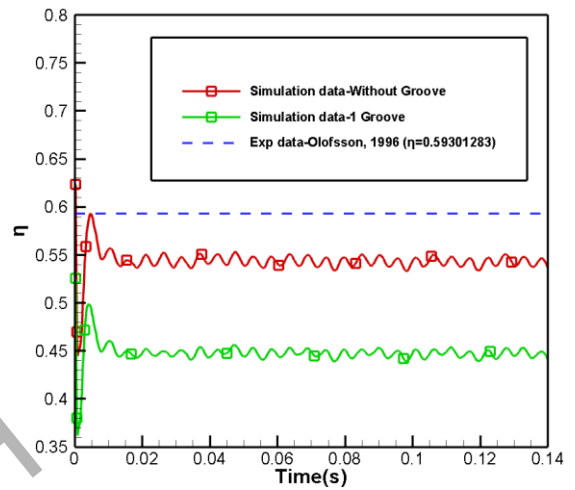


Fig. 4. Efficiency diagram for non-groove and grooved propeller

advance coefficient is 0.8, the cavitation number is 2.3, the Froude number is 6, and the axis angle is zero (horizontal mode). Also, the rotational speed of the propeller is 295 rad/s and the floating speed is 9.39 m/s [3]. Figure 2 is a picture of the 841-B grooved propeller and the dimensions of the groove (dimensions are in millimeters).

The meshing image of the slotted propeller is shown in Figure 3.

In this research, the independence of the results from the grid has been investigated. The error of the results in this process is less than 5%. In this research, meshing with the number of cells 5379757 for the propeller without grooves and with the number of cells 5383196 for the grooved mode is used. Experimental results are not available for 841-B slotted impeller. For this reason, the results of the numerical solution of the propeller without grooves have been compared with the experimental results of Olofsson [3]. The highest error obtained is related to the efficiency of the propeller (-9.078 percent) and all the errors are below 10%, which is acceptable.

3- Results and Discussion

Figure 4 is the efficiency diagram for non-grooved and grooved propellers.

Efficiency has decreased in the grooved state and its average value is 44.5% in the state where the graph is stable.

4- Conclusion

The results indicate that the efficiency of the grooved propeller at the advance coefficient of 0.8 is 44.5%. This efficiency value has decreased by 18.147% compared to the propeller without grooves and by 24.96% compared to Olofsson's experimental data [3]. In the grooved state, the range of the thrust coefficient has increased by 153.3% and the range of the torque coefficient has increased by 25%. In general, as summary, the presence of the groove has affected the performance of the propeller compared to the state without the groove and has reduced its efficiency. In the end, it can be said that the expression of the semi-submerged grooved propeller for the first time and the qualitative explanations and quantitative changes to describe the effect of a vertical groove can be considered as an innovative background and a first step for future research.

References

- [1] J.L. Allison, Propellers for high-performance craft, Marine Technology and SNAME News, 15(04) (1978) 335-380.
- [2] J. Hadler, Performance of partially submerged propellers, 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics-Rome, (August 1968).
- [3] N. Olofsson, Force and flow characteristics of a partially submerged propeller, Chalmers University of Technology, 1996.
- [4] R. Hecker, Experimental performance of a partially submerged propeller in inclined flow, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Florida, 1973.
- [5] M. Fernando, A. Scamardella, N. Bose, P. Liu, B. Veitch, Performance of a family of surface piercing propellers, Royal Institution of Naval Architects. Transactions. Part A. International Journal of Maritime Engineering, 144(Part A1) (2002) 63-77.
- [6] N. Olofsson, A contribution on the performance of partially submerged propellers, Fast '93, 2nd Intl Conf on Fast Sea Transportation; 13-16 Dec 1993; Yokohama, Japan, 1 (1993) 765.

بررسی اثر ایجاد یک شیار عمودی بر سطح پره‌های یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق

مجتبی برزگر رحیمی^۱، یاسین برزگر رحیمی^۲، محمود سالاری^{۱*}

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

کلمات کلیدی:

پروانه‌ی نیمه‌مغروق شیاردار
841-B
شبیه‌سازی عددی
استار سی‌سی‌ام

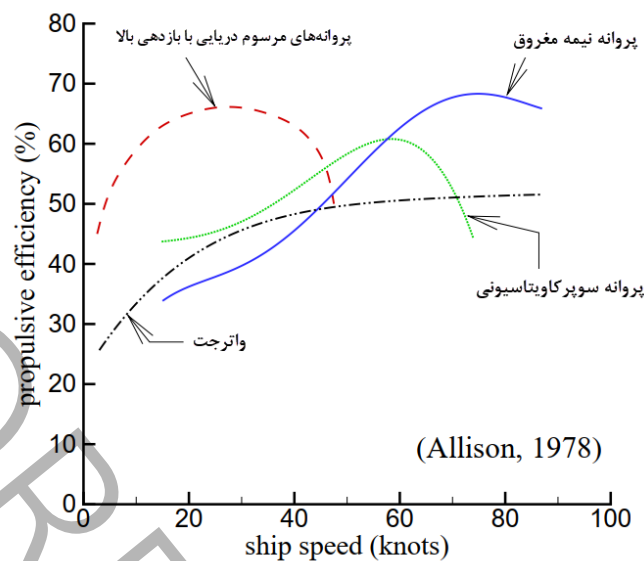
خلاصه: پروانه‌ی نیمه‌مغروق نوعی از پروانه‌های دریایی است که در شناورهای تندرو از آن استفاده می‌شود. این پروانه مورد توجه طراحان قرار گرفته است؛ زیرا در اعداد کاویتاسیون نسبتاً زیاد، دچار پدیده‌ی کاویتاسیون نمی‌شود. همچنین پروانه‌های نیمه‌مغروق در سرعت‌های بالا از پایداری رانشی و گشتاوری مناسبی برخوردار هستند و مانورپذیری بالایی هم دارند. از این رو بررسی بیشتر پیرامون آن، حائز اهمیت است. پژوهش پیش رو با هدف بررسی اثر ایجاد یک شیار عمودی بر سطح پره‌های یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق انجام شده و ایده‌ی آن بر گرفته از سطح شیاردار یا کنگره‌دار در کف برخی شناورهای تندرو است. پروانه‌ی مورد بررسی در این پژوهش، پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B موسوم به الفسون می‌باشد. شبکه‌بندی دامنه‌ی حل سه بعدی و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام انجام شده است. حالت مورد نظر در این شبیه‌سازی عددی، نسبت عمق غوطه‌وری ۳۳٪، ضریب پیشروی ۰/۸، عدد کاویتاسیون ۲/۳، عدد فرود ۶ و زاویه‌ی صفر محور (حالت افقی) است. نتایج حاکی از آن است که بازدهی پروانه‌ی شیاردار ۴۴/۵٪ می‌باشد که این مقدار از بازدهی پروانه‌ی بدون شیار کمتر است. در انتها می‌توان گفت که شیار ایجاد شده، اثر نامطلوب بر بازدهی و عملکرد پروانه داشته و در عمل استفاده از آن در شرایط کاری پروانه‌ی مورد بررسی، توصیه نمی‌شود.

۱- مقدمه

پروانه‌ها جزء مهم‌ترین و پرکاربردترین اجزای سیستم رانش دریایی هستند؛ بنابراین نیاز هست تا عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ها مورد بررسی قرار گیرند. با بهبود آن‌ها یا دسترسی به دانش طراحی پروانه‌های با بازدهی بالا، می‌توان نیروی رانش را افزایش و توان لازم برای چرخاندن پروانه را کاهش داد. با کاهش توان می‌توان در مصرف سوخت صرفه‌جویی کرد و برد عملیاتی شناور را افزایش داد. پروانه‌ی سطح‌رو یا نیمه‌مغروق نوع خاصی از پروانه‌های سوپرکاویتاسیونی است که به تازگی مطرح شده و همانطور که از نام آن پیداست، در حالت نیمه‌مغروق عمل می‌کند. در شناورهای تندرو نیز از آن استفاده می‌شود. این پروانه مورد توجه طراحان قرار گرفته است؛ زیرا در برابر پدیده‌ی مخرب کاویتاسیون و خوردگی پرها مقاومت می‌کند. در طراحی آن باید به پارامترهایی از جمله پایداری، مانورپذیری و عملکرد مناسب در سرعت‌های کاری مختلف، دقت شود. دلیل اصلی استفاده از این نوع پروانه‌ها، بازدهی بالای آن نسبت به دیگر سیستم‌های رانشی مانند

جت آب و پروانه‌های سوپرکاویتاسیون برای سرعت‌های زیاد شناور است. از دلایل دیگری که می‌توان به اهمیت این پروانه‌ها اشاره کرد این است که در سرعت‌های بالای ۶۵ نات، سیستم رانشی دیگری توانایی رقابت با آن را ندارد (شکل ۱، پژوهش آلیسون) [۱].

این نوع پروانه‌ها به دلیل اینکه بخشی از پروانه و ملحقات آن بیرون از آب هستند، نیروی اصطکاک کمتری دارند. همچنین پروانه‌های نیمه‌مغروق در سرعت‌های بالا از پایداری رانشی و گشتاوری مناسبی برخوردار هستند و مانورپذیری بالایی هم دارند. به همین دلیل، تحلیل و بررسی پروانه‌های نیمه‌مغروق از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرف دیگر این نوع پروانه‌ها به دلیل داشتن شرایط خاص، مانند هندسه‌ی پیچیده، دو فاز بودن محیط اطراف پروانه و سرعت چرخشی زیاد و سرعت زیاد شناور، تحلیل هیدرودینامیکی پیچیده‌تری نیز دارند. ساختار ایجاد نیروی رانش در پروانه‌های نیمه‌مغروق بدین گونه است که جلوی پروانه ناحیه‌ی پرفشار یا خیس و در پشت پروانه ناحیه‌ی کم‌فشار یا خشک قرار دارد. میزان پرفشار بودن ناحیه‌ی جلوی پروانه



شکل ۱. مقایسه‌ی بازدهی دستگاه‌های مختلف با توجه به پژوهش آلپسون [۱]

Fig. 1. Comparing the efficiency of different devices according to Alison's research [1]

پره و نیروی میانگین پروانه به دست آورد [۳]. ناگفته نماند که انجام تست مدل‌ها بسیار گران‌قیمت هستند؛ بنابراین استفاده از روش‌های عددی در کنار روش‌های تجربی و آزمایشگاهی ضروری می‌باشد. شیب [۴] در سال ۱۹۵۳ اولین مطالعات را بر روی اثر عدد وبر انجام داد و به این نتیجه رسید که کشش سطحی مایع بر هوادهی پروانه‌ها تأثیر دارد. نتیجه دیگر آن این است که هوادهی کامل در ضریب پیشروی بحرانی (J_{CR}) که مقدار مشخصی دارد، اتفاق افتاده است. هادلر و هکر [۲] در سال ۱۹۶۸ دو حالت هوادهی جزئی و هوادهی کامل برای پروانه‌ی نیمه‌مغروق را تعریف و بیان کردند که در حالت هوادهی جزئی، حباب فقط در لبه‌ی فرار پره به وجود می‌آید ولی در حالت هوادهی کامل، حباب تمام سطح پره را می‌پوشاند. همچنین با بررسی ناحیه‌ی گذرا به دلیل عدم پایدار بودن پروانه متوجه شدند که محور دارای ارتعاش زیادی بوده و دلیل آن این است که پروانه‌ی مورد بررسی آن‌ها دو پره داشته که همین عامل می‌تواند باعث تقویت ارتعاشات شود. در پژوهشی دیگر هکر [۵] نیز برای تعیین اثر زاویه‌ی خط سیر پروانه^۲ و زاویه‌ی عمودی محور بر عملکرد یک پروانه‌ی ۸ پره، آزمایش‌هایی انجام داد و به این نتیجه رسید که عمق غوطه‌وری بیشترین تأثیر را بر نیروی عمودی در پروانه دارد. به عنوان مثال با افزایش عمق غوطه‌وری از ۳۰ درصد به ۵۰ درصد، نیروی

