



## Hydroacoustic and hydrodynamic optimization of a high-skew marine propeller

Mohammad Reza Najafi<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University; [Drmrnajafi@ihu.ac.ir](mailto:Drmrnajafi@ihu.ac.ir)

### ARTICLE INFO

*Article History:*

Received: 21 Dec 2024

Last modification: 17 May 2025

Accepted: 17 Jun 2025

Available online: 19 Jun 2025

*Article type:*

Research paper

*Keywords:*

Reducing propeller noise

Hydroacoustic

Increasing efficiency

Taguchi

high skew propeller

### ABSTRACT

One of the main sources of noise generation from marine vehicles is propellers. The noise generated by propellers can lead to identify by detection systems and have negative effects on marine ecosystems. Researchers have investigated various methods to reduce the noise of marine propellers. However, what is important in practice is the simultaneous reduction of noise with an increase in propeller efficiency, which has received less attention. In this paper, while investigating various geometric parameters in order to achieve an optimal noise-reduced propeller, the increase in propeller efficiency is also addressed. Numerical simulations have been conducted using computational fluid dynamics (CFD) based on the finite volume method and the STAR-CCM+ software. To validate the hydroacoustic and hydrodynamic simulations, a conventional propeller with available data was utilized. The results of this study indicate that the high-skew propeller, after the optimization process, under equal operating conditions, achieved a 1.95% increase in efficiency and a 5.3 dB reduction in noise at the first blade passing frequency compared to the conventional propeller.

ISSN: 2645-8136



DOI: <http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.4>

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



## بهینه‌سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی یک پروانه دریایی اسکيو بالا

محمد رضا نجفی\*<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، [Drmmajafi@ihu.ac.ir](mailto:Drmmajafi@ihu.ac.ir)

### چکیده

یکی از اصلی‌ترین منابع تولید نویز وسیله‌های دریایی، پروانه‌ها هستند. نویز تولید شده از پروانه‌ها می‌تواند منجر به شناخته شدن توسط سامانه‌های آشکارساز شده و تأثیرات منفی بر زیست بوم‌های دریایی داشته باشد. محققان روش‌های مختلفی را به منظور کاهش نویز پروانه‌های دریایی مورد بررسی قرار داده‌اند. اما آنچه در عمل اهمیت پیدا می‌کند کاهش نویز همزمان با افزایش بازدهی پروانه است که کمتر مورد توجه واقع شده است. در این مقاله ضمن بررسی پارامترهای مختلف هندسی به منظور دستیابی به یک پروانه بهینه کاهش نویز یافته، همزمان به افزایش بازدهی پروانه نیز پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با تکیه بر روش حجم محدود و نرم‌افزار STAR-CCM+ انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی از یک پروانه متداول که داده‌های آن موجود می‌باشد، استفاده شده است. نتایج در این تحقیق نشان می‌دهد پروانه اسکيو بالا پس از بهینه‌سازی انجام شده، در شرایط کارکردی برابر، سبب افزایش بازدهی به میزان ۱/۹۵ درصد و همچنین کاهش نویز تولیدی ۵/۳ دسی‌بل در فرکانس عبوری پره اول نسبت به پروانه متداول شده است.

### اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

کاهش نویز پروانه

هیدروآکوستیک

افزایش بازدهی

تاگوچی

پروانه اسکيو بالا

DOI: <http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.4>

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



پروانه اثر گذار باشد و آن را کاهش دهد. گائو و همکاران [23] به بررسی عددی و مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی و کاویتاسیون گردابی نوک یک پروانه معمولی و ۵ پروانه وینگلت (نوک کج) پرداخته‌اند. تفاوت این ۶ پروانه فقط تغییرات زاویه ریک (Rake Angle) در نوک پره‌ها بوده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کجی نوک پره به ندرت بر روی بازدهی پروانه تاثیر می‌گذراند. در این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد اختلاف فشار در ناحیه پر فشار و کم فشار پروانه وینگلت کمتر از پروانه معمولی می‌باشد، دلیل آن هم افت کمتر فشار در ناحیه کم فشار پروانه وینگلت نسبت به پروانه معمولی می‌باشد، در نتیجه ضریب تراست پروانه با افزایش زاویه ریک نوک پره کاهش می‌یابد.

یکی از روش‌ها جهت کاهش نوپز تولیدی پروانه، تغییرات در زاویه اسکيو می‌باشد. در این مقاله به طراحی پروانه اسکيو بالا به صورت دو هدفه کاهش نوپز تولیدی و افزایش بازدهی پرداخته شده است. در ادامه به مروری بر پژوهش‌های انجام شده پروانه اسکيو بالا پرداخته می‌شود:

گرچی و همکاران [24]، اثر تغییرات زاویه ریک و اسکيو را بر روی نوپز پروانه بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد افزایش زاویه اسکيو تا ۴۵ درجه باعث کاهش نوپز تولیدی پروانه می‌شود. همچنین افزایش زاویه ریک باعث کاهش نوپز تولیدی می‌شود. ولی افزایش این دو پارامتر باعث کاهش بازدهی و تراست پروانه هم می‌شود. گرام و همکاران [25]، به بررسی نوپز و کاویتاسیون نوک دو پروانه اسکيو بالا با زاویه اسکيو ۱۷ و ۳۸ به صورت عددی و تجربی پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد پروانه زاویه اسکيو بالاتر، دارای نوپز تولیدی کمتری در فرکانس‌های مختلف بوده ولی افزایش زاویه اسکيو باعث کاهش ضریب تراست پروانه می‌شود. هادی پور و همکاران [26]، به منظور پیش‌بینی نوپز یک پروانه اسکيو بالا از معادلات فاکس ویلیامز-هاوکنگز (FW-H) استفاده کرده‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش بارگذاری بر روی پره پروانه مقدار نوپز پروانه بیشتر می‌شود. همچنین مقدار نوپز تولیدی پروانه در قسمت لبه حمله بیشتر از بقیه قسمت‌های پروانه می‌باشد. کوخوان و همکاران [27]، به شبیه‌سازی عددی و تست تجربی یک پروانه متداول و یک پروانه اسکيو بالا با زاویه اسکيو ۳۰ درجه، برای یک زیرسطحی جهت پیش‌بینی نوپز تولیدی پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد نوپز تولیدی در پروانه اسکيو بالا در جهت محوری نسبت به پروانه متداول کاهش چشمگیری داشته است. ابراهیمی و همکاران [28] تأثیر پارامترهای هندسی مانند تعداد پره‌ها، قطر پروانه، نسبت مساحت گسترش یافته و زاویه گام هندسی را مورد بررسی قرار داده و الگوریتم جدیدی برای طراحی بهینه پروانه با در نظر گرفتن ملاحظات هیدرودینامیکی و آکوستیکی پیشنهاد دادند. قاسمی و قدیمی [29]

امروزه کاهش نوپز سیستم رانش شناورها به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید نوپز [1] مورد توجه طراحان قرار گرفته است [2]. کاهش نوپز پروانه‌ها می‌تواند نوپز کلی شناور را بطور چشمگیری کاهش دهد [3]. از روش‌های مختلفی به منظور کاهش نوپز پروانه‌ها استفاده شده است. استفاده از پوشش‌دهی پروانه‌ها [4-6]، بارگذاری نوک پره‌ها [7-9]، خم کردن نوک پره بصورت منحنی به سمت سطح مکش پره [10-11]، اصلاح توپی پروانه [12-13]، استفاده از داکت حول پروانه [14-15] و به تاخیر انداختن کاویتاسیون [16] تنها بخش از روش‌هایی است که به منظور کاهش نوپز پروانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برتا و همکاران [17] یک پروانه CLT را به دو روش عددی RANSE و روش شبکه پتانسیل (panel method) و تست حوضچه کشش و تونل کاویتاسیون مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج عددی و آزمایشگاهی آنها نشان داد که این پروانه می‌تواند علاوه بر کاهش نوپز، باعث کاهش پدیده کاویتاسیون نیز گردد. سانچز و همکاران [18] به بررسی عددی تأثیر دو پارامتر اندازه انحنای لبه پشتی پره و زاویه فلپ (زاویه خم نوک) بر عملکرد پروانه‌های با نوک خم (وینگلت) با استفاده از معادلات RANS پرداختند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد افزایش اندازه انحنای پره باعث کاهش ضریب تراست و افزایش بازدهی پروانه می‌شود. همچنین افزایش زاویه فلپ (زاویه خم نوک) باعث کاهش نوپز، ضریب تراست و بازدهی پروانه می‌شود. آیانیلو و همکاران [19] در پژوهشی به بررسی عددی و تجربی برای یک شناور با پروانه CLT پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد شبیه‌سازی عددی با درصد خطای کمی نوپز تولیدی را پیش‌بینی کرده است. گاگرو و همکاران [20] به بهینه‌سازی پروانه با نوک کج) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پارتو ( Pareto designs) بر اساس محیط modeFRONTIER به منظور بهبود بازدهی و رفتار کاویتاسیون و نوپز پروانه پرداختند. ژو و گو [21] پروانه وینگلت را با روش عددی (LES Large Eddy Simulation) شبیه‌سازی و بررسی کردند. نتایج در این مقاله نشان می‌دهد که قدرت ورتکس نوک توسط وینگلت تضعیف می‌شود. بنابراین، وجود کجی در نوک پره منجر به کاهش حجم بخار می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش کاویتاسیون ورتکس نوک پره می‌گردد. کهر و همکاران [22] بر روی کاویتاسیون تشکیل شده بر روی پروانه‌هایی که دارای شفت زاویه‌دار می‌باشند، پرداختند. آن‌ها ۴ حالت هندسه جدید بر مبنای هندسه اصلی پروانه CLT ایجاد کرده و سپس اثر زاویه diffused را بررسی کردند. اگر پروانه دارای شفت زاویه‌دار باشد می‌تواند بر روی کاویتاسیون تشکیل شده