و کم‌فشار بودن پشت پروانه به عوامل متعددی از جمله عمق فرورفتگی پروانه، سرعت دورانی پروانه، سرعت شناور و زاویه‌ی عمودی و افقی محور وابسته است. بیشتر مطالعات و بررسی‌های تجربی و عددی صورت گرفته بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق به صورت انتگرالی بوده‌اند؛ یعنی مطالعه‌ی جریان سیال حول یک پروانه‌ی کامل انجام شده است و نتایج انتگرالی همانند ضرایب رانش و گشتاور بدست آمده است. بر اساس پژوهش هادلر و هکر [۲]، اولین ثبت اختراع پروانه‌ی نیمه‌مغروق در ایالت متحده آمریکا و در سال ۱۸۶۹ میلادی انجام شده است. با گذر زمان از پروانه‌های نیمه‌مغروق در قایق‌های هیدروپلن^۱ و پس از آن در کشتی‌های پرسرعت استفاده شده است [۱]. در سال ۱۹۷۸ میلادی نیروی دریایی ایالت متحده، کشتی SES-100B را در مقیاس اصلی آزمایش کرد و بازدهی بیشتر پروانه‌های نیمه‌مغروق در مقایسه با پروانه‌های مغروق تأیید شد [۱]. به دلیل داشتن نیروی رانشی بهتر پروانه‌های نیمه‌مغروق، اخیراً از این پروانه‌ها به‌طور گسترده استفاده می‌شود؛ زیرا سرعت‌های بالای ۱۰۰ نات هم توسط این پروانه‌ها به ثبت رسیده است [۳]. در گذشته طراحی پروانه‌های نیمه‌مغروق اغلب به صورت سعی و خطا و با اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی مدل‌ها انجام می‌شد. هرچند با استفاده از روش سعی و خطا نمی‌توان اطلاعات کافی در مورد نیروهای دینامیکی

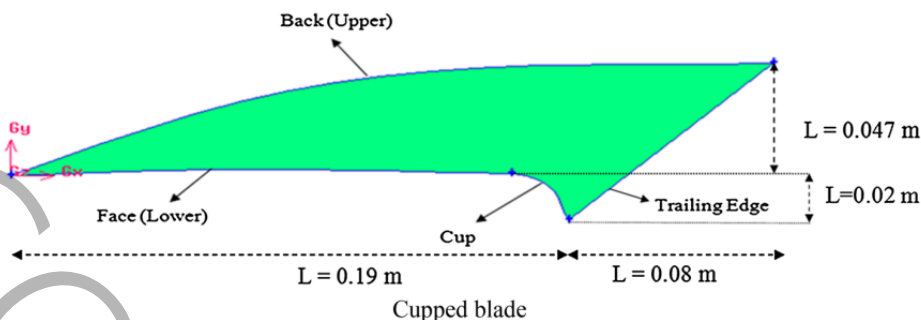
2 Rake angle

1 Hydroplane

بازدهی پروانه را نیز واکاوی کرد. کلر [۱۳] در سال ۱۹۹۵ با استفاده از یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق گام متغیر و چند کرنش‌سنج، تنش پروانه با اندازه‌ی واقعی را در دریا بررسی کرد و اطلاعاتی در خصوص بارگذاری خستگی ارائه داد. دایسون [۱۴] در سال ۲۰۰۰ نیروها و گشتاورها را برای چهار پروانه‌ی سطح‌رو بررسی و بیان کرد که نیروهای افقی و عمودی در شرایط عملکردی متفاوت پروانه به ترتیب حدوداً ۲۷ و ۴۷ درصد نیروی رانش می‌باشند. در یک تحقیق کاربردی یانگ و کیناس [۱۵] برای یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق از نوع 841-B از طریق روش المان مرزی، نیروهای هیدرودینامیکی و هوادهی پروانه را با استفاده از دو روش المان مرزی و روش المان محدود بدست آورده و به بررسی و پیش‌بینی تأثیرات هیدرولاستیکی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که نتایج خوبی در مقایسه با نتایج تجربی بدست آورده‌اند و همچنین نتایج با استفاده از این روش به سرعت همگرا می‌شود؛ اما با این حال در سرعت دورانی زیاد تلفاتی در عملکرد تیغه‌ی پروانه وجود دارد. آن‌ها مطرح کردند که هدف نهایی این پژوهش، توسعه‌ی یک ابزار قوی و قابل اعتماد برای پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیک و هیدرولاستیک پروانه‌ی نیمه‌مغروق بوده است. در سال ۲۰۰۹ کالیفانو و استین [۱۶] به تجزیه و تحلیل هوادهی پروانه‌ی نیمه‌مغروق به کمک آزمایش تجربی شبیه [۴] و کوشان [۱۷] پرداختند. برای این کار از کد تجاری فلوئنت و مدل رنس^۱ برای حل جریان دوفازی ویسکوز و تراکم‌ناپذیر استفاده شده است. نتایج کار آن‌ها گویای آن است که در مورد ضریب رانش تطابق خوبی با نتایج تجربی وجود داشته ولی ضریب گشتاور دارای خطا است. سیف و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۱۶ تأثیر میزان عمق غوطه‌وری مختلف اعم از ۳۳، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و زوایای افقی محور ۰، ۱۰ و ۲۰ درجه را بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق از نوع 841-B با استفاده از روش یورنس^۲ بررسی کردند. قاسمی و یاری [۱۹] در سال ۲۰۱۶ به بررسی جریان‌های هوادهی، توزیع فشار و نیروهای وارد بر پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B پرداختند و نتایج خود را با نتایج تجربی الفسون مقایسه کردند. آن‌ها بطور ویژه تأثیر ناحیه‌ی فنجانی^۳ شکل پره در پروانه‌ی نیمه‌مغروق را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که ساختار، تأثیر بسزایی بر فشار و نیروهای وارد شده دارد. در شکل ۲ ناحیه‌ی فنجانی شکل پره‌ی پروانه‌ی نیمه‌مغروق، نشان داده شده است. در کار مشابه دیگری، قاسمی و یاری [۲۰] در سال ۲۰۱۶ پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B را با استفاده از روش المان مرزی شبیه‌سازی عددی کردند. اثر هیدرودینامیکی و هوادهی

عمودی تا ۵ برابر افزایش داشته درحالی‌که نیروی رانش تا ۲ برابر افزایش می‌یابد. کروپا [۶] در سال ۱۹۷۲ تلاش کرد تا نتایج تست مدل را به پروانه‌ی اصلی تعمیم دهد، به همین دلیل بیان کرد که در حالتی که عدد کاپیتاسیون بین پروانه‌ی مدل شده و پروانه‌ی اصلی برابر باشند، اعداد بی‌بعد فرود، رینولدز و وبر در این زمینه مهم می‌باشند. البته باید توجه شود که این حالت زمانی صحیح است که حباب‌ها کاملاً با هوا پر شده باشند؛ زیرا ممکن است حباب‌های دیگری وجود داشته باشند که فشار داخلی آن‌ها برابر فشار هوا نیست. آلیسون [۱] در سال ۱۹۷۸، با بررسی داده‌های مورد نیاز برای طراحی پروانه، جامع‌ترین روند طراحی پروانه را ارائه داد و همچنین به تطابق موتور و بدنه‌ی شناور تندرو پرداخت. آلیسون پیشنهاد داد که برای طراحی پروانه در حالت مغروق باید به برآمدگی و در حالت نیمه‌مغروق به بیشینه سرعت توجه شود. مجدداً کروپا [۷] در سال ۱۹۹۲، اثرات زاویه‌ی عمودی محور بر عملکرد پروانه را روی پروانه‌ی ۷ پره بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که با افزایش زاویه‌ی عمودی محور، بازدهی پروانه‌ی نیمه‌مغروق کاهش یافته است. رز و کروپا در سال ۱۹۹۱ و همچنین رز و همکارانش در سال ۱۹۹۳ [۸، ۹]، برای اندازه‌گیری نیروی‌های رانش، عمودی و افقی و همچنین گشتاورها، آزمایش‌هایی انجام دادند و با کاهش فشار به عدد کاپیتاسیون ۰٫۲ که برابر با عدد کاپیتاسیون پروانه‌ی اصلی می‌باشد، رسیدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نسبت نیروی عمودی به نیروی رانش در اعماق غوطه‌وری بالا، حدوداً ۰٫۶ است ولی با کاهش عمق غوطه‌وری این نسبت کاهش می‌یابد. فراندو و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۲ اثرات عمق غوطه‌وری و زاویه‌ی محور بر عملکرد پروانه را بررسی کردند. فراندو و اسکاماردلا [۱۱] در سال ۱۹۹۶ اثر عمق غوطه‌وری بر عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق را تحلیل کرده و نمودار ضریب رانش برحسب عمق غوطه‌وری و ضریب پیشروی را به دست آوردند. الفسون [۱۲] در سال ۱۹۹۳ پروانه‌ی نیمه‌مغروقی به نام 841-B طراحی کرد و یکی از پره‌ها را بر روی هابی قرارداد که دارای کرنش سنج‌هایی بود؛ بنابراین می‌توانست نیروها و گشتاور اعمالی بر پره را اندازه‌گیری کند. او با انجام آزمایش‌های زیادی، عدد کاپیتاسیون را روی پروانه‌ی طراحی‌شده بررسی کرد و به این نتیجه رسید که عدد کاپیتاسیون بر عملکرد پروانه در یک دور کامل اثرگذار است. مجدداً الفسون [۳] در سال ۱۹۹۶ تحقیقات گسترده‌ای روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B انجام داد. به عنوان مثال با بررسی عدد فرود به این نتیجه رسید که عدد فرود بر ارتعاش پروانه اثرگذار است و همچنین اثر عدد فرود بالای ۴ بر عملکرد پروانه تأثیر زیادی ندارد. او اثر زاویه‌ی افقی و عمودی محور بر عملکرد و

1 RANS
2 URANS
3 Cupped



شکل ۲. ناحیه فنجان‌ی شکل پره در پروانه‌ی نیمه‌مغروق [۱۹]

Fig. 2. The cup-shaped area of the vane in the semi-submerged propeller [19]

برای شبیه‌سازی عددی پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B پرداختند. آن‌ها مؤلفه‌های مهم برای شبکه‌بندی پروانه‌ی مذکور در نرم‌افزار Star CCM، با هدف رسیدن به دقت بالاتر در شبیه‌سازی و کاهش خطای صحت‌سنجی را نیز بررسی کردند. در رابطه با پروانه‌ی نیمه‌مغروق شیاردار تاکنون پژوهش تجربی یا عددی انجام نشده بود و عبارت پروانه‌ی نیمه‌مغروق شیاردار برای اولین بار در این پژوهش مطرح شده است. به همین منظور پیشینه‌ی پژوهشی در این باره وجود نداشته و تنها در حوزه‌ی پروانه‌های هوایی و برخی پروانه‌های دریایی مغروق، اثر ایجاد شیار بر سطح پره‌ها بررسی شده است. در جدول ۱ چند اختراع در حوزه‌ی پروانه‌ی شیاردار هوایی و دریایی مغروق، معرفی و اثرات ایجاد شیار به صورت خلاصه برای هر مورد شرح داده شده است. شیار ایجاد شده در پروانه‌ی سوم در جدول ۱، الگویی برای پژوهش پیش رو بوده که اثر شیار مشابه آن بر بازدهی و عملکرد پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B در این پژوهش سنجیده شده است.

سینی و همکاران [۲۹] در تحقیقی ویژگی‌های عملکرد آیرودینامیکی پروانه‌ی شیاردار یک توپین بادی را مورد بررسی قرار دادند. هدف از پژوهش آن‌ها تحلیل اثر هندسه و موقعیت مکانی شیار بوده است. شیارهای مورد بررسی توسط آن‌ها تغییراتی بر بازدهی و عملکرد پروانه داشته و با توجه به نوع و هندسه‌ی پروانه، اثرگذاری شیارها توسط آن‌ها سنجیده شده است. بحث ایجاد شیار برای کنترل جریان و هدایت سیال به منظور دستیابی به اهدافی خاص، مانند تغییرات بازدهی و عملکرد سیستم‌های پمپ‌ها و رانشی مطرح می‌شود [۲۹]. کنترل جریان به دو صورت قابل دستیابی است. یکی

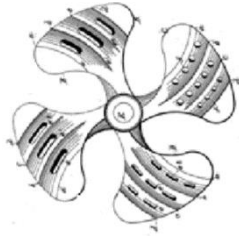
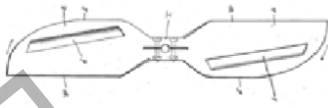
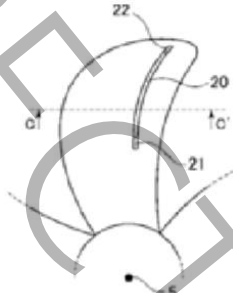
در ضرایب پیشروی مختلف، توسط آن‌ها بررسی و نتایج حل عددی با نتایج تجربی مقایسه شد.

آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که تیغه‌ی فنجان‌ی شکل همان‌طور که در کار قبلی ذکر شد تأثیر بسزایی در فشار استاتیک داشته و از پاشش آب به هوا جلوگیری می‌کند. در پژوهشی دیگر قاسمی و یاری [۲۱] در سال ۲۰۱۶ به بررسی یک مقطع دوبعدی از پروانه‌ی نیمه‌مغروق با زوایای مختلف و در اعداد وبر متفاوت پرداختند. آن‌ها اثرات این دو پارامتر هیدرودینامیکی بر هوادهی و پاشش آب را با استفاده از روش رنس بررسی کردند. نتیجه آن بود که زمانی که عدد وبر افزایش یافته، توزیع فشار نیز بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. یوسفی و شفاقت [۲۲] در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش حل عددی حجم محدود به بررسی ناحیه‌ی هوادهی پره در شعاع‌های مختلف پرداختند. به عبارت دیگر آن‌ها در ضریب پیشروی و شعاع‌های مختلف پره، طول و ضخامت ناحیه‌ی هوادهی را بررسی کردند. از نتایج کار آن‌ها می‌توان به افزایش طول و ضخامت ناحیه‌ی هوادهی با کاهش ضریب پیشروی اشاره کرد.