$$\rho(x, t) = \frac{1}{4\pi c^2} \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{\Omega} \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{|x-y|} dy \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\Omega$  دامنه انتگرال گیری روی حجمی است که آشفتگی در آن باعث ایجاد نویز می‌گردد

فشار آکوستیکی کل به دو مؤلفه فشار ضخامتی  $p'_T$  و فشار بارگذاری  $p'_L$  تقسیم می‌شود. نویز ضخامتی ناشی از جابجایی سیال در اثر حرکت جسم درون سیال است. پدیده دیگری که در اثر حرکت جسم درون سیال ایجاد می‌شود، توزیع فشار مثبت و منفی بر سطوح پشت و روی جسم می‌باشد. در واقع این توزیع فشار منشا اصلی ایجاد تراست در پروانه‌ها می‌باشد. به دلیل این اختلاف فشار در دو طرف جسم، یک منبع نویز دو قطبی ایجاد می‌شود که به آن نویز بارگذاری گفته می‌شود. بنابراین نویز کل ناشی فقط ناشی از منابع تک قطبی (نویز ضخامتی) و منابع دو قطبی (نویز بارگذاری) است. این مؤلفه‌ها از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$4\pi P'_T(x, t) = \int_s \left[ \frac{\rho(\dot{U}_n + U_n)}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \int_s \left[ \frac{\rho u_n(r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (2)$$

$$4\pi P'_L(x, t) = \frac{1}{c} \int_s \left[ \frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{c} \int_s \left[ \frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{c} \int_s \left[ \frac{L_r(r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (3)$$

که  $c$  سرعت صوت در سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $r$  فاصله منبع صوت و ناظر،  $M$  عدد ماخ،  $M_r$  تصویر بردار ماخ بر روی بردار  $t, x$  و  $\vec{x}$  زمان و مکان ناظر،  $p$  فشار هیدرودینامیکی،  $n$  بردار نرمال یکه سطح،  $\vec{u}$  سرعت منبع نویز واقع شده روی سطح صلب و  $\vec{v}$  سرعت جریان (در صورت صلب بودن جسم، سرعت جریان و سرعت منبع برابر است). تعریف می‌شوند. پارامترهای رابطه (۲) و (۳) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_i = (1 - \frac{\rho}{\rho_0})v_i + \frac{\rho u_i}{\rho_0} \quad (4)$$

$$L_i = P_{ij}\hat{n}_i + \rho u_i(u_n - v_n) \quad (5)$$

به منظور دستیابی به بالاترین نیروی رانش ممکن، حداقل گشتاور و راندمان، به بهینه سازی پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی یک پروانه پنج پره در شرایط آب آزاد پرداخته و توانستند پروانه های دارای بازدهی بالاتر از پروانه های معمولی ارائه کنند. ابراهیمی و همکاران [30] عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه سری B پنج پره را در تونل کاویتاسیون مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین به منظور استخراج میزان نویز از دو هیدروفن استفاده نموده و اثرات فشار محیط پروانه و عدد کاویتاسیون بر سطح فشار صدای پروانه را تعیین نمودند. رزاقیان و همکاران [31] تأثیر پارامترهای هندسی، شامل زاویه ریک، نسبت گام هندسی و تعداد پره‌ها بر عملکرد هیدرودینامیکی و آکوستیکی پروانه، تحت شرایط بدون کاویتاسیون را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند با افزایش زاویه ریک، نسبت گام هندسی و تعداد پره‌ها به صورت جداگانه، بازده هیدرودینامیکی در هر نسبت پیشروی کاهش می‌یابد.

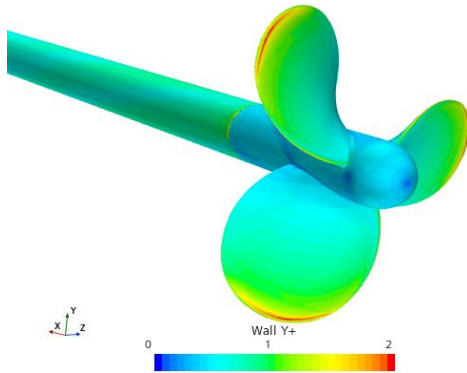
با ملاحظه پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی پروانه‌های اسکيو بالا، دراکثر پژوهش‌ها، طراحی پروانه به صورت جزئی و با یک هدف واحد (یا کاهش نویز یا افزایش بازدهی) بررسی شده است. تمرکز بر اثر افزایش زاویه اسکيو و استخراج بهینه ترین هندسه پروانه های اسکيو بالا در کنار جلوگیری از کاهش بازدهی، هدف اصلی این مقاله بوده است. تاکنون پژوهشی برای طراحی پروانه‌های اسکيو با دو هدف یعنی افزایش راندمان و کاهش نویز تولید به صورت همزمان انجام نشده است. در این پژوهش معادلات انتشار نویز به اختصار توضیح داده شده و سپس شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی یک پروانه متداول که داده‌های آن موجود می‌باشد، مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. پس از بررسی پارامتریک و بهینه‌سازی پروانه اسکيو بالا، عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی که از ویژگی‌های بارز این نوع از پروانه‌ها است، بررسی و با یک پروانه متداول سری B در شرایط کارکردی برابر، مقایسه شده است.

## ۲- روش حل و معتبرسازی شبیه‌سازی

### ۲-۱- معادلات حاکم

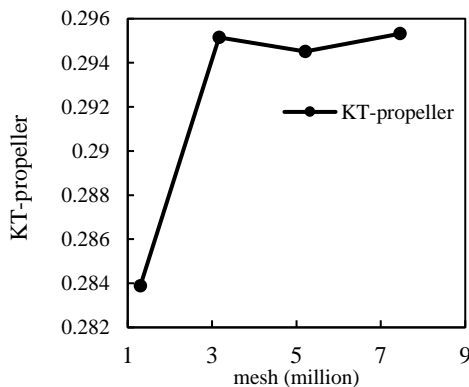
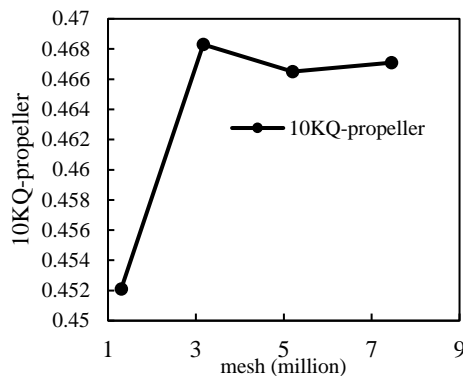
لایت‌هیل (Lighthill) با استفاده از روابط اصلی حاکم بر جریان سیال یعنی روابط پیوستگی و مومنوم، معادله کلی تولید صوت از ناشی از تنش برشی سیال را استخراج کرد [32]. یکی از حل‌های ساده تحلیلی که برای معادله لایت‌هیل ارائه شده است، حل انتگرالی آن است. این روش حل نخستین بار توسط فوکس ویلیامز و دیوید هاوکینگز [33] پیشنهاد شده است.