برزگر رحیمی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۴ به بررسی مشخصات هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B پرداخته و مواردی که در کاهش خطای صحت‌سنجی مؤثر است را معرفی کردند. آن‌ها [۲۴] همچنین اثر عمق غوطه‌وری بر مشخصات هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهشی دیگر، برزگر رحیمی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۴ به مطالعه و بررسی شبکه‌بندی صحیح و سازمان‌یافته

جدول ۱. مروری بر چند اختراع پروانه‌ی شیاردار در حوزه‌ی هوایی و دریایی از نوع مغروق

Table 1. An overview of several inventions of the grooved propeller in the air and marine fields of the submerged type

| شماره | مرجع | تصویر اختراع | شرح نتایج |
|-------|------------|--|---|
| ۱ | هت [۲۶] |  | وجود شیار باعث افزایش چسبندگی بین سطح پروانه و سیال می‌شود و به سبب آن کاویتاسیون کاهش می‌یابد. |
| ۲ | بارنت [۲۷] |  | وجود شیار خلاء در سمت مکش تیغه را در حین چرخش پروانه از بین می‌برد. |
| ۳ | کی [۲۸] |  | وجود شیار در سمت مکش باعث خنثی‌سازی پدیده‌ی کاویتاسیون می‌شود. |

بر بازدهی، عملکرد و توزیع فشار و تنش برشی وارد بر سطح پره‌های پروانه بوده است. برای این منظور تشریح مشخصات هیدرودینامیکی و توصیف پدیده‌های سیالاتی حاکم بر مسئله انجام شده است. این پژوهش نوآورانه در حوزه‌ی پروانه‌های نیمه‌مغروق، پیش زمینه‌ای برای کارهای آتی خواهد بود و می‌تواند در آینده مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گیرد.

۲- معرفی مسئله و معادلات حاکم

مسئله‌ی حاضر شبیه‌سازی عددی پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B در حالت بدون شیار و شیاردار (با یک عدد شیار عمودی بر سطح آن) است. پروانه‌ی مذکور شامل ۴ پره و با قطر ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات کامل‌تر پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۳ نمایی از تصویر پروانه‌ی ساخته و مدل‌سازی شده بوده که مدل مربوطه با استفاده از داده‌های موجود در رساله‌ی الفسون [۳] در نرم افزار

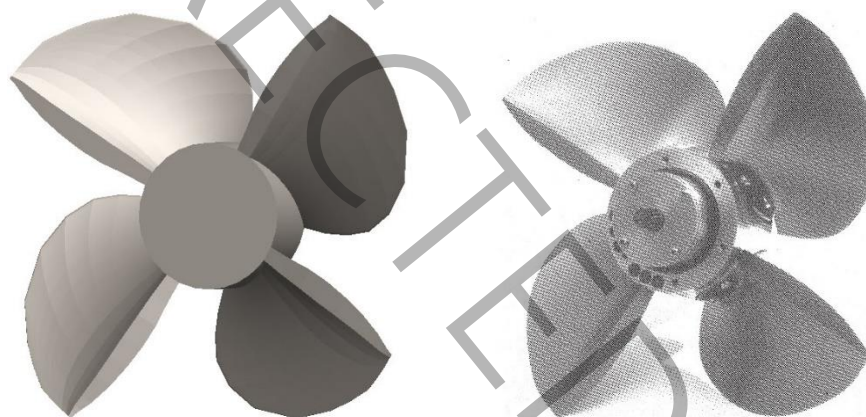
کنترل فعال و دیگری کنترل غیر فعال [۳۳-۳۰]. کنترل جریان از طریق ایجاد شیار جزء شیوه‌های کنترل غیر فعال جریان است. چون عامل کنترلی بر سطح سازه‌ی در معرض جریان ایجاد شده پس می‌توان آن را کنترل غیر فعال ساختاری نامید. مرور تحقیقات گذشته گویای اهمیت پروانه‌های نیمه‌مغروق بوده که مورد توجه پژوهشگران حوزه‌ی هیدرودینامیک قرار گرفته است. در این پژوهش اثر ایجاد یک شیار عمودی که به نوعی یک عامل کنترل غیر فعال ساختاری است، در سطح پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B واکاوی شده است.

چرایی ایجاد شیار بر سطح پروانه‌ی نیمه‌مغروق و اتخاذ این ایده‌ی نوآورانه، بر مبنای ایجاد شکستگی در کف شناورهای تندرو به منظور افزایش سرعت و بازدهی و بهبود عملکرد آن است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر ایجاد یک شیار عمودی در سطح پروانه‌ی نیمه‌مغروق 841-B.

جدول ۲. مشخصات هندسی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B [۳]

Table 2. Geometrical specifications of the semi-submerged propeller model 841-B [3]

| | | |
|-------------|-----------|--------------------------------|
| ۲۵۰ mm | D | قطر پروانه |
| ۸۵ mm | d | قطر هاب |
| ۳۱۰ mm | P | گام در ۰/۷ شعاع پروانه |
| ۰/۳۴ | d/D | نسبت هاب به قطر |
| ۱/۲۴ | P/D | نسبت گام در ۰/۷ شعاع به قطر |
| ۰/۵۸ | A_E/A_0 | نسبت سطح گستردش یافته‌ی پروانه |
| ۴ | Z | تعداد پره‌ها |
| پادساعت‌گرد | - | جهت چرخش |



شکل ۳. پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B ساخته‌شده (سمت راست) و مدل‌سازی شده (سمت چپ)

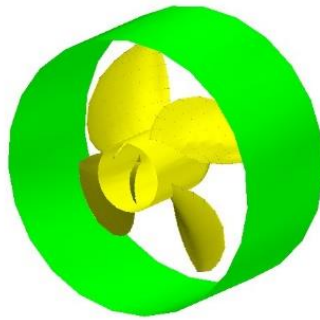
Fig. 3. Model 841-B semi-submerged propeller built (right side) and modeled (left side)

حل شامل دو قسمت متحرک یا ناحیه‌ی لغزشی و ثابت است که شامل کل دامنه‌ی حل به جز ناحیه‌ی لغزشی می‌شود. شکل ۴ دامنه‌ی حل متحرک ایجاد شده و شکل ۵ نیز نمایی از کل دامنه‌ی حل است. با توجه به شکل ۵، طول و عرض سطح مقطع مربعی دامنه، D و قطر دامنه‌ی متحرک برابر $۱/۲ D$ است.

برای این مسئله سیال با چگالی و لزجت ثابت، تراکم ناپذیر و غیرقابل نفوذ در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه پروانه‌ی نیمه‌مغروق در نزدیکی

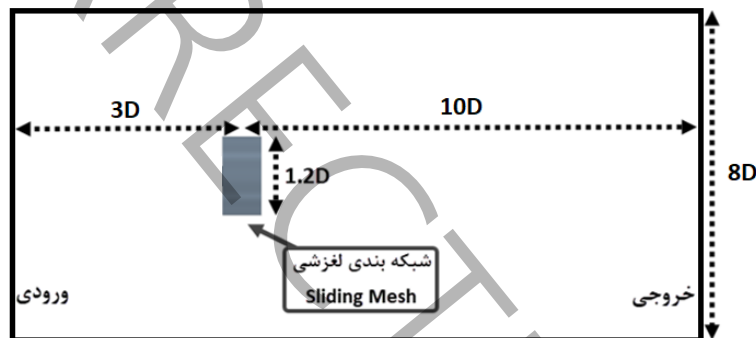
سالیدورکز^۱ طراحی شده است. یکی از نشانه‌های ظاهری این پروانه، پخ ایجاد شده در سمت دیگر پره است که انحنا ندارد. شیوه‌ی درست شبیه‌سازی به این صورت است که باید پروانه در یک دامنه‌ی حل قرار گیرد تا اثرات عبور جریان از پره‌ها و چرخش جریان بواسطه‌ی دوران پروانه، شبیه‌سازی شود. همچنین دامنه‌ی حل نیز باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا نتایج مستقل از آن شود [۱۸]. دامنه‌ی

1 Solidworks



شکل ۴. دامنه‌ی حل متحرک در شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B

Fig. 4. The sliding solution domain in the simulation of the semi-submerged propeller model 841-B



شکل ۵. دامنه‌ی حل ثابت در شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B

Fig. 5. Fixed solution domain in the simulation of the semi-submerged propeller model 841-B

استفاده شده است. در حالت دو فاز، در نرم‌افزار برای ایجاد سطح آزاد و نسبت غوطه‌وری ۳۳ درصد، مدل موج وی‌اُف^۳ لحاظ شده است. برای ایجاد کسر حجمی آب و هوا نیز از تابع کاربری مربوط به همان فاز استفاده شده است. معادلات حاکم بر مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند (معادلات پیوستگی و اندازه حرکت) [۲۲].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

سطح آزاد کار می‌کند؛ بنابراین مسئله، یک مسئله‌ی ناپایا و یا گذرا است؛ زیرا آب و هوا دائماً در حال مخلوط شدن هستند. با توجه به شکل ۵ شرط مرزی ورودی، سرعت ورودی و شرط مرزی خروجی نیز فشار خروجی اعمال شده می‌باشد و فشار جو به عنوان فشار مرجع انتخاب شده است. ناحیه‌ی بیرونی دامنه‌ی حل به عنوان صفحه‌ی تقارن^۱ و سطح پروانه و محور هم به عنوان دیواره‌ی بدون لغزش و غیرقابل نفوذ تعیین شده است. ناحیه‌ی بین دامنه‌ی ثابت و متحرک نیز به صورت لغزشی در نظر گرفته شده است. از مدل وی‌اُف^۲ برای دو فاز آب و هوا استفاده شده و از مدل آشفتگی $k - \omega SST$ (مطابق با مرجع [۱۶]) نیز برای مدل‌سازی جریان آشفته

- 1 Symmetry plane
- 2 VOF

$$\eta = \frac{K_T}{K_Q} \times \frac{J}{2\pi} \quad (۸)$$

در روابط بالا T و Q به ترتیب نیروی رانشی ایجاد شده و گشتاور وارد بر پروانه هستند. n سرعت دورانی پروانه، D قطر پروانه و J نیز ضریب پیشروی پروانه است.

۳- حل معادلات حاکم

معادلات حاکم از طریق شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام^۱ حل شده‌اند. دلیل انتخاب این نرم‌افزار برای حل عددی این است که هر سه گام مدل‌سازی، شبکه‌بندی و شبیه‌سازی عددی در داخل نرم‌افزار انجام می‌گیرد؛ همچنین با توجه به تنظیمات متنوع محیط داخلی آن، از طریق نرم‌افزار نام‌برده، شبکه‌بندی بهتری را می‌توان ایجاد کرد. گام زمانی ۰.۰۰۳ ثانیه لحاظ شده است. این مقدار به اندازه‌ی کافی کوچک بوده که گردابه‌های ایجاد شده در اطراف و پایین‌دست پروانه، به خوبی شبیه‌سازی شود. حداکثر باقی‌مانده‌ها برای حل معادلات، 10^{-3} در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار برای حل مشکل جفت‌شدن فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده شده و گسسته‌سازی عبارت جابجایی در معادله‌ی اندازه‌حرکت نیز با روش آپویند مرتبه‌ی دو^۳ انجام شده است. در این شبیه‌سازی عددی، نسبت عمق غوطه‌وری ۳۳ درصد، ضریب پیشروی ۰.۸، عدد کاویتاسیون ۲.۳، عدد فرود ۶ و زاویه‌ی محور، صفر (حالت افقی) است. همچنین سرعت دورانی پروانه ۲۹۵ rad/s و سرعت شناور ۹ m/s^۳ است [۳]. دلیل انتخاب ضریب پیشروی ۰.۸ این است که به نسبت ضرایب دیگر، تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی در این ضریب پیشروی با نتایج حل عددی دیده می‌شود [۳۴]. همچنین این مقدار، حد وسط در بین ضرایب پیشروی دیگر است [۳۴] و در این ضریب پیشروی، شناور با توجه به سرعت آن در حال اسکی است. شبیه‌سازی عددی تا زمانی که نتایج شبه پایا شوند ادامه یافته که عموماً با ۴ یا ۵ دور چرخش پروانه نتایج شبه پایا می‌شوند.