شکل ۳ کانتور  $Y^+$  بر روی سطح پروانه در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مقدار  $Y^+$  در نزدیک دیواره کمتر از ۱ می‌باشد.



شکل ۳ کانتور  $Y^+$  بر روی سطح پروانه

شکل ۴ نتایج مربوط به بررسی استقلال شبیه‌سازی از شبکه‌بندی را نشان می‌دهد، که در آن تغییرات مقادیر پارامترهای مهم (ضریب تراست و گشتاور) در شبکه‌های مختلف مقایسه شده است. این بررسی به منظور اطمینان از صحت نتایج و کاهش تاثیرات ناشی از اندازه و تراکم شبکه‌بندی انجام شده است.



شکل ۴ بررسی استقلال از شبکه (الف) ضریب تراست (ب) ضریب گشتاور

به منظور اطمینان از صحت بررسی استقلال از شبکه از روش همگرایی شبکه (Grid Convergence Index) نیز (جدول ۱) استفاده شده است. این روش توسط کلیک و همکاران ارائه شده،

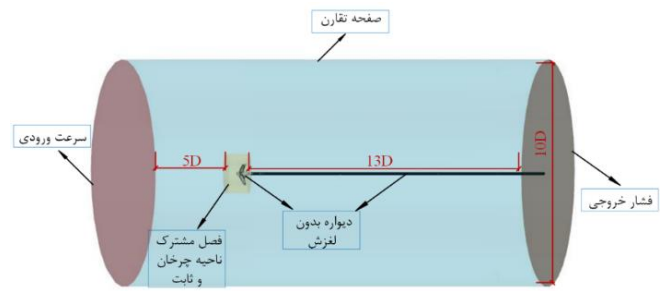
با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن آب در اعداد ماخ پایین،  $\rho$  با  $\rho_0$  برابر است. همچنین، با توجه به اینکه پروانه بصورت صلب در نظر گرفته میشود، مقدار سرعت برخورد جریان به پروانه ( $v$ ) و سرعت منبع صوت ( $u$ ) با هم برابر است. بنابراین خواهیم داشت:

$$U_i = v_i \quad (6)$$

$$L_i = P_{ij} \hat{n}_i \quad (7)$$

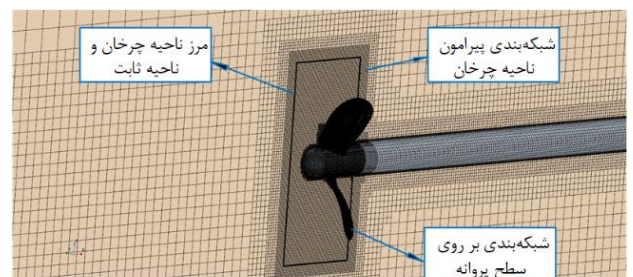
## ۲-۲- استقلال از شبکه

برای اعتبارسنجی حل، از تست تجربی پروانه DTMB4119، ۳ پره‌ای استفاده شده است [34]. شکل زیر ابعاد و شرایط دامنه محاسباتی در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این مطالعه، فاصله مرز ورودی از پروانه، مرز خروجی و دیواره‌های جانبی دامنه با توجه به دستورالعمل ITTC، تعیین شده است [35]، و حساسیت به این ابعاد در مراحل اولیه شبیه‌سازی بررسی شده است.



شکل ۱ ابعاد و شرایط دامنه محاسباتی

برای شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی از شبکه‌بندی سازمان یافته در نرم‌افزار STAR-CCM+ استفاده شده است. اندازه شبکه در محل‌هایی چون نزدیک جسم، درون ناحیه چرخان و همچنین ناحیه پشت جسم ریزتر می‌شود. همچنین فاصله اولین شبکه محاسباتی از دیواره ۰/۰۵ میلی‌متر و تعداد شبکه‌های داخل لایه مرزی ۲۲ شبکه در نظر گرفته شده است. شکل ۲ شبکه‌بندی دامنه محاسباتی و بر روی سطح پروانه را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شبکه‌بندی بر روی پروانه و دامنه محاسباتی

که جزئیات فرمول‌بندی این روش در مرجع [36]، آورده شده و در این جا بصورت خلاصه اشاره می شود.

جدول ۱ خطای گسسته‌سازی شبیه‌سازی بر اساس روش همگرایی شبکه (GCI)

ضریب گشتاور	ضریب تراست	پارامتر
10KQ	KT	
۵۲۰۲۷۰۰	۵۲۰۲۷۰۰	تعداد شبکه (ریز) $N_1$
۳۱۶۷۵۴۴	۳۱۶۷۵۴۴	تعداد شبکه (متوسط) $N_2$
۱۲۹۹۷۰۶	۱۲۹۹۷۰۶	تعداد شبکه (درشت) $N_3$
۱/۱۷۹۹	۱/۱۷۹۹	نسبت اندازه شبکه‌بندی ریز $r_{21}$
۱/۳۴۵۷	۱/۳۴۵۷	نسبت اندازه شبکه‌بندی درشت $r_{32}$
۰/۴۶۶۵	۰/۲۹۴۵	جواب شبکه‌بندی ریز $\phi_1$
۰/۴۶۸۲	۰/۲۹۵۲	جواب شبکه‌بندی متوسط $\phi_2$
۰/۴۵۲۱	۰/۲۸۳۹	جواب شبکه‌بندی درشت $\phi_3$
۷/۸۹۸۴	۱۰/۱۳۰۲	نسبت ظاهری $p$
۰/۳۸۵۹	۰/۲۱۷۳	خطای نسبی تقریبی $e_a^{21}$
۰/۱۴۳۵	۰/۰۵۰۱	خطای نسبی برون‌یابی شده $e_{ext}^{21}$
۰/۱۷۹۱	۰/۰۶۲۶	درصد خطای شبکه‌بندی متوسط $GCI_{Mean}^{21}$

می‌شود) پارامتر  $\mathcal{E}$  به صورت  $\mathcal{E}_{21} = \phi_2 - \phi_1$ ،  
 $\mathcal{E}_{32} = \phi_3 - \phi_2$  است که در آن  $\phi_i$  نشان‌دهنده جواب (در اینجا  $K_Q$  و  $K_T$ ) روی تعداد شبکه‌بندی مورد بررسی است. حال می‌توان خطای نسبی تقریبی  $(e_a^{32})$ ، خطای نسبی برون‌یابی  $(e_{ext}^{32})$  و ضریب همگرایی شبکه GCI بصورت زیر بدست می‌آید.

$$e_a^{32} = \frac{\phi_2 - \phi_3}{\phi_2} \quad (11)$$

$$e_{ext}^{32} = \frac{\phi_{ext}^{23} - \phi_2}{\phi_{ext}^{23}} \quad (12)$$

$$GCI_{Mean}^{32} = \frac{1.25 e_a^{32}}{r_{32}^p - 1} \quad (13)$$

مقدار GCI شبکه‌بندی متوسط برای ضریب پیشران و ضریب گشتاور پروانه در ضریب پیشروی ۰/۵ به ترتیب ۰/۰۶۲۶ و ۰/۱۷۹۰ درصد که مقدار مطلوبی هستند و برای محاسبات قابل قبول می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبکه‌بندی با تعداد مش ۳/۲ میلیون در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

### ۳- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

شکل ۵ مقایسه نتایج عملکرد هیدرودینامیکی تجربی و شبیه‌سازی عددی پروانه DTMB4119 در آب آزاد را نشان می‌دهد. همچنین درصد خطای ضرایب هیدرودینامیکی (تراست، گشتاور و بازدهی) نسبت به آزمایش تجربی در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی با درصد خطای کمتر از ۴ درصد نسبت به نتایج تجربی بدست آمده است، که مطلوب می‌باشد. اختلاف درصد خطا میان شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های عددی، کیفیت مش‌بندی (با توجه به محدود بودن سیستم محاسباتی)، شرایط محیطی متفاوت و یا خطای اندازه‌گیری در داده‌های تجربی، باشد.

$N$  تعداد شبکه‌بندی،  $h$  اندازه میانگین شبکه،  $\Gamma$  نسبت میانگین شبکه،  $\phi$  مقدار ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه،  $\mathcal{E}$  اختلاف ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه در اندازه‌های مختلف و  $p$  مرتبه ظاهری است که فرمول آن در زیر ارائه شده است.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\mathcal{E}_{32}}{\mathcal{E}_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (8)$$

که :

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (9)$$

$$s = 10 \operatorname{sgn} \left( \frac{\mathcal{E}_{32}}{\mathcal{E}_{21}} \right) \quad (10)$$

که در آن، فاکتور  $\Gamma$  برای سه شبکه مختلف، یعنی (۱) ریز، (۲)

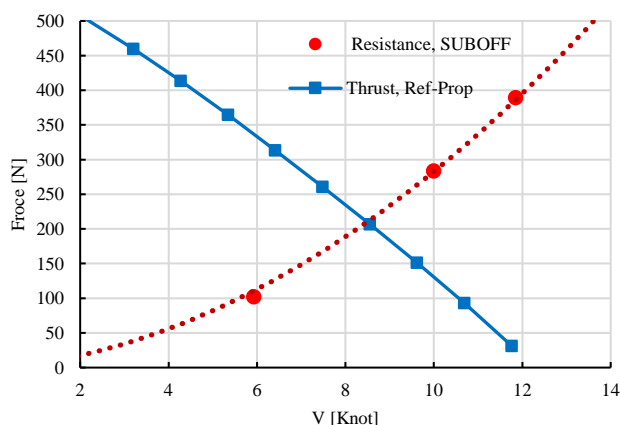
متوسط و (۳) درشت  $r_{32} = \frac{h_3}{h_2}$ ،  $r_{21} = \frac{h_2}{h_1}$  (که  $h_i$  مقدار میانگین اندازه شبکه که از تعداد شبکه  $(N_i)$  و دامنه محاسباتی تعیین

زیرسطحی با مشخصات جدول ۳ جهت بررسی و طراحی پروانه انتخاب شده است [37].

جدول ۳ مشخصات هندسی زیرسطحی

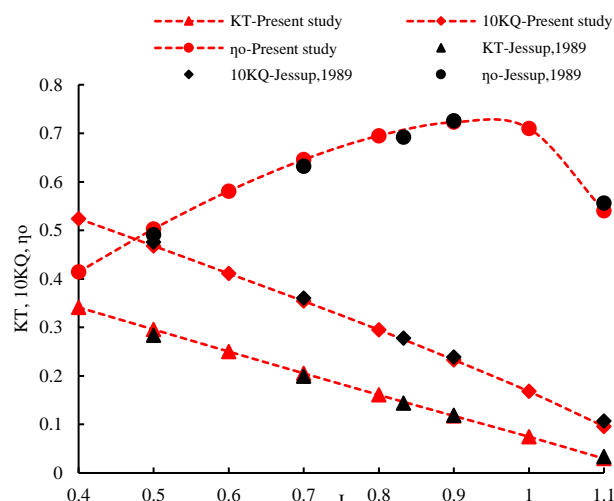
مشخصات	مقدار
طول کل [m]	۴/۳۵۶
طول بین دو عمود [m]	۴/۲۶۱
بیشینه قطر بدنه [m]	۰/۵۰۸
مرکز بویانسی [m]	۰/۴۶۲۱ برابر طول کل
حجم جابه‌جایی [m <sup>3</sup> ]	۰/۷۰۸
سطح خیس شده [m <sup>2</sup> ]	۵/۹۹۸

شکل ۷ نمودار برخورد مقاومت بدنه زیرسطحی و تراست تولیدی پروانه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ نمودار مقاومت بدنه زیرسطحی و تراست تولیدی پروانه در سرعت ۸/۵ نات به هم برخورد می‌کنند. سرعت طراحی نهایی کمی عقبتر از برخورد دو نمودار یعنی سرعت ۸ نات ( $V_s=8$  knot) انتخاب شده است.

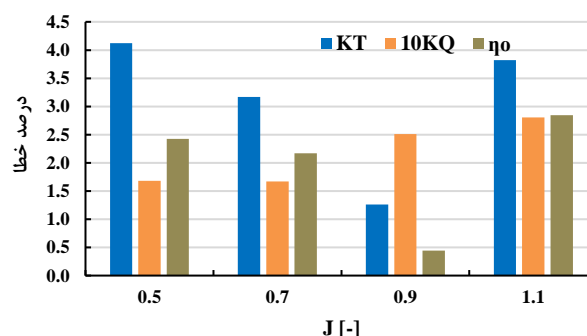


شکل ۷ نمودار مقاومت بدنه زیرسطحی و تراست تولیدی پروانه در سرعت‌های مختلف

متوسط سرعت و یک ورودی در سرعت ۸ نات در محل پروانه ۲/۸۲ متر بر ثانیه ( $V_A=2.82$  m/s) می‌باشد (شکل ۸). در نتیجه از این سرعت ورودی در شبیه‌سازی‌های آب آزاد استفاده می‌شود.



شکل ۵ مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی نتایج تجربی و عددی پروانه DTMB4119 [34]



شکل ۶ مقایسه درصد خطای نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی پروانه DTMB4119 [34]

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- معرفی پروانه مرجع و شرایط کارکردی

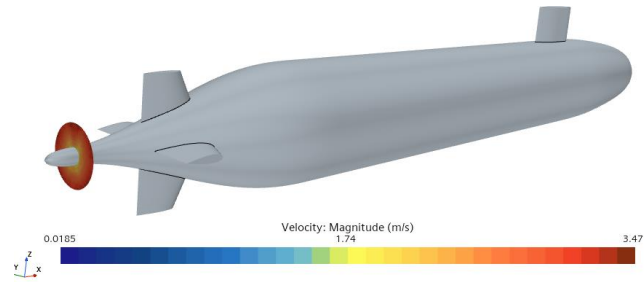
به منظور مقایسه عملکرد پروانه‌ها، یک پروانه متداول (یک پروانه سری B) به عنوان پروانه مرجع انتخاب شده و مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ مشخصات پروانه مرجع

مشخصات	مقدار
نوع	سری B
قطر (میلیمتر)	۲۲۰
تعداد پره	۳
نسبت قطر هاب به قطر پروانه (d/D)	۰/۲
نسبت میانگین پیچ به قطر پروانه (P/D)	۱/۰۳
نسبت سطح گسترش یافته ( $A_E/A_0$ )	۰/۳۵

جدول ۴: نتایج عملکرد هیدرودینامیکی پروانه با زاویه اسکيو متفاوت در تراست برابر

زاویه اسکيو	تراست J	Eta بازدهی	تغییرات بازدهی	KT	10KQ
۰	۰/۵۱۳	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸
۳۶	۰/۵۱۱	۰/۵۱۸	+۰/۳۹	۰/۲۴۳	۰/۳۸۱
۵۴	۰/۵۱۴	۰/۵۱۹	+۰/۵۸	۰/۲۴۶	۰/۳۸۷
۷۲	۰/۵۰۵	۰/۵۱۷	+۰/۱۹	۰/۲۳۹	۰/۳۷۱
۹۰	۰/۴۹۹	۰/۵۱۴	-۰/۳۹	۰/۲۳۴	۰/۳۶۱



شکل ۸ سرعت و یک ورودی به پروانه در محل پروانه

با مشخص شدن سرعت جریان ورودی  $V_A$ ، دور چرخش پروانه  $n$  و همچنین قطر  $D$  پروانه ضریب پیشروی کارکردی پروانه بدست می‌آید.

$$\begin{cases} V_A = 2.82 \text{ m/s} \\ n = 1500 \text{ rpm} = 25 \text{ rps} \\ D = 22 \text{ cm} \end{cases} \rightarrow J = \frac{V_A}{n \cdot D} \quad (14)$$

$$\rightarrow J = \frac{2.82}{25 * 0.22} = 0.513$$

با انجام شبیه‌سازی پروانه در ضریب پیشروی ( $J=0/513$ )، پروانه مرجع ۳۵۷ نیوتن تراست تولید می‌کند همچنین بازدهی پروانه ۵۱/۶ درصد می‌باشد.