۳-۱- پروانه‌ی بدون شیار

در این پژوهش پروانه‌ی مدل‌سازی شده در شکل ۳ به عنوان پروانه‌ی بدون شیار، شبیه‌سازی عددی شده و از نتایج آن برای صحت‌سنجی استفاده

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (۲)$$

که \bar{u}_i تانسور سرعت میانگین‌گیری شده‌ی سیال، \bar{P} فشار میانگین‌گیری شده، ρ چگالی و μ لزجت دینامیکی سیال است. $\overline{u'_i u'_j}$ عبارت مشتمل بر حاصل ضرب سرعت‌های نوسانی متوسط‌گیری شده‌ی جریان آشفته می‌باشد و به اصطلاح به آن تانسور تنش رینولدز گفته می‌شود. روابط (۳ تا ۵) معادلات کسر حجمی سیال مرجع، چگالی و لزجت معادل است [۲۲].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha u_i) \quad (۳)$$

$$\rho_{eff} = \rho_f \alpha + \rho_r (1 - \alpha) \quad (۴)$$

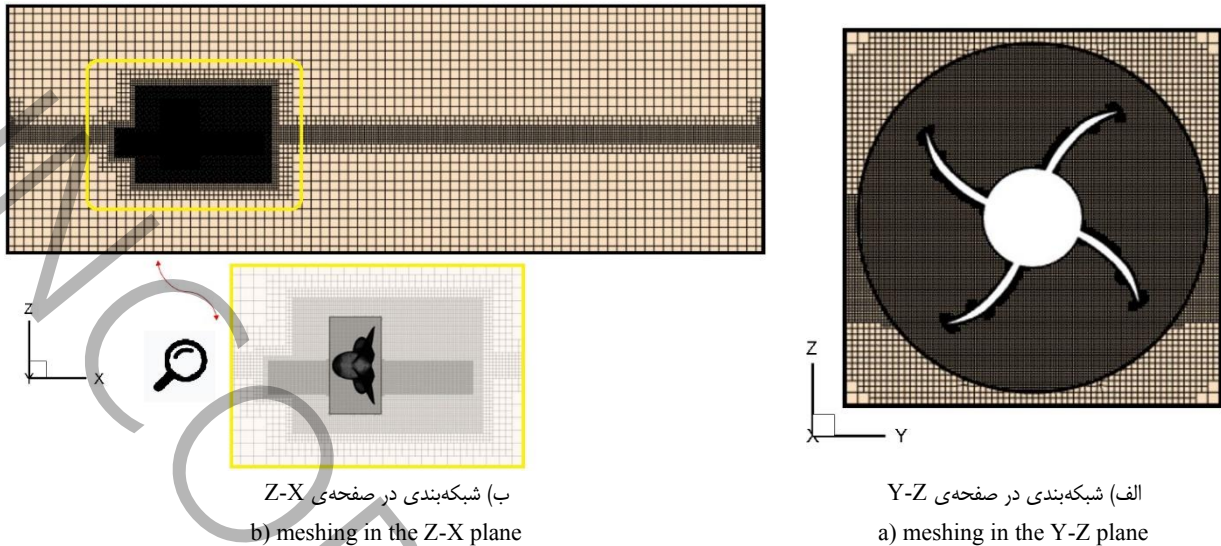
$$\mu_{eff} = \mu_f \alpha + \mu_r (1 - \alpha) \quad (۵)$$

در رابطه‌ی ۳، u_i تانسور سرعت سیال و α تعیین‌کننده‌ی کسری از حجم سیال مرجع است که سلول محاسباتی را در بر می‌گیرد. در رابطه‌ی ۴ و ۵، ρ_{eff} و μ_{eff} به ترتیب چگالی معادل و لزجت معادل است. ρ_f و μ_f نیز به ترتیب چگالی و لزجت سیال مرجع است. مشخصه‌ی نیروهای هیدرودینامیکی وارد شده بر پروانه توسط سیال نیز مطرح است. مؤلفه‌های هیدرودینامیکی پروانه به شکل متداول و بدون بُعد آن، یعنی ضرایب رانش و گشتاور و بازدهی پروانه به ترتیب در روابط (۶ تا ۸) نشان داده شده است [۲۲].

$$K_T = \frac{T}{\rho n^3 D^5} \quad (۶)$$

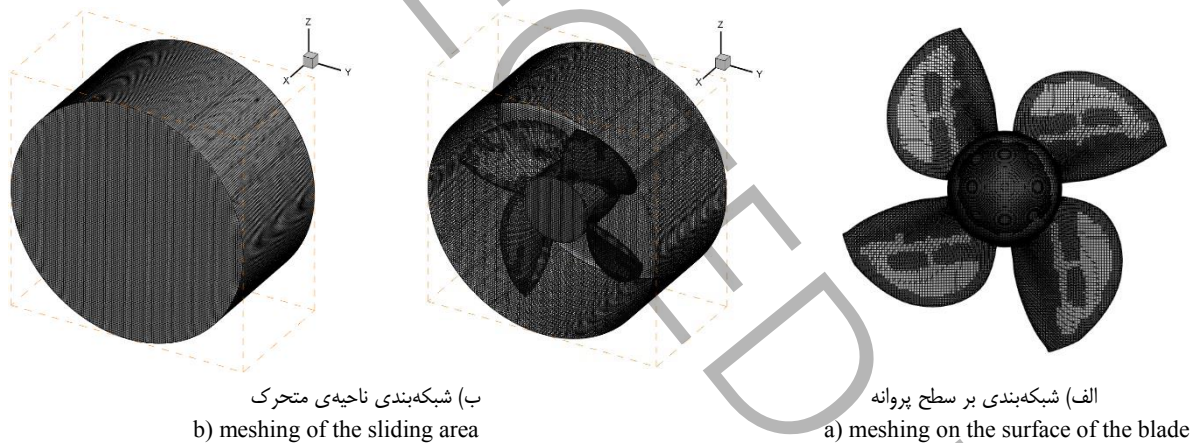
$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^3 D^5} \quad (۷)$$

- 1 Star CCM
- 2 Simple
- 3 Second order upwind



شکل ۶. شبکه‌بندی صفحه‌ای دامنه‌ی متحرک و کلی در شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B

Fig. 6. Grid of the sliding and overall domain in the simulation of the semi-submerged propeller model 841-B



شکل ۷. شبکه‌بندی ناحیه‌ی متحرک و سطح پروانه‌ی بدون شیار

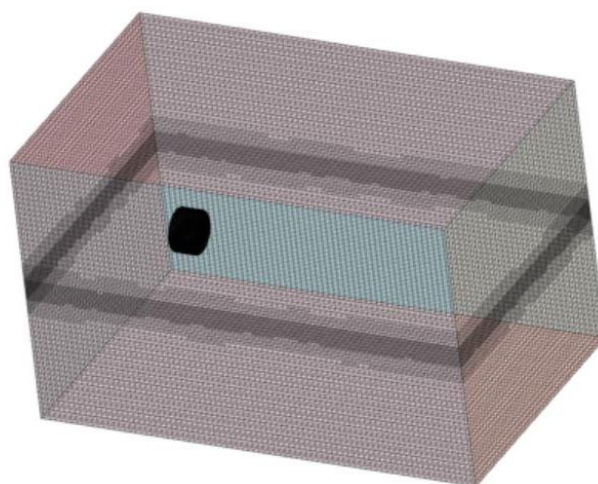
Fig. 7. Meshing of the sliding area and the surface of the propeller without grooves

ثابت و متحرک تبادل خواهد داشت؛ بنابراین باید اندازه‌ی شبکه‌بندی در این ناحیه متناسب انتخاب شود تا در روند حل مشکلی پیش نیاید. نمای کلی شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی نیز برای شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B، در شکل ۶ قابل مشاهده است (شکل سمت چپ).

شکل ۷ نمای نزدیک و واضح‌تر از شبکه‌بندی در ناحیه‌ی متحرک و بر سطح پروانه است.

به وضوح مشخص است که ساختار شبکه، سازمان‌یافته می‌باشد. در

شده است. شبکه‌بندی جزء جدایی ناپذیر هر تحلیل عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی است. شبکه‌بندی دامنه‌ی حل در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام انجام شده است. در شبیه‌سازی عددی، کیفیت بالای شبکه‌بندی علاوه بر بهبود بازدهی حل، دقت حل را نیز بالا می‌برد. با توجه به شکل ۶ در شبکه‌بندی دامنه‌ی متحرک از شبکه‌بندی مربعی و در نزدیکی دیواره یا پروانه و هاب پروانه، از شبکه‌بندی لایه‌مرزی استفاده شده است (شکل سمت راست). داده‌های محاسباتی توسط شبکه‌بندی لغزشی بین دامنه‌ی



شکل ۸. شبکه‌بندی دامنه‌ی حل در شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق مدل 841-B

Fig. 8. Meshing of the solution domain in the simulation of the semi-submerged propeller model 841-B

جدول ۳. مطالعه‌ی استقلال از شبکه در شبکه‌بندی‌های مختلف برای پروانه‌ی بدون شیار (عمق غوطه‌وری ۳۳ درصد و ضریب پیشروی ۰/۸)

Table 3. The study of independence of grid in different grids for the propeller without grooves (immersion depth 33% and advance coefficient 0.8)

| شماره | تعداد سلول ها | KT | درصد خطای نسبی |
|-------|---------------|--------|----------------|
| ۱ | ۱۹۴۱۶۳۰ | ۰/۰۱۵۸ | ۶۸٫۹۶ |
| ۲ | ۵۳۷۹۷۵۷ | ۰/۰۵۰۹ | ۱٫۳۴ |
| ۳ | ۸۷۶۵۳۱۷ | ۰/۰۵۱۶ | |

هزینه‌ی محاسبات و همچنین افزایش زمان همگرایی در حل عددی می‌شود؛ بنابراین مقوله‌ی استقلال از شبکه برای شبیه‌سازی حائز اهمیت است. جدول ۳ فرآیند بررسی استقلال از شبکه برای حل عددی پیش رو می‌باشد. ضریب رانش به عنوان متغیر مورد بررسی برای این فرآیند انتخاب شده است. در مقایسه‌ی حالت ۲ و ۳ در جدول ۳، خطای استقلال از شبکه کمتر از ۵ درصد شده که مقداری قابل قبول است؛ بنابراین در این پژوهش از شبکه‌بندی با تعداد سلول ۵۳۷۹۷۵۷ استفاده شده است.

اطراف سطح آزاد سلول‌ها ریزتر در نظر گرفته شده تا اثرات اختلاط آب و هوا در نزدیکی سطح آزاد، مخصوصاً اطراف پروانه، به خوبی شبیه‌سازی شود. شکل ۸ نمایی از شبکه‌بندی دامنه‌ی حل در حالت سه‌بعدی می‌باشد. شبکه‌بندی لغزشی در شکل به وضوح قابل مشاهده است. شرط استقلال از شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی عددی بسیار مهم است. در این مقاله از سه شبکه‌بندی لغزشی مختلف برای بررسی حساسیت حل به شبکه‌بندی استفاده شده است. افزایش تعداد شبکه‌بندی باعث افزایش



ب) سطح مقطع پروانه‌ی شیاردار در اختراع کی [۲۸ و ۳۵]
b) The cross section of the grooved propeller in Kei's patent [28 , 35]



الف) سطح مقطع پروانه‌ی شیاردار در کار حاضر
a) The cross section of the grooved propeller in the present work

شکل ۹. سطح مقطع پروانه‌ی شیاردار

Fig. 9. The cross section of the slotted propeller

روند ایجاد شبکه‌بندی مانند پروانه‌ی بدون شیار بوده و فقط اطراف شیار و نقاط تیز آن سلول‌ها ریزتر شده است. تصویر شبکه‌بندی پروانه‌ی شیاردار در شکل ۱۱ آورده شده است. جدول ۴ فرآیند بررسی استقلال از شبکه برای شبیه‌سازی عددی پروانه‌ی شیاردار می‌باشد. در مقایسه‌ی حالت ۲ و ۳ در جدول ۴، خطای استقلال از شبکه کمتر از ۵ درصد شده که مقداری قابل قبول است؛ بنابراین در این پژوهش از شبکه‌بندی با تعداد سلول ۵۳۸۳۱۹۶ استفاده شده است.

۳-۳- صحت‌سنجی

برای سنجش دقت و اعتبار نتایج در هر شبیه‌سازی عددی، لازم است تا نتایج حل عددی با نتایج تجربی مقایسه شود. نتایج تجربی برای پروانه‌ی شیاردار B-841 موجود نمی‌باشد برای همین نتایج حل عددی پروانه‌ی بدون شیار با نتایج تجربی الفسون [۳] در جدول ۵ مقایسه شده است.

بیشترین خطای بدست آمده مربوط به بازدهی پروانه (۹۰٫۷۸- درصد) است و در مجموع همه‌ی خطاها مقداری زیر ۱۰٪ شده که قابل قبول می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

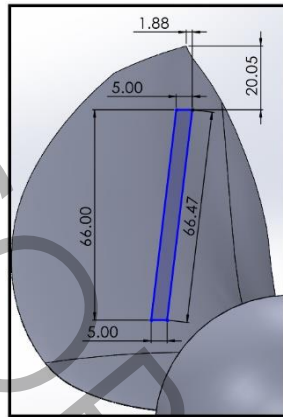
در این بخش نتایج شبیه‌سازی عددی مورد واکاوی قرار خواهد گرفت. شکل ۱۲ نمودارهای ضریب رانش، گشتاور و نمودار بازدهی برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار است. نمودار خطی که به صورت خطچین در نمودارها

۳-۲- پروانه‌ی شیاردار

هدف پژوهش پیش رو بررسی اثر ایجاد یک شیار بر سطح پروانه است. برای این منظور شیاری عمودی بر سطح پروانه لحاظ شده و اندازه‌ی آن به نحوی بوده که تا حد مطلوب سطح پره را بپوشاند. شیار مذکور مشابه اختراع کی [۲۸] است. شیار متمایل به سمت لبه‌ی دنباله‌دار پره یا به عبارت دیگر نزدیک به سمت مکش پره ایجاد شده است [۲۸]. مطابق شکل ۲ از بخش مقدمه، ناحیه‌ی فنجان‌ی در جوار لبه‌ی دنباله‌دار قرار دارد که شیار ایجاد شده در پژوهش حاضر نیز نزدیک آن است [۱۹ و ۲۰]. اثرگذاری شیار اطراف ناحیه‌ی فنجان‌ی شکل و تغییر فشار ناحیه‌ی فشار مثبت در جلوی پره و ناحیه‌ی فشار منفی در پشت پره، می‌تواند قابل توجه باشد. در بخش نتایج به آن موضوع پرداخته خواهد شد. در شکل ۹ تصویری از سطح مقطع پروانه‌ی شیاردار در کار حاضر و اختراع کی [۲۸] آورده شده است.

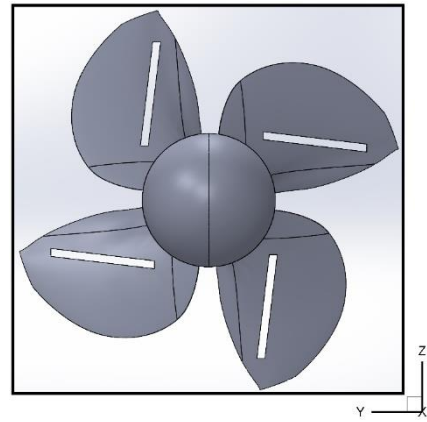
نکته‌ی قابل ملاحظه در شکل ۹ این است که پروانه‌ی اختراع شده توسط کی [۲۸] پروانه‌ی یک کشتی است و با پروانه‌ی نیمه‌مغروق B-841 متفاوت بوده و شیار ایجاد شده بر روی آن به صورت یک حفره‌ی فرو رفته‌ی مستطیلی می‌باشد. چون پروانه‌ی نیمه‌مغروق B-841 کوچکتر بوده و ضخامت پره‌های آن کمتر است برای همین شیار ایجاد شده پره را سوراخ کرده و برشی مستطیلی از سطح پره در یک موضع خاص که موقعیت آن توضیح داده شده، خارج شده است. هدف پژوهش از ابتدا نیز بررسی اثر یک شیار عمودی بر سطح پره بوده است. شکل ۱۰ تصویری از پروانه‌ی شیاردار B-841 و ابعاد شیار است (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد).

1 Trailing edge



ب) ابعاد و اندازه‌ی شیار ایجاد شده بر سطح پره

b) Dimensions and size of the groove created on the surface of the blade

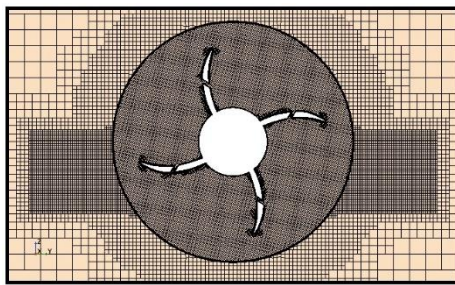


الف) نمای روبرو از پروانه‌ی شیاردار

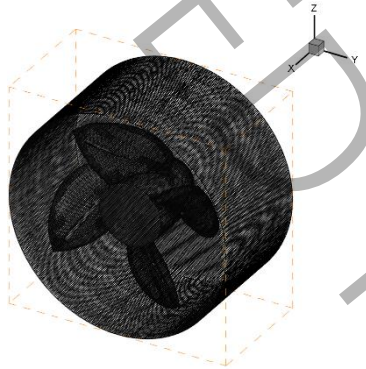
a) Front view of the slotted propeller

شکل ۱۰. پروانه‌ی شیاردار 841-B و ابعاد و اندازه‌ی شیار بر سطح پره

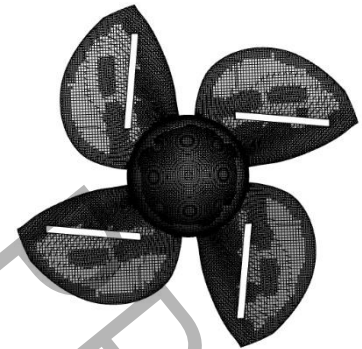
Fig. 10. Grooved propeller 841-B and dimensions and size of the groove on the surface of the blade.



پ) شبکه‌بندی در صفحه‌ی Y-Z
c) meshing in the Y-Z plane



ب) شبکه‌بندی ناحیه‌ی متحرک
b) meshing of the moving area



الف) شبکه‌بندی بر سطح پروانه
a) meshing on the surface of the blade

شکل ۱۱. شبکه‌بندی ناحیه‌ی متحرک و سطح پروانه‌ی بدون شیار

Fig. 11. Meshing of the sliding area and the surface of the propeller without grooves

جدول ۴. مطالعه‌ی استقلال از شبکه در شبکه‌بندی‌های مختلف برای پروانه‌ی شیاردار (عمق غوطه‌وری ۳۳ درصد و ضریب پیشروی ۰/۸)

Table 4. The study of independence of grid in different grids for the slotted propeller (immersion depth 33% and advance coefficient 0.8)

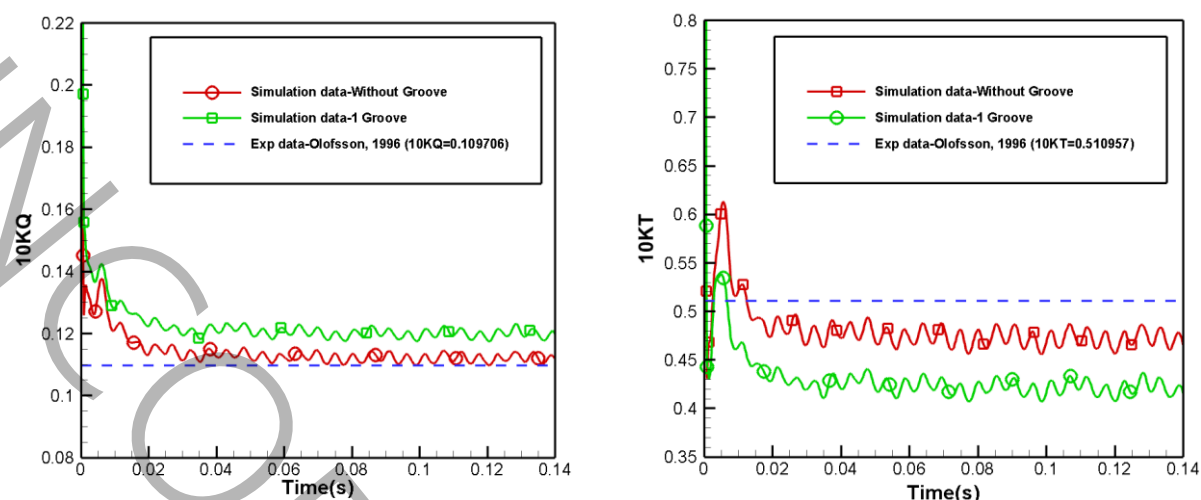
| شماره | تعداد سلول‌ها | KT | درصد خطای نسبی |
|-------|---------------|--------|----------------|
| ۱ | ۱۹۲۹۵۴۷ | ۰,۰۴۹۲ | ۵,۹۳۴ |
| ۲ | ۵۳۸۳۱۹۶ | ۰,۰۵۲۳ | ۰,۶۴۱ |
| ۳ | ۸۷۶۵۹۳۷ | ۰,۰۵۲۶ | |

جدول ۵. اعتبارسنجی با نتایج تجربی الفسون [۳]

Table 5. Validation with Olofsson's experimental results [3]

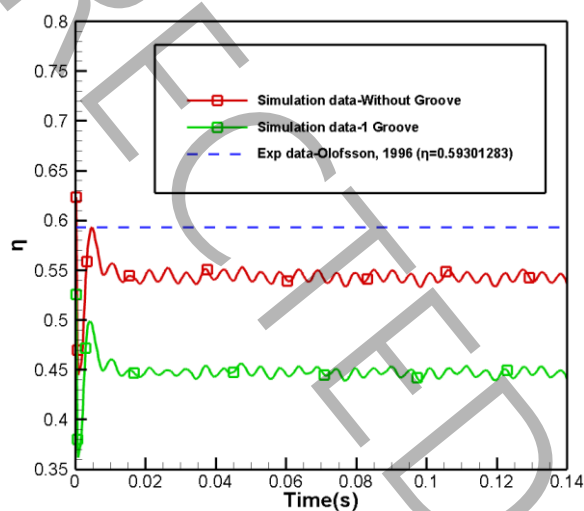
| η | $100KQ$ | $100KT$ |
|-----------|------------|-----------|
| شبهه‌سازی | آزمایشگاهی | شبهه‌سازی |
| شبهه‌سازی | آزمایشگاهی | شبهه‌سازی |
| ۵۴,۳۶۶ | ۵۹,۳۰۱۳ | ۱,۱۱۲۳ |
| ۱,۰۹۷۱ | ۱,۰۹۷۱ | ۴,۷۴۹۴ |
| ۵,۱۰۹۶ | ۵,۱۰۹۶ | ۵,۱۰۹۶ |
| ۹۰,۷۸٪ | ۱,۳۸۹۲٪ | ۷,۰۴۸۹۲٪ |

نتایج تجربی و عددی پروانه‌ی نیمه‌مفروق 84]-B در صد خطای نسبی



الف) نمودار ضریب رانش
b) Torque coefficient diagram

ب) نمودار ضریب گشتاور



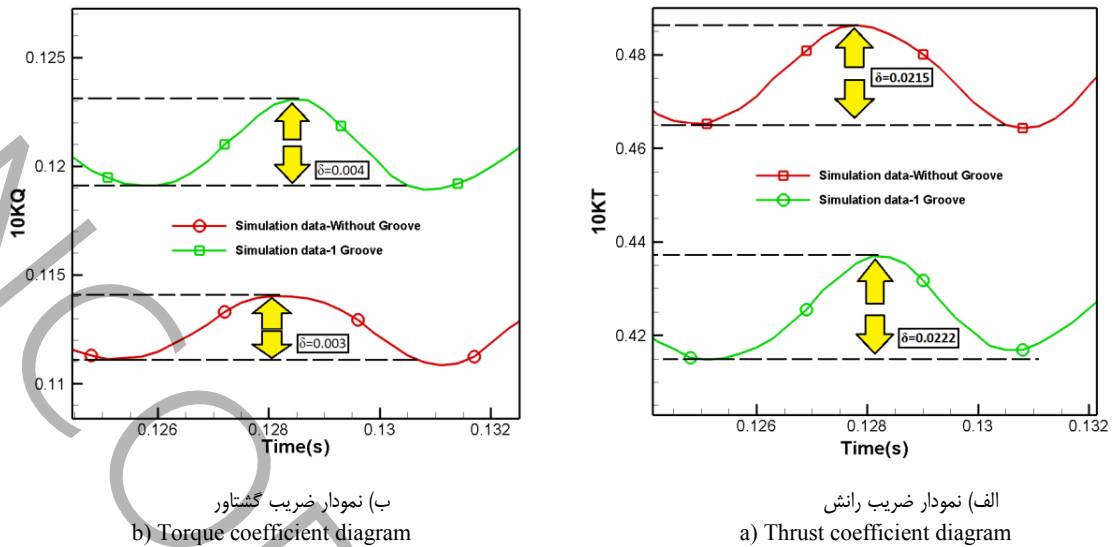
پ) نمودار بازدهی
c) efficiency diagram

شکل ۱۲. نمودارهای ضریب رانش، گشتاور و نمودار بازدهی برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Fig. 12. Diagrams of thrust coefficient, torque and efficiency diagram for non-groove and grooved propeller