با توجه بر اینکه مهمترین و بیشترین نویز تولیدی از پروانه در اولین (BPF1) و دومین (BPF2) فرکانس عبوری پره ایجاد می‌شود. جهت مقایسه بهتر عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌ها، سطح فشار صوت تولیدی در این دو فرکانس مقایسه و بررسی می‌شوند. برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت هیدروفون در فاصله ۱ متر بالای پروانه قرار گرفته شده است. در جدول ۵ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه با زاویه اسکيو متفاوت ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با زاویه اسکيوهای مختلف در هیدروفون فاصله ۱ متر

مدل پروانه	فرکانس (Hz)	BPF1 شدت تغییرات		BPF2 شدت تغییرات	
		SPL (dB)	صوت	SPL (dB)	صوت
S-0	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۹۲/۴	-
S-36	۷۵/۴	۱۰۵/۲	-۰/۴	۹۷/۶	+۵/۲
S-54	۷۴/۹	۱۰۲/۹	-۲/۷	۸۹/۲	-۳/۲
S-72	۷۶/۳	۱۰۰/۲	-۵/۴	۹۳/۹	+۱/۵
S-90	۷۷	۱۰۱/۲	-۴/۴	۹۳/۶	+۱/۲

#### ۴-۲- بررسی پارامتریک تغییر زاویه اسکيو

در این بخش تاثیرات زاویه اسکيو بر روی بازدهی و نویز پروانه (مرجع) بررسی شده است. با توجه به مرور و مطالعه پژوهش‌های انجام شده، شش زاویه (۰-۳۶-۵۴-۷۲-۹۰ درجه) برای زاویه اسکيو پروانه انتخاب گردیده است. زاویای اسکيو انتخاب شده در این پژوهش بر اساس مطالعات انجام شده و همچنین پروانه‌های ساخته شده اسکيو بالا و با در نظر گرفتن محدوده زاویای معمول این نوع پروانه‌ها تعیین شده است. این زاویا، به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که علاوه بر حفظ قابلیت عملیاتی و ساختاری، تغییرات تدریجی و منطقی در پارامترهای طراحی ایجاد کنند تا اثر دقیق زاویه اسکيو بر عملکرد پروانه در شرایط مختلف به‌خوبی تحلیل شود. مشخصات هندسی تمام پروانه‌ها یکسان اما با اسکيو متفاوت هستند. مشخصات پروانه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. در این بخش نرخ تغییر زاویه اسکيو پروانه در شعاع‌های مختلف خطی در نظر گرفته شده است. هندسه‌ها پروانه و اعمال تغییرات هندسی مورد نیاز در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار PropCad انجام شده است. با انجام شبیه‌سازی آب آزاد پروانه‌ها، داده‌های عملکرد هیدرودینامیکی آب آزاد پروانه‌ها با تراست برابر در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقایسه تمام پروانه‌ها در شرایط تراست برابر انجام شده است.

با ملاحظه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود افزایش اسکيو پروانه مرجع تا زاویه ۷۲ درجه سبب افزایش بازدهی در پروانه می‌شود. همچنین با افزایش اسکيو نویز تولیدی از پروانه هم کاهش می‌یابد. بهترین زاویه اسکيو از دیدگاه افزایش بازدهی و کاهش نویز تولیدی زاویه اسکيو ۵۴ درجه می‌باشد که سبب افزایش بازدهی به میزان ۰/۶ درصد از پروانه مرجع و کاهش نویز ۲/۷ دسی‌بل در اولین فرکانس عبوری پره و ۳/۲ دسی‌بل در دومین فرکانس عبوری پره شده است. در ادامه پژوهش سه زاویه اسکيو ۳۶، ۵۴ و ۷۲

۰/۸	Cubic	۵۴	طراحی ۶
۰/۹	B-series	۷۲	طراحی ۷
۰/۸	BB-series	۷۲	طراحی ۸
۰/۸۵	Cubic	۷۲	طراحی ۹

درجه با استفاده از روش تاگوچی همراه با سایر پارامترها، بررسی می‌شود تا بهترین زاویه اسکيو برای پروانه انتخاب گردد.

### ۳-۴- بهینه‌سازی دو هدفه به روش تاگوچی

با توجه به بررسی پارامتریک پارامترها در بخش قبل، در این بخش به بررسی ترکیبی پارامترها و بهینه‌سازی دو هدفه با استفاده از روش تاگوچی پرداخته می‌شود.

با توجه به بدنه مرجع و همچنین با توجه بر اینکه ضریب پیشروی پروانه مرجع در پشت بدنه زیرسطحی ۰/۵۱۳ می‌باشد. پارامتر گام هندسی پروانه (P/D) هم در روش تاگوچی بررسی شده است، تا بیشترین کارایی پروانه در ضریب پیشروی مورد نظر در پشت بدنه اتفاق افتد و بیشترین کارایی از پروانه گرفته شود. بدین منظور چند P/D جهت بررسی انتخاب می‌شود.

### ۳-۴-۱- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به منظور بررسی پارامترها، هر یک با سه اندازه (مقدار) مختلف با سه نوع پروانه مرسوم بر اساس توزیع اسکيو در نظر گرفته شده که در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ مقادیر در نظر گرفته شده در پارامترهای پروانه اسکيو بالا

سطح	زاویه اسکيو (درجه)	نوع نرخ تغییر اسکيو	P/D
۱	۳۶	B-series	۰/۸
۲	۵۴	BB-series	۰/۸۵
۳	۷۲	Cubic	۰/۹

روش‌های مختلفی برای بررسی تاثیر یک پارامتر وجود دارد. در این پژوهش از روش تاگوچی برای بررسی این سه پارامتر استفاده گردیده است. با توجه به وجود سه پارامتر در سطح بررسی روش تاگوچی ۹ حالت ترکیبی پارامترها پیشنهاد داده است. جدول اورتوگونال تاگوچی و مقادیر آنها برای هر آزمایش در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷ جدول اورتوگونال و مقادیر پارامترهای پروانه اسکيو بالا در طراحی به روش تاگوچی

شماره شبیه‌سازی	زاویه اسکيو (درجه)	نوع نرخ تغییر اسکيو	P/D
طراحی ۱	۳۶	B-series	۰/۸
طراحی ۲	۳۶	BB-series	۰/۸۵
طراحی ۳	۳۶	Cubic	۰/۹
طراحی ۴	۵۴	B-series	۰/۸۵
طراحی ۵	۵۴	BB-series	۰/۹

### ۳-۴-۲- ارائه و بررسی نتایج ترکیب پارامترها

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته شده بر روی ۹ هندسه پروانه با ترکیب پارامترها که مشخصات آن در جدول ۷ آورده شده است، پرداخته می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها همانطور که در بخش قبل نیز توضیح داده شد، در شرایط یکسان با پروانه مرجع و تراست برابر، جهت مقایسه بهتر با پروانه مرجع انجام شده است. در جدول ۸ نتایج عملکرد هیدرودینامیکی ۹ پروانه طراحی شده و مقایسه آن با پروانه مرجع ارائه شده است.

جدول ۸ مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی پروانه مرجع با ۹ پروانه طراحی شده با ترکیب پارامترها در تراست برابر

مدل پروانه	تراست	J	Eta بازدهی	تغییرات بازدهی	KT	10KQ
مرجع	۰/۵۱	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸	
طراحی ۱	۰/۴۵	۰/۵۳۲	+۳/۱	۰/۱۸۵	۰/۲۴۷	
طراحی ۲	۰/۴۵	۰/۵۳۱	+۲/۹	۰/۱۹۹	۰/۲۷۶	
طراحی ۳	۰/۴۸	۰/۵۲۶	+۱/۹	۰/۲۱۳	۰/۳۰۷	
طراحی ۴	۰/۴۸	۰/۵۳	+۲/۷	۰/۱۹۵	۰/۲۶۶	
طراحی ۵	۳۵۸	۰/۴۷	+۱/۷	۰/۲۰۶	۰/۲۹۳	
طراحی ۶	۰/۴۴	۰/۵۳۱	+۲/۹	۰/۱۷۹	۰/۲۳۵	
طراحی ۷	۰/۴۶	۰/۵۲۳	+۱/۴	۰/۱۹۸	۰/۲۷۸	
طراحی ۸	۰/۴۳	۰/۵۲۹	+۲/۵	۰/۱۷۲	۰/۲۲۲	
طراحی ۹	۰/۴۴	۰/۵۲	+۰/۸	۰/۱۸۲	۰/۲۴۵	

برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت هیدروفون در فاصله ۱ متر بالای پروانه قرار گرفته شده است. در جدول ۹ نتایج عملکرد هیدرواکوستیکی پروانه مرجع با ۹ پروانه طراحی شده ارائه شده است.