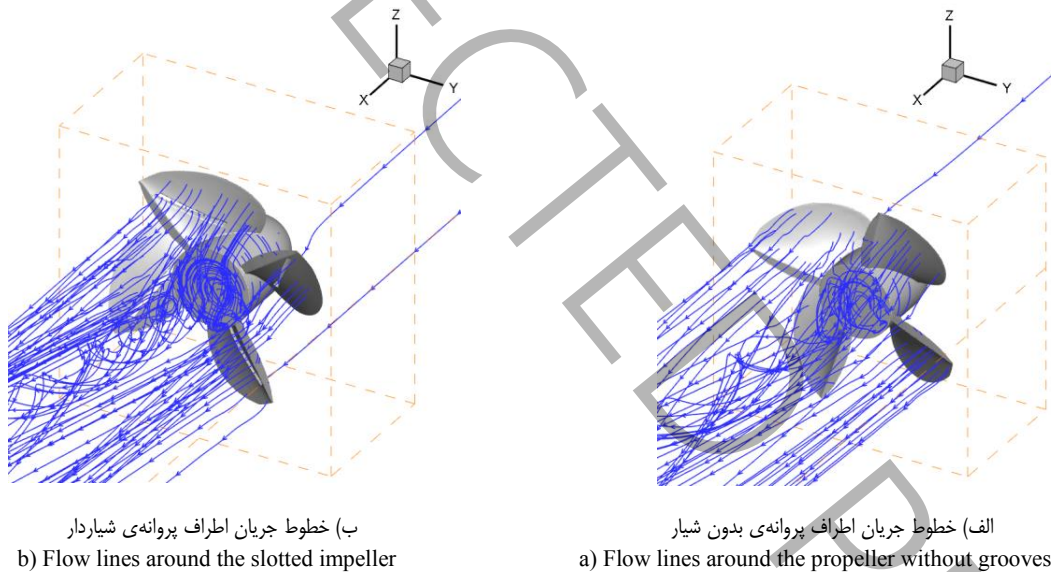
حالت شیاردار افزایش داشته و مقدار متوسط آن بیشتر از حالت بدون شیار است. به نظر می‌رسد به دلیل کاهش وزنی که در اثر ایجاد شیار در پره‌ها بوجود می‌آید، برآیند نیروی وزن و نیروی عامل در ایجاد گشتاور بیشتر از مقدار آن در حالت بدون شیار است. همین عامل سبب افزایش میزان ضریب گشتاور شده است. در بخش (پ) به وضوح مشاهده می‌شود که بازدهی در حالت شیاردار کاهش داشته و مقدار میانگین آن در حالتی که نمودار شبه

آورده شده، نتایج تجربی ثبت شده توسط الفسون [۳] است. چون یک مقدار شبه پایا است به صورت یک خط افقی آورده شده تا بهتر بتوان نتایج پروانه‌ی شیاردار و بدون شیار را با آن قیاس داد. در بخش (الف) از شکل ۱۲، میزان ضریب رانش در حالت شیاردار کمتر از حالت بدون شیار و مقدار تجربی شده است. این نشانه‌ی کاهش میزان نیروی رانش در حالت شیاردار است. در بخش (ب) میزان ضریب گشتاور در



شکل ۱۳. تغییر دامنه‌ی نوسان نمودارهای ضریب رانش و گشتاور برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Fig. 13. Variation of the oscillation domain of the thrust coefficient and torque diagrams for the non-grooved and grooved propeller



شکل ۱۴. خطوط جریان برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Fig. 14. Flow lines for non-slotted and slotted propeller

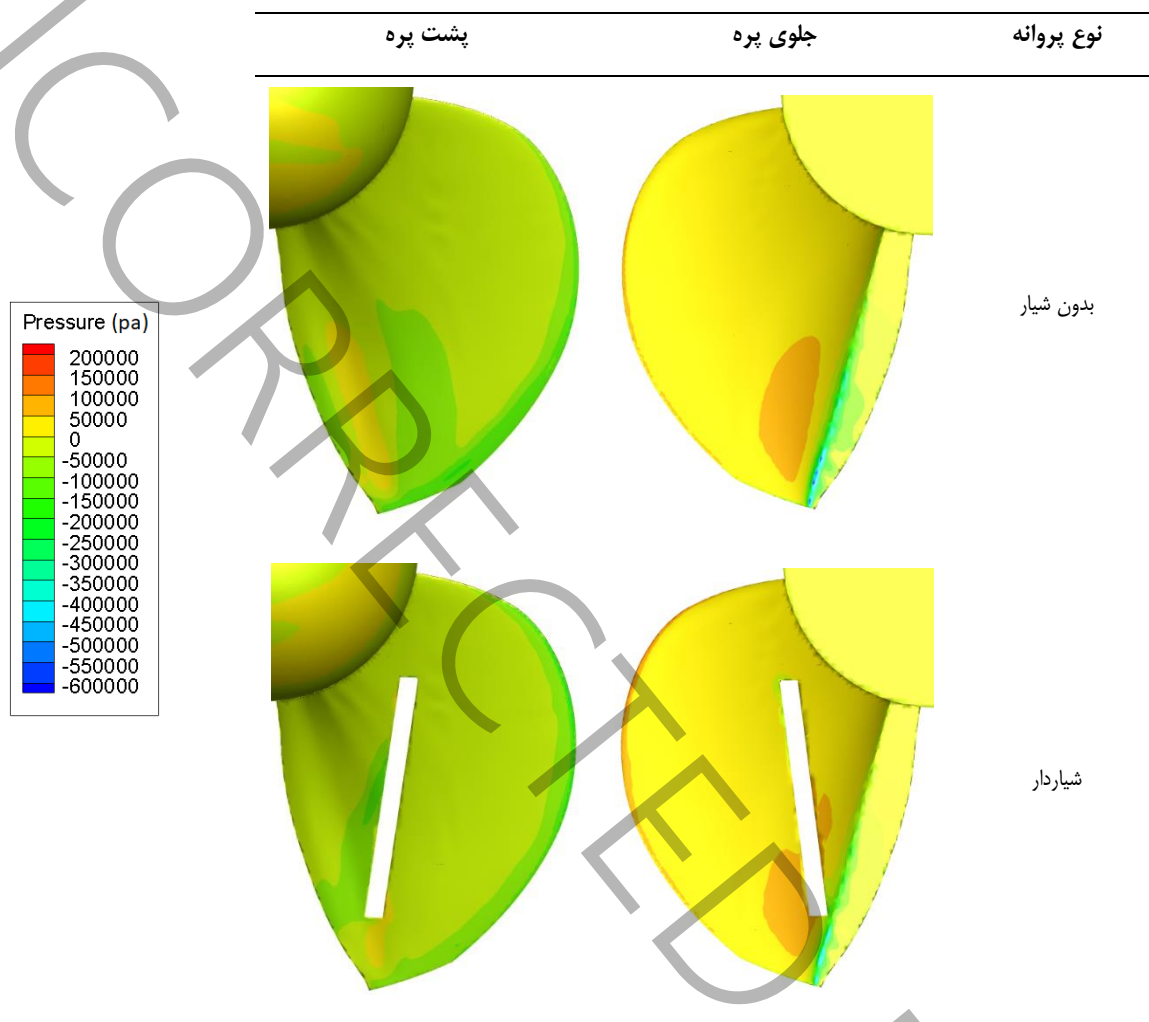
بیشینه‌ی نوسانی در هر دو نمودار ضریب رانش و گشتاور، افزایش داشته است. ارتفاع دامنه‌ی نوسان برای هر دو نمودار در شکل ۱۳ ذکر شده است. تغییرات در نمودار ضریب گشتاور به نسبت ضریب رانش بیشتر قابل توجه است. در شکل ۱۴ خطوط جریان در اطراف پره‌ها و در جلوی پروانه آورده شده است. چرخش جریان در اطراف پره‌ها و عبور جریان از شیار در حالت

پایا شده، ۴۴٫۵ درصد است. در شکل ۱۳ میزان تغییر دامنه‌ی نوسان در نمودارهای ضریب رانش و گشتاور نشان داده شده است. بخشی از نمودار که دامنه‌ی نوسان بیشینه بوده مورد بررسی قرار گرفته تا تغییرات دامنه در حالت بیشینه سنجیده شود.

در شکل ۱۳ با ایجاد شیار بر سطح پره‌ها میزان دامنه‌ی نوسان در حالت

جدول ۶. کانتور فشار پشت و جلوی پره برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Table 6. Pressure contour behind and in front of blade for non-slotted and slotted propeller

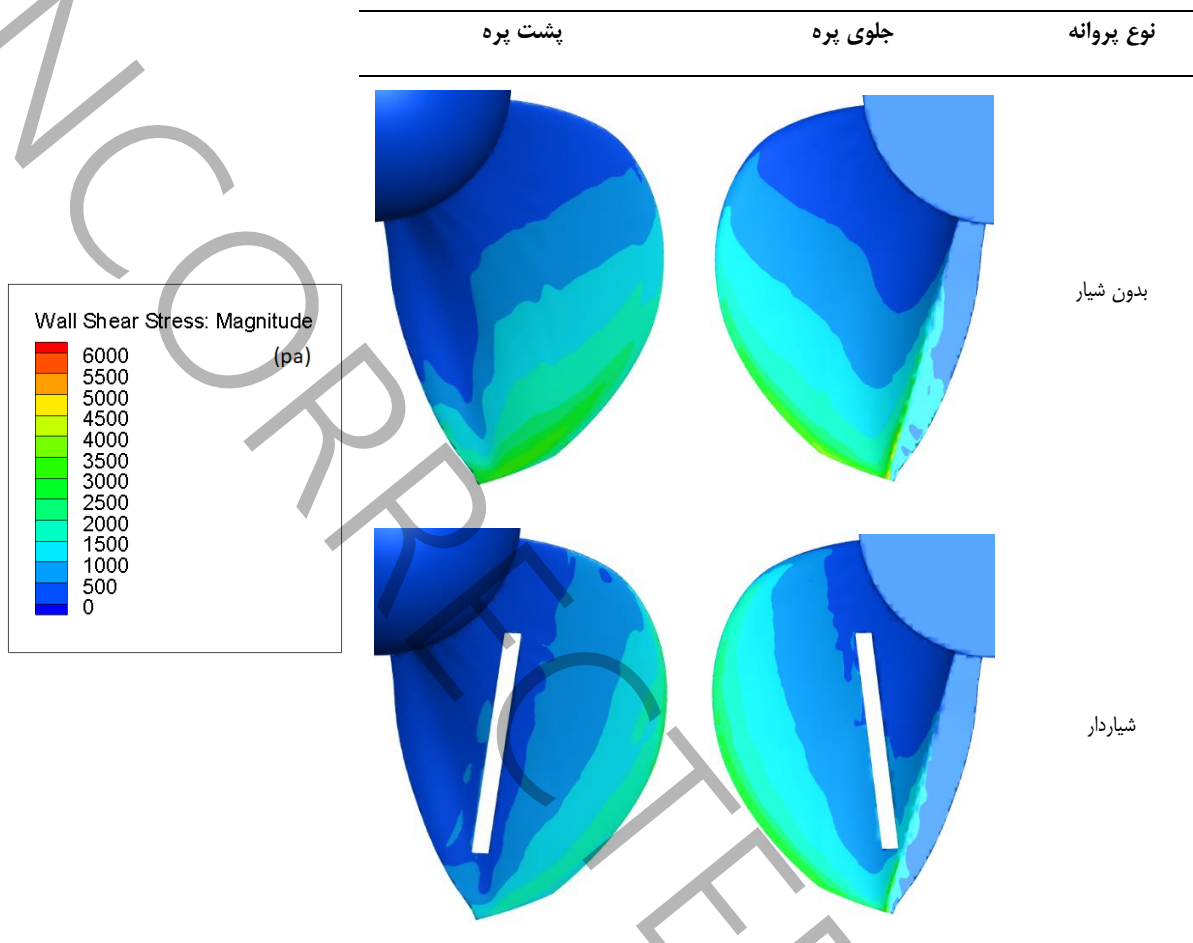


دنباله‌دار در پشت پره، ناحیه‌ای ایجاد شده که فشار مثبت است. در جلوی پره نیز نزدیک به ناحیه‌ی پخ‌خورده بر لبه‌ی پره، حاشیه‌ای با فشار منفی شکل گرفته است. در حالت شیاردار همان حاشیه‌ی فشار منفی در ابعاد کوچکتر شکل گرفته و اطراف لبه‌ی شیاردار نیز فشار منفی است. در پشت پره ناحیه‌ی فشار مثبتی که برای حالت بدون شیاردار ذکر شده بود، ایجاد شده ولی به علت حضور شیاردار، این ناحیه اطراف شیاردار و مایل به وسط پره شکل گرفته است. در جدول ۷ کانتورهای تنش برشی وارد شده بر پره‌ی مغروق برای هر دو حالت شیاردار و بدون شیاردار آورده شده است. مطابق کانتور تنش برشی هر چه به نوک تیز پره نزدیک شویم، در هر دو حالت، میزان تنش برشی وارد بر سطح

شیاردار، مشهود است. الگوی چرخشی در پایین‌دست هاب و پره‌ها در حالت بدون شیاردار مطابق نتایج آزمایشگاهی [۳۴ و ۳۶] است. وجود شیاردار و عبور جریان از آن مطابق شکل بر پیچش و چرخش جریان اثر بیشتری داشته است. جدول ۶ کانتورهای فشار وارد شده بر پره‌ای است که بیشتر از ۳ پره‌ی دیگر در آب غوطه‌ور می‌باشد. هر دو حالت شیاردار و بدون شیاردار برای مقایسه‌ی سطوح جلو و پشت پره‌ی پروانه در جداول آورده شده است. در کانتورهای فشار در حالت بدون شیاردار در پشت پره فشار منفی و در جلوی پره فشار وارد بر سطح مثبت است. همچنین در نزدیکی لبه‌ی

جدول ۷. کانتور تنش برشی پشت و جلوی پره برای پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Table 7. Shear stress contour behind and in front of blade for non-slotted and slotted propeller



یابد. همچنین شیار ایجاد شده از فشار وارد شده‌ی جریان سیال بر ناحیه‌ی دنباله‌دار و پخ خورده کاسته و به تبع آن میزان تنش برشی نیز در آن ناحیه کاهش یافته است.