جدول ۹ مقایسه عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با ۹ پروانه طراحی شده با ترکیب پارامترها در تراست برابر

نوع نرخ توزیع اسکیو	BPF1		BPF2		تغییرات SPL (dB)	فرکانس (Hz)	تغییرات SPL (dB)	فرکانس (Hz)	تغییرات SPL (dB)
	شدت صوت SPL (dB)	فرکانس (Hz)	شدت صوت SPL (dB)	فرکانس (Hz)					
مرجع	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۱۵۰/۲	-	۹۲/۴	۹۲/۴	۱۵۰/۲	-
طراحی ۱	۸۶/۵	۱۰۴/۷	-۰/۹	۱۷۲/۹	+۵/۵	۹۷/۹	۹۷/۹	۱۷۲/۹	+۵/۵
طراحی ۲	۸۳/۳	۱۰۴/۱	-۱/۵	۱۶۶/۷	+۴/۳	۹۶/۷	۹۶/۷	۱۶۶/۷	-۱/۵
طراحی ۳	۸۰/۸	۱۰۳/۹	-۱/۷	۱۶۱/۶	+۳/۳	۹۵/۷	۹۵/۷	۱۶۱/۶	-۱/۷
طراحی ۴	۸۴/۴	۱۰۲/۹	-۲/۷	۱۶۸/۸	+۲/۵	۹۴/۹	۹۴/۹	۱۶۸/۸	-۲/۷
طراحی ۵	۸۱/۹	۱۰۲/۳	-۳/۳	۱۶۳/۹	+۰/۸	۹۳/۲	۹۳/۲	۱۶۳/۹	-۳/۳
طراحی ۶	۸۷/۹	۱۰۲/۷	-۲/۹	۱۷۵/۹	+۰/۹	۹۳/۳	۹۳/۳	۱۷۵/۹	-۲/۹
طراحی ۷	۸۳/۵	۱۰۰/۸	-۴/۸	۱۶۶/۹	-۱/۷	۹۰/۷	۹۰/۷	۱۶۶/۹	-۴/۸
طراحی ۸	۸۹/۶	۱۰۱/۱	-۴/۵	۱۷۹/۳	+۰/۳	۹۲/۷	۹۲/۷	۱۷۹/۳	-۴/۵
طراحی ۹	۸۷/۴	۹۹/۸	-۵/۸	۱۷۴/۸	-۱/۷	۹۰/۷	۹۰/۷	۱۷۴/۸	-۵/۸

جدول ۱۰ مقادیر نرمال سازی شده ترکیب سه خروجی

$TL_i$	مقادیر نرمال سازی شده			نویز BPF2 (dB)	نویز BPF1 (dB)	شماره هندسه تلفات (%)	خروجی : ۱
	$N_{i3}$	$N_{i2}$	$N_{i1}$				
۰/۴۷	۱	۱	۰/۹۷۵	۹۷/۹	۱۰۴/۷	۴۶/۸	طراحی ۱
۰/۴۶۶	۰/۹۸۸	۰/۹۹۴	۰/۹۷۷	۹۶/۷	۱۰۴/۱	۴۶/۹	طراحی ۲
۰/۴۶۴	۰/۹۷۸	۰/۹۹۲	۰/۹۸۸	۹۵/۷	۱۰۳/۹	۴۷/۴	طراحی ۳
۰/۴۵۹	۰/۹۶۹	۰/۹۸۳	۰/۹۷۹	۹۴/۹	۱۰۲/۹	۴۷	طراحی ۴
۰/۴۵۵	۰/۹۵۲	۰/۹۷۷	۰/۹۹	۹۳/۲	۱۰۲/۳	۴۷/۵	طراحی ۵
۰/۴۵۶	۰/۹۵۳	۰/۹۸۱	۰/۹۷۷	۹۳/۳	۱۰۲/۷	۴۶/۹	طراحی ۶
۰/۴۴۶	۰/۹۲۶	۰/۹۶۳	۰/۹۹۴	۹۰/۷	۱۰۰/۸	۴۷/۷	طراحی ۷
۰/۴۵	۰/۹۴۷	۰/۹۶۶	۰/۹۸۱	۹۲/۷	۱۰۱/۱	۴۷/۱	طراحی ۸
۰/۴۴۳	۰/۹۲۶	۰/۹۵۳	۱	۹۰/۷	۹۹/۸	۴۸	طراحی ۹

برای تحلیل نتایج، تاگوچی دو روش اصلی پیشنهاد کرده است. روش اول، که به روش استاندارد معروف است، بر اساس محاسبه اثرات فاکتورها و انجام تحلیل واریانس صورت می گیرد. روش دوم که به ویژه برای آزمایش های همراه با تکرار توصیه می شود، روش نسبت سیگنال به نویز است. در این روش، با بررسی تغییرات نتایج، شرایط بهینه و مؤثرترین شرایط کاری شناسایی می شود. به عبارت دیگر، این نسبت میزان پراکندگی داده ها در اطراف یک مقدار خاص را اندازه گیری می کند. هرچه این نسبت بالاتر باشد، پراکندگی کمتر و اثر آن عامل برجسته تر خواهد بود.

حال که مقادیر ترکیبی نرمال سازی شده دو خروجی تلفات و نویز تولیدی محاسبه شده است، می توان به با استفاده از معیار مشخصه کیفیت هرچه کمتر، بهتر است، نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز را برای دو مقادیر ترکیبی دو خروجی  $TL_i$  بدست آورد. این نمودار که با استفاده از نرم افزار مینی تب استخراج شده در شکل ۹ آورده شده است.

با ملاحظه به نتایج مشاهده می شود تمام ترکیب های هندسی استخراج شده از روش تاگوچی باعث افزایش بازدهی و تا حدودی کاهش نویز تولیدی پروانه شده اند. بهترین و بهینه ترین هندسه طراحی شده در ترکیب پارامترها، هندسه شماره ۷ می باشد که سبب افزایش بازدهی پروانه به میزان ۱/۴ درصد و کاهش نویز به میزان ۴/۸ دسی بل در فرکانس عبوری پره اول و ۱/۷ دسی بل در فرکانس عبوری پره دوم شده است. همچنین در این هندسه توان مورد نیاز پروانه از موتور ۱/۴۱ درصد کاهش یافته است که بسیار مطلوب می باشد.

### ۳-۳-۴-بهینه سازی دو هدفه به روش تاگوچی (افزایش بازدهی و کاهش نویز تولیدی)

در روش بهینه سازی تاگوچی، تنها می توان سطوح بهینه را فقط برای یک خروجی محاسبه کرد. بنابراین برای بهینه سازی نسبت به سه خروجی به روش تاگوچی باید با روشی پارامترها را باهم ترکیب کرد. هازورا و همکاران در سال ۲۰۱۰ جهت بهینه سازی نسبت به چند خروجی به روش تاگوچی، استفاده از فاکتور وزنی را پیشنهاد کردند [38]. برای استفاده از این روش باید خروجی ها به گونه ای باشند که هر دو با یک معیار عملکردی بهینه شوند که در این

طراحی ۱۰  
(بهینه‌سازی) ۰/۴۳ ۰/۵۲۶ +۱/۹۵ ۰/۱۷ ۰/۲۱۹

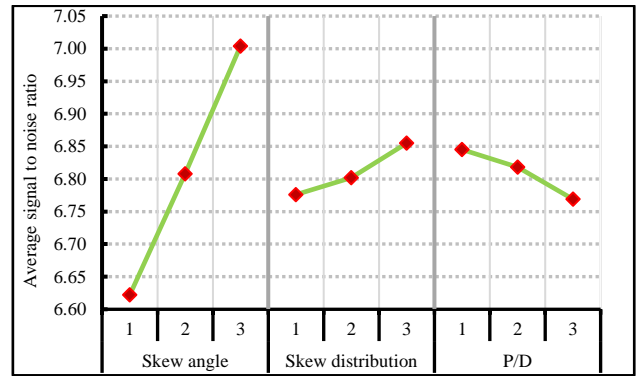
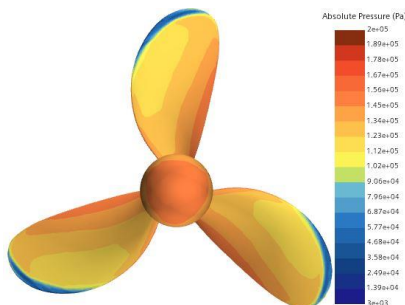
همچنین برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت هیدروفون در فاصله ۱ متر بالای پروانه قرار گرفته شده است. در جدول ۱۲ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه‌های طراحی ۷ و ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۲ مقایسه هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه طراحی شده

تغییرات	BPF2		BPF1		نوع نرخ توزیع اسکيو
	شدت صوت SPL (dB)	فرکانس (Hz)	تغییرات صوت SPL (dB)	فرکانس (Hz)	
-	۹۲/۴	۱۵۰/۲	-	۱۰۵/۶	مرجع
-۱/۷	۹۰/۷	۱۶۶/۹	-۴/۸	۱۰۰/۸	طراحی ۷ (ترکیب پارامترها)
-۱/۸	۹۰/۶	۱۸۰/۲	-۵/۳	۱۰۰/۳	طراحی ۱۰ (بهینه‌سازی)

با ملاحظه به نتایج بدست آمده هندسه شماره ۱۰، که هندسه بدست آمده از بهینه‌سازی، بهترین عملکرد را از منظر هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی داشته است که خود نشان دهنده کارآمد بودن شیوه بهینه‌سازی به روش تاگوچی می‌باشد.