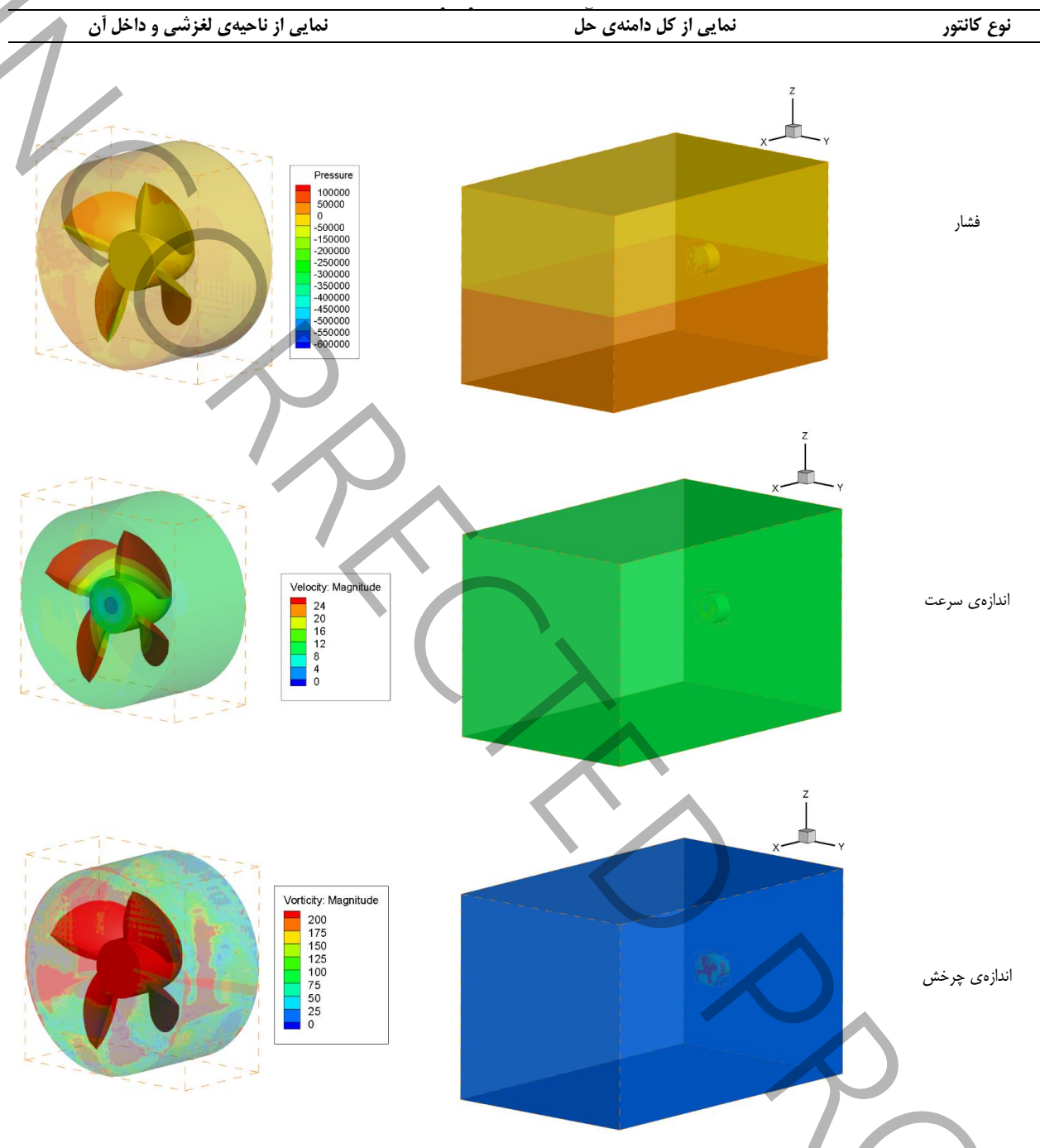
نکته‌ی حائز اهمیت دیگر بحث تغییرات فشار و تنش برشی وارد شده بر لبه‌های تیز شیار و اطراف آن است. با توجه به مباحث کنترل جریان در منابع [۳۰-۳۳] تنش‌های نوسانی وارد بر سازه سبب ایجاد خستگی و کاهش عمر آن می‌شود. با توجه به شکل ۱۳ و جداول ۶ و ۷، نوسان نیروهای وارد بر نواحی تیز شیار و اطراف آن سبب ایجاد تنش‌های نوسانی در آن نواحی شده و اثرات نامطلوبی را در دراز مدت به همراه دارد. علاوه بر این موضوع، بحث تمرکز تنش نیز مطرح است و با ایجاد شیار تمرکز تنش ایجاد شده و این نیز مزید بر علت می‌باشد. بررسی اثرات شیار در کانتورها و تحلیل هیدرودینامیک آن نشان‌دهنده‌ی آن است که شیار ایجاد شده عملکرد عادی

نیز افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که جریان در زاویه‌ی حمله با برخورد به لبه‌ی پره و سپس جدایش از آن، بیشترین تنش برشی را بر نوک تیز و لبه‌ی پره وارد می‌کند. در نزدیکی ناحیه‌ی پیشرو و حاشیه‌ی لبه‌های آن، ناحیه‌ای سبز رنگ ایجاد شده که در آن تنش برشی بیشتر از بقیه‌ی نواحی است. آن بخش ناحیه‌ی برخورد جریان است. در حالت شیاردار در پشت پره، ناحیه‌ی سبز به نسبت حالت بدون شیار، کم رنگ شده است. دلیل کاهش تنش برشی وارد در آن ناحیه این است که وجود شیار مسیری برای عبور جریان ایجاد کرده که به سبب عدم توازن فشار و برای حفظ پیوستگی دبی جرمی جریان در پشت و جلوی پره، حرکت جریان برای عبور از شیار اتفاق می‌افتد. همین امر سبب می‌شود تا از حجم جریان برخوردی در زاویه‌ی حمله بر لبه‌ی پره کاهش و به تبع آن تنش برشی وارد بر آن ناحیه کاهش

1 Leading edge

جدول ۸. کانتورهای فشار، اندازه‌ی سرعت و اندازه‌ی چرخش در کل دامنه‌ی حل و ناحیه‌ی لغزشی برای پروانه‌ی بدون شیار

Table 8. Contours of pressure, velocity magnitude and vorticity magnitude in the entire domain of solution and sliding area for the propeller without grooves



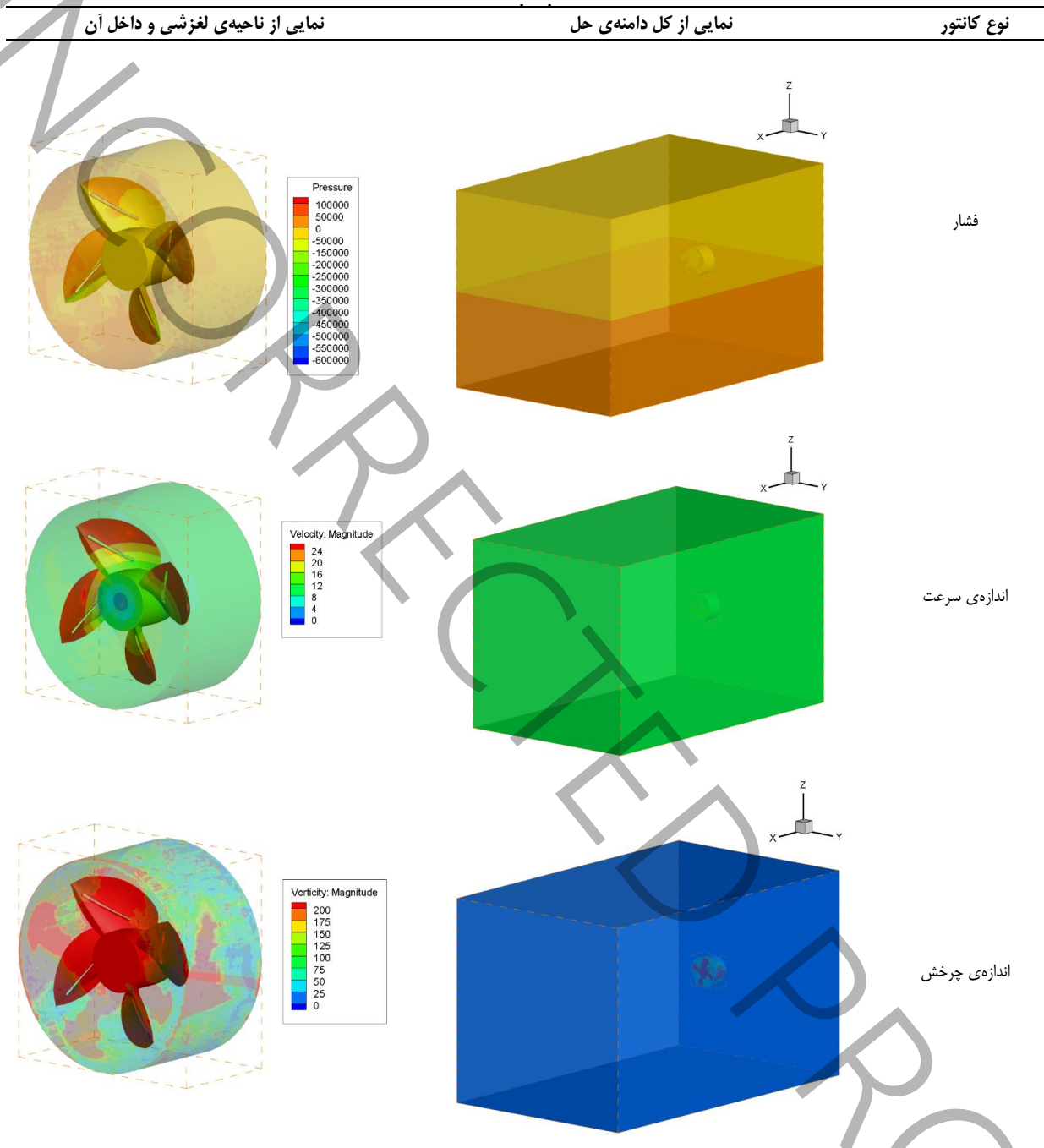
جدول ۸ کانتورهای نامبرده در دو حالت نشان داده شده است. یکی از حالات نمایی از کل دامنه‌ی حل و دیگری نمایی از ناحیه‌ی لغزشی و داخل آن است. تنظیماتی لحاظ شده تا داخل کل دامنه‌ی حل و ناحیه‌ی لغزشی شفاف بوده و درون آن نواحی دیده شود. در جدول ۸ کانتورها برای حالت بدون شیار آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سطح آزاد در کانتور فشار قابل رؤیت

پروانه را تحت الشعاع قرار داده و از میزان بازدهی پروانه کاسته است. برای بررسی سطح آزاد ایجاد شده در دامنه‌ی حل و رفتار جریان سیال در اطراف پروانه و در ناحیه‌ی لغزشی، لازم است کانتورهای فشار، اندازه‌ی سرعت و اندازه‌ی چرخش^۱ در کل دامنه‌ی حل نیز بررسی شود. برای این منظور در

1 Vorticity Magnitude

جدول ۹. کانتورهای فشار، اندازه‌ی سرعت و اندازه‌ی چرخش در کل دامنه‌ی حل و ناحیه‌ی لغزشی برای پروانه‌ی شیاردار

Table 9. Contours of pressure, velocity magnitude and vorticity magnitude in the entire domain of solution and sliding area for slotted propeller