این پروانه در مقایسه با پروانه مرجع، سبب افزایش بازدهی پروانه به میزان ۱/۹۵ درصد و کاهش نویز به میزان ۵/۳ دسی‌بل در فرکانس عبوری پره اول و ۱/۸ دسی‌بل در فرکانس عبوری پره دوم شده است. همچنین در این هندسه توان مصرفی ۲/۲۱ درصد کاهش یافته است که بسیار مطلوب می‌باشد. شکل ۱۱ توزیع فشار بر روی سطح پره‌های پروانه مرجع و پروانه بهینه‌شده اسکیبولا نشان می‌دهد که مقادیر فشار در نواحی مکشی و فشاری هر دو پروانه در محدوده قابل قبول قرار دارند. همچنین، مقادیر فشار در هر دو سطح از فشار بخار آب بالاتر بوده و در نتیجه، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در هر دو پروانه بسیار اندک ارزیابی می‌شود.



شکل ۹ میانگین نسبت سیگنال به نویز سطوح پارامترها نسبت به ترکیب چند خروجی

مقدار سیگنال به نویز هر چه بزرگتر باشد آن سطح از پارامتر تاثیر مفید برای دستیابی به هدف مورد نظر دارد. همچنین با بررسی شیب این نمودار می‌توان به میزان حساسیت جواب نسبت به تغییر سطوح پارامتر مورد نظر دست یافت. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که به طور کلی زاویه اسکيو بیشترین اثرگذاری را بر روی دو خروجی بازده و نویز تولیدی دارد و دیگر پارامترها به نسبت اثرگذاری کمتری دارند. طبق روش تاگوچی سطوح بهینه به دست آمده از این نمودار، زاویه اسکيو ۷۲ درجه، نرخ تغییر اسکيو Cubic و گام هندسی ۰/۸ می‌باشد. بنابراین این حالت هندسه وینگلت که از سطوح بهینه به دست آمده است، به عنوان هندسه بهینه از ترکیب دو خروجی در ادامه این تحقیق بررسی خواهد شد.

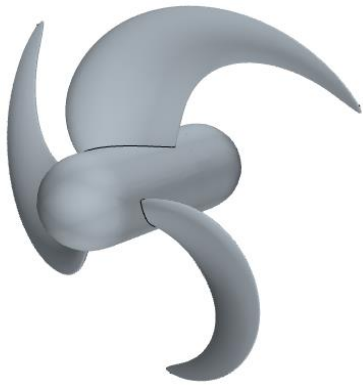
#### ۴-۴- بررسی و مقایسه هندسه بهینه با پروانه مرجع

با توجه بر پروانه‌های طراحی شده و بهینه‌سازی انجام شده، در این قسمت به مقایسه پروانه طراحی ۷ (بدست آمده از ترکیب پارامترها به روش تاگوچی) که بهترین عملکرد را داشته و همچنین پروانه بدست آمده از بهینه‌سازی (طراحی ۱۰) با پروانه مرجع پرداخته شده است. در جدول ۱۱ مقایسه عملکرد هیدرودینامیکی پروانه مرجع با پروانه‌های طراحی شده با استفاده از بهینه‌سازی تاگوچی ارائه شده است.

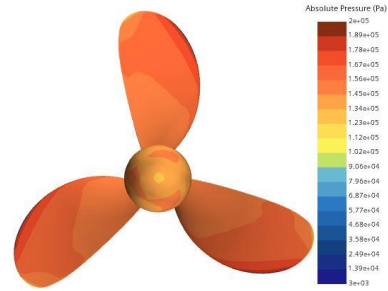
جدول ۱۱ مقایسه هیدرودینامیکی پروانه مرجع با پروانه طراحی شده

مدل پروانه	تراست J	Eta بازدهی	تغییرات بازدهی	KT	10KQ
پروانه مرجع	۰/۵۱	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸
طراحی ۷ (ترکیب پارامترها)	۳۵۸	۰/۴۶	+۱/۴	۰/۱۹۸	۰/۲۷۸

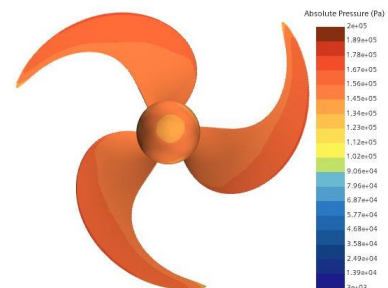
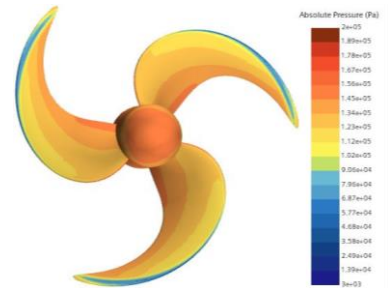
در نهایت شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکيو بالا (طراحی شماره ۱۰) را پس از بهینه سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی نشان می دهد.



شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکيو بالا بدست آمده از بهینه سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی



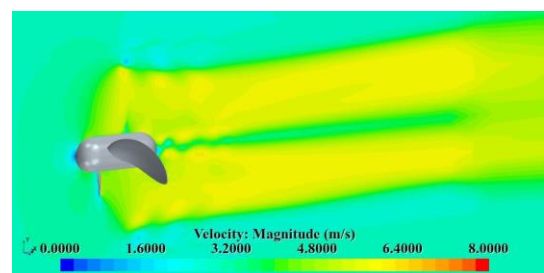
الف) پروانه مرجع



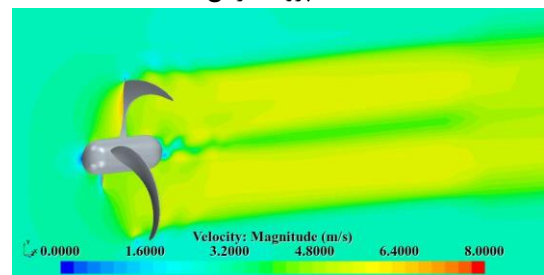
ب) پروانه طراحی شده اسکيو بالا

شکل ۱۰ توزیع فشار بر روی سطح پره های پروانه مرجع و پروانه بهینه شده اسکيو بالا

شکل ۱۲ نیز توزیع سرعت در نواحی نزدیک دو پروانه در شرایط کارکردی برابر را نشان می دهد.



الف) پروانه مرجع



ب) پروانه طراحی شده اسکيو بالا

شکل ۱۱ توزیع سرعت در نواحی نزدیک دو پروانه در شرایط کارکردی برابر

### ۵ - نتیجه گیری

در این مطالعه، یک بررسی پارامتریک جامع و بهینه سازی دوهدفه بر روی پروانه های اسکيو بالا انجام شد تا تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد این پروانه ها بررسی و بهینه شود. نتایج نشان داد که با تنظیم مناسب پارامترهای طراحی، می توان به تعادلی میان افزایش بازدهی و کاهش نویز تولیدی دست یافت. افزایش زاویه اسکيو پروانه گرچه کاهش نویز را به همراه داشت اما پس از زاویه ۵۴ درجه منجر به کاهش بازدهی می شد. تحلیل های انجام شده نشان داد که بهینه سازی هندسی پروانه ها با رویکرد چندهدفه نه تنها بهبود قابل توجهی در بازدهی را به همراه دارد، بلکه نویز تولیدی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. این نتایج می تواند به عنوان یک راهنمای موثر برای طراحی پروانه های کارآمدتر در کاربردهای دریایی، به ویژه در کشتی ها و زیردریایی ها، مورد استفاده قرار گیرد. در بررسی های صورت گرفته در این مقاله نویز پروانه ۵/۳ دسی بل کاهش و بازدهی ۱/۹۵ درصد افزایش یافت و منجر گردید توان مصرفی ۲/۲۱ درصد کاهش یابد.