فاصله‌ی بیشتر پره از هاب) افزایش می‌یابد و تابع شعاع است. همین موضوع بر اندازه‌ی سرعت نیز تاثیر مستقیم دارد. در جدول ۹ کانتورهای مذکور برای حالت شیاردار آورده شده است. توصیفات مطرح شده در حالت بدون شیار برای حالت شیاردار نیز صدق می‌کند. به وضوح قابل مشاهده است که بیشترین گرادیان فشار، اندازه‌ی سرعت

است. گرادیان فشار نیز در داخل ناحیه‌ی لغزشی و بر سطح پره شکل گرفته است. در کانتورهای اندازه‌ی سرعت و اندازه‌ی لغزش نیز مشاهده می‌شود که بیشترین گرادیان سرعت و چرخش در اطراف پروانه و ناحیه‌ی دورانی ایجاد شده است. در نیمه‌ی بالایی پره‌ها سرعت جریان بیشتر از نواحی نزدیک به هاب پروانه است. دلیل آن این است که سرعت دورانی در شعاع بیشتر

جدول ۱۰. نتایج کمی حاصل از شبیه‌سازی عددی پروانه‌ی بدون شیار و شیاردار

Table 10. Quantitative results of the numerical simulation of the propeller without and with grooves

| نوع پروانه | $10KT$ | $10\delta_{KT}$ | $10KQ$ | $10\delta_{KQ}$ | η |
|--------------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| پروانه‌ی بدون شیار | ۰٫۴۷۴۹۴ | ۰٫۰۲۱۵ | ۰٫۱۱۱۲۳ | ۰٫۰۰۳ | ۵۴٫۳۶۶ |
| پروانه‌ی شیاردار | ۰٫۴۲ | ۰٫۰۲۲۲ | ۰٫۱۲ | ۰٫۰۰۴ | ۴۴٫۵ |
| درصد نسبی تغییرات | -۱۱٫۵۶۸ | ۳٫۱۵۳ | ۷٫۳۰۸ | ۲۵ | -۱۸٫۱۴۷ |

ضریب رانش 3.153% و دامنه‌ی نوسان ضریب گشتاور 25% افزایش یافته است. افزایش دامنه‌ی نوسان ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از افزایش دامنه‌ی نوسان نیروی رانش و گشتاور پیچشی است که در دراز مدت منجر به تسریع ایجاد فرآیند شکل‌گیری پدیده‌ی خستگی [۱۳] و شکست دینامیکی پره‌ها می‌شود. در رابطه با تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی با ایجاد شیار در سطح پره‌ها میزان ضریب رانش 11.568% کاهش و ضریب گشتاور 7.308% افزایش داشته است. ایجاد شیار سبب جابجایی و تغییرات موضعی ناحیه‌ی پرفشار و کم‌فشار در پشت و جلوی پره شده است. همچنین اثر تنش برشی وارد بر ناحیه‌ی پیشرو در پشت پره تعدیل شده است. در مجموع به عنوان جمع‌بندی وجود شیار عملکرد پروانه را نسبت به حالت بدون شیار تحت تأثیر قرار داده و بازدهی آن را کاهش داده است. در انتها می‌توان گفت که طرح عبارت پروانه‌ی نیمه‌مغروق شیاردار برای اولین بار و توضیحات کیفی و تغییرات کمی برای توصیف اثر یک شیار عمودی، می‌تواند به عنوان پیش زمینه‌ای نوآورانه و گامی نخست برای پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی اثر ایجاد شیار عمودی در ضریب پیشروی‌های متفاوت و بررسی اثرات ایجاد شیار عمودی بر سطح پره‌های پروانه در حالتی که نسبت عمق غوطه‌وری تغییر کند، می‌تواند در دستور کار پژوهشگران این حوزه قرار گیرد.

و اندازه‌ی چرخش در ناحیه‌ی لغزشی ایجاد شده است. علت آن چرخش پروانه و گردابه‌های تولیدی در اثر چرخش جریان اطراف پروانه است. در جدول ۱۰ نتایج از دید کمی، کامل‌تر بررسی شده است. درصد کاهش یا افزایش مؤلفه‌های هیدرودینامیکی پروانه، میزان تغییرات دامنه‌ی نوسان ضریب رانش و گشتاور و تغییرات میزان بازدهی در جدول ۱۰ ذکر شده است. مطابق جدول فوق تنها مقادیر ضریب گشتاور و دامنه‌ی نوسان ضریب رانش و گشتاور در حالت شیاردار افزایش داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام شده، شبیه‌سازی پروانه‌ی نیمه‌مغروق شیاردار مدل B-841 به منظور واکاوی اثر ایجاد یک شیار عمودی در سطح پره‌ها انجام شد. بدلیل نبود داده‌های تجربی برای پروانه‌ی شیاردار، نتایج شبیه‌سازی پروانه‌ی بدون شیار با نتایج تجربی موجود برای آن مقایسه شد. شبیه‌سازی با دقت مناسبی انجام شده و صحت‌سنجی با داده‌های تجربی نشان‌دهنده‌ی اعتبار نتایج است. نتایج حاکی از آن است که بازدهی پروانه‌ی شیاردار در ضریب پیشروی ۰٫۸، میزان 44.5% می‌باشد. این مقدار بازدهی به نسبت پروانه‌ی بدون شیار 18.147% و به نسبت داده‌های تجربی الفسون [۳] میزان 24.96% کاهش داشته است. در حالت شیاردار میزان دامنه‌ی نوسان

results, FAST'91, Trondheim, Norway, (1991).

- [9] J. Rose, C. Kruppa, K. Koushan, Surface piercing propellers-propeller/hull interaction, FAST 93, December, Yokohama, Japan, (1993) 867-881.
- [10] M. Fernando, A. Scamardella, N. Bose, P. Liu, B. Veitch, Performance of a family of surface piercing propellers, Royal Institution of Naval Architects. Transactions. Part A. International Journal of Maritime Engineering, 144(Part A1) (2002) 63-77.
- [11] M. Ferrando, A. Scamardella, Surface piercing propellers: Testing methodologies, results analysis and comments on open water characteristics, Proceedings of Small Craft Marine Engineering, Resistance, and Propulsion Symposium-SNAME, (1996).
- [12] N. Olofsson, A contribution on the performance of partially submerged propellers, Fast '93, 2nd Intl Conf on Fast Sea Transportation; 13-16 Dec 1993; Yokohama, Japan, 1 (1993) 765.
- [13] M. Keller, Full-scale measurements on a ventilated propeller, Proc FAST 95, Lubeck-Travermunde, Germany, 2 (1995) 991-1002.
- [14] P.K. Dyson, Modelling, testing and design, of a surface piercing propeller drive, PhD Thesis; University of PLYMOUTH (2000).
- [15] Y.L. Young, S.A. Kinnas, Numerical analysis of surface-piercing propellers, in: 2003 Propeller and Shaft Symposium, 2003, pp. 4-1.
- [16] A. Califano, S. Steen, Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations, Proceedings of The First International Symposium on Marine Propulsors, Norway, 2009.
- [17] K. Koushan, Dynamics of ventilated propeller blade loading on thrusters due to forced sinusoidal heave motion, in: Proceedings of the 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 2006, pp. 17-22.
- [18] S. Alimirzazadeh, S.Z. Roshan, M.S. Seif, Unsteady RANS simulation of a surface piercing propeller in oblique flow, Applied ocean research, 56 (2016) 79-91.
- [19] E. Yari, H. Ghassemi, Numerical analysis of surface

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

| | | |
|------|-------------|----|
| D | قطر پروانه، | mm |
| d | قطر هاب، | mm |
| KT | ضریب رانش | |
| KQ | ضریب گشتاور | |

علائم یونانی

| | | |
|--------|---------------|-------------------|
| μ | لزجت، | pa.s |
| ρ | چگالی، | kg/m ³ |
| η | بازدهی پروانه | |

منابع

- [1] J.L. Allison, Propellers for high-performance craft, Marine Technology and SNAME News, 15(04) (1978) 335-380.
- [2] J. Hadler, Performance of partially submerged propellers, 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics-Rome, (August 1968).
- [3] N. Olofsson, Force and flow characteristics of a partially submerged propeller, Chalmers University of Technology, 1996.
- [4] H. Shiba, Air-drawing of marine propellers, Report of transportation technical research institute, 9 (1953) 1-320.
- [5] R. Hecker, Experimental performance of a partially submerged propeller in inclined flow, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Florida, 1973.
- [6] C. Kruppa, Testing of partially submerged propellers, 13th ITTC-Berlin, (September 1972).
- [7] C. Kruppa, Testing surface piercing propellers, Marin Workshops on Advance Vessel Station Keeping, Propulsor-hull interaction & Nautical Simulators, Wageningen, (1992).
- [8] J.C. Rose, C. Kruppa, Methodical series model test

- [28] S. Kei, Propeller, JP2014169017 (A), 2014.
- [29] A. Seeni, F. Ismail, P. Rajendran, The Aerodynamic Performance Characteristics of a Grooved Propeller Using a RANS solver: Effect of Groove Geometry and Positioning of Multiple Grooves, International Conference on Innovations in Thermo-Fluid Engineering and Sciences, India, 2020.
- [30] M. Barzegar Rahimi, N. Amani Fard, L. Samai, Numerical study of flow control around circular cylinder by using two other control cylinders, in: 19th Fluid Dynamics Conference, 1400 (In Persian).
- [31] M. Barzegar Rahimi, A. Jalalian, Investigating the effect of the location of flow controllers on the reduction of vortices around the cylinder, Fluid Mechanics & Aerodynamics, 11(2) (1401) 12 (In Persian).
- [32] M. Barzegar Rahimi, A. Jalalian, Finding the optimal location of the flow controllers to reduce the vortices around the cylinder, in: The 20th Fluid Dynamics Conference, 1402 (In Persian).
- [33] M. Barzegar Rahimi, Y. Barzegar Rahimi, S.S. Taqavi Khesal, M. Salari, Numerical analysis of turbulent flow control around the cylinder using two other control cylinders, in: 7th International Conference on Technology Development in Mechanical and Aerospace Engineering, 1402 (In Persian).
- [34] K. Himei, H. Yamaguchi, Numerical study on performance of surface piercing propeller using RANS approach, in: SNAME International Conference on Fast Sea Transportation, SNAME, 2015, pp. D021S008R002.
- [35] H.A. Kutty, P. Rajendran, Review on numerical and experimental research on conventional and unconventional propeller blade design, Int. Rev. Aerosp. Eng, 10 (2017) 61.
- [36] M. Kamran, N.M. Nouri, H. Goudarzi, S. Golrokhifar, Experimental evaluation of the effect of positioning and operating parameters on the performance of a surface-piercing propeller, Scientific Reports, 12(1) (2022) 18566.
- piercing propeller in unsteady conditions and cupped effect on ventilation pattern of blade cross-section, Journal of marine science and technology, 21(3) (2016) 501-516.
- [20] E. Yari, H. Ghassemi, Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method, International journal of naval architecture and ocean engineering, 8(1) (2016) 22-37.
- [21] E. Yari, H. Ghassemi, Numerical study of surface tension effect on the hydrodynamic modeling of the partially submerged propeller's blade section, Journal of Mechanics, 32(5) (2016) 653-664.
- [22] A. Yousefi, R. Shafaghat, Numerical study of the parameters affecting the formation and growth of ventilation in a surface-piercing propeller, Applied Ocean Research, 104 (2020) 102360.
- [23] M. Barzegar Rahimi, M. Salari, Y. Barzegar Rahimi, S.S. Taqavi Khesal, Numerical simulation of semi-submerged propeller 841-B and investigation of its hydrodynamic characteristics, in: The 20th National Conference on Electrical, Computer and Mechanical Engineering, 1402 (In Persian).
- [24] M. Barzegar Rahimi, M. Salari, Y. Barzegar Rahimi, S.S. Taqavi Khesal, Investigating the effect of changing the immersion depth on the hydrodynamic characteristics of the semi-submerged propeller 841-B, in: The 20th National Conference on Electrical, Computer and Mechanical Engineering, 1402 (In Persian).
- [25] M. Barzegar Rahimi, M. Salari, Y. Barzegar Rahimi, S.S. Taqavi Khesal, Studying and checking the meshing of semi-submerged propeller 841-B in Star CCM software, in: The 20th National Conference on Electrical, Computer and Mechanical Engineering, 1402 (In Persian).
- [26] E.A. Heath, Improvement in Screw-propellers, 218438, 1879.
- [27] B.T. Barnett, Propeller, 2160323, 1939.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Barzegar Rahimi, Y. Barzegar Rahimi, M. Salari, Investigating the effect of creating a vertical groove on the surface of a semi-submerged propeller blades, Amirkabir J. Mech Eng., 56(6) (2024) 765-790.

DOI: [10.22060/mej.2024.23088.7716](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23088.7716)