### ۶ - فهرست علائم

$J$	ضریب پیشروی پروانه
$K_T$	ضریب تراست پروانه در آب آزاد
$K_Q$	ضریب گشتاور پروانه در آب آزاد
$n$	دور چرخش پروانه
$D$	قطر پروانه
$V_A$	سرعت جریان ورودی به پروانه
$N$	تعداد شبکه
$GCI$	شاخص همگرایی شبکه
$BPF$	فرکانس عبوری پره
$SPL$	سطح شدت صوت

- Proceedings of the Third International Symposium on Marine Propulsors, Smp2013, Launceston, Tasmania, Australia, 2013.*
- [14] F. Chekab, M. Amin, M. Ghadimi, A. Zamanian, A. Norouzi, and H. Hashem, "Investigating the effects of increasing blade number and using a duct on reducing non-cavitation noise of submerged propellers," *Journal of the Iranian Society of Acoustical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 16–23, 2014 (in persian).
- [15] S. Mirzazadeh, "Design and construction of an optimized geometric section to increase the efficiency of propulsion systems," M.S. thesis, Sharif Univ. Technol., Tehran, Iran, 2013 (in persian).
- [16] "O. A. A. Asimakopoulos and P. Kaklis, 'Effects of propeller geometry on cavitation,' University of Strathclyde, 2016."
- [17] D. Bertetta, S. Brizzolara, E. Canepa, S. Gaggero, and M. Viviani, "EFD and CFD characterization of a CLT propeller," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/348939.
- [18] A. Sánchez-Caja, J. González-Adalid, M. Perez-Sobrinó, and I. Saisto, "Study of End-Plate Shape Variations for Tip Loaded Propellers Using a RANSE Solver," in *29th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2012, no. August.
- [19] S. Ianniello, R. Muscari, and A. Di Mascio, "Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy, part III: Measurements versus numerical predictions on a full-scale ship," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 125–142, 2014, doi: 10.1007/s00773-013-0228-z.
- [20] S. Gaggero *et al.*, "A Design by Optimization of Tip Loaded Propellers," in *Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp'15*, 2015, no. June.
- [21] W. Zhu and H. Gao, "A numerical investigation of awinglet-propeller using an LES model," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 10, 2019, doi: 10.3390/jmse7100333.
- [22] Y. Kehr, H. Xu, and J. Kao, "On the development and verification of diffused endplate propeller," in *Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19*, 2019, no. May.
- [23] H. Gao, W. Zhu, Y. Liu, and Y. Yan, "Effect of various winglets on the performance of marine propeller," *Appl. Ocean Res.*, vol. 86, no. January, pp. 246–256, 2019, doi: 10.1016/j.apor.2019.03.006.
- [24] M. Gorji, H. Ghassemi, and J. Mohamadi, "Effect of Rake and Skew on the Hydrodynamic Characteristics and Noise Level of the Marine Propeller," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Mech. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 75–85, 2019, doi: 10.1007/s40997-017-0108-y.
- [25] G. Ku, J. Cho, C. Cheong, and H. Seol, "Numerical investigation of tip-vortex cavitation noise of submarine propellers using hybrid computational hydro-acoustic approach," *Ocean Eng.*, vol. 238, no. August, p. 109693, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109693.
- [26] A. Hadipour, K. A. V. Abadi, H. Khanzadi, and H. P/D
- گام هندسی پروانه
- ۱-۶-علائم یونانی
- بازده آب آزاد
- چگالی آب
- ۷- مراجع**
- [1] D. R. Blidberg, J. C. Jalbert, and M. Ageev, "Solar autonomous underwater vehicle system," in *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1997, vol. 2, pp. 833–840. doi: 10.1109/oceans.1997.624103.
- [2] "John carlton, Marine Propellers and Propulsion. Cambridge: Elsevier, 2019."
- [3] M. Renilson, R. Leaper, and O. Boisseau, "Hydro-acoustic noise from merchant ships—impacts and practical mitigation techniques," in *Proceedings of the third international symposium on marine propulsors, smp, 2013*, vol. 13, pp. 201–208.
- [4] E. Korkut and M. Atlar, "An experimental investigation of the effect of foul release coating application on performance, noise and cavitation characteristics of marine propellers," *Ocean Eng.*, vol. 41, pp. 1–12, 2012.
- [5] M. Atlar, E. J. Glover, M. Candries, R. J. Mutton, and C. D. Anderson, "The effect of a foul release coating on propeller performance," in *International conference on Marine Science and Technology for Environmental Sustainability (ENSUS 2002)*, 2002.
- [6] M. R. Bagheri, H. Mehdigholi, M. S. Seif, and O. Yaakob, "An experimental and numerical prediction of marine propeller noise under cavitating and non-cavitating conditions," *Brodogradnja*, vol. 66, no. 2, pp. 29–45, 2015.
- [7] H. Seol, S. Pyo, J.-C. Suh, and S. Lee, "Numerical study of non-cavitating underwater propeller noise," *Noise Vib. Worldw.*, vol. 35, no. 6, pp. 11–26, 2004.
- [8] R. M. C. Pty, *Reducing underwater noise pollution from large commercial vessels*. International Fund for Animal Welfare, 2009.
- [9] G. Gennaro and J. Gonzalez-Adalid, "Improving the propulsion efficiency by means of Contracted and Loaded Tip (CLT) propellers," 2012.
- [10] P. Andersen, J. Friesch, J. J. Kappel, L. Lundegaard, and G. Patience, "Development of a marine propeller with nonplanar lifting surfaces," *Mar. Technol. SNAME news*, vol. 42, no. 03, pp. 144–158, 2005.
- [11] Elhami, M.R., Najafi, M.R. & Tashakori Bafghi, M. Vibration analysis and numerical simulation of fluid–structure interaction phenomenon on a turbine blade. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **43**, 245 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02933-6>
- [12] H. R. Hansen, T. Dinham-Peren, and T. Nojiri, "Model and full scale evaluation of a 'propeller boss cap fins' device fitted to an Aframax tanker," in *Second International Symposium on Marine Propulsors*, 2011.
- [13] H. CAI, C. MA, K. CHEN, Z. QIAN, and C. YANG, "An Integrative Design Method of Propeller and PBCF (Propeller Boss Cap Fins)," in

- Motahari, "Hydrodynamic analysis of noise propagation by the high skew marine propeller working in non-uniform inflow," *Int. J. Appl. Mech. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 104–121, Mar. 2021, doi: 10.2478/ijame-2021-0007.
- [27] K. Yu, D. Park, J. Choi, H. Seol, I. Park, and S. Lee, "Effect of skew on the tonal noise characteristics of a full-scale submarine propeller," *Ocean Eng.*, vol. 276, no. February, p. 114218, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114218.
- [28] Ebrahimi, A., Razaghian, A. H., Seif, M. S., Zahedi, F., & Nouri-Borujerdi, A. (2019). A comprehensive study on noise reduction methods of marine propellers and design procedures. *Applied Acoustics*, 150, 55-69.
- [29] Ghasseni, H., & Ghadimi, P. (2011). Numerical analysis of the high skew propeller of an underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 10, 289-299.
- [30] Ebrahimi, A., Razaghian, A. H., Tootian, A., & Seif, M. S. (2021). An experimental investigation of hydrodynamic performance, cavitation, and noise of a normal skew B-series marine propeller in the cavitation tunnel. *Ocean Engineering*, 238, 109739.
- [31] Razaghian, A. H., Ebrahimi, A., Zahedi, F., Javanmardi, M. R., & Seif, M. S. (2021). Investigating the effect of geometric parameters on hydrodynamic and hydro-acoustic performances of submerged propellers. *Applied Ocean Research*, 114, 102773.
- [32] "Lighthill, M. J., (1954), On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 222(1148), p.1-32."
- [33] "Rienstra, S. W., & Hirschberg, A. An introduction to acoustics. Report IWDE, pp.92-06."
- [34] S. Sezen and O. K. Kinaci, "Incompressible flow assumption in hydroacoustic predictions of marine propellers," *Ocean Eng.*, vol. 186, no. January, p. 106138, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106138.
- [35] ITTC Proceedings, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, section 7.5-03-02-03," in *International Towing Tank Conference*, 2014.
- [36] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications," *J. Fluids Eng.*, vol. 130, no. 7, pp. 078001–078004, 2008, doi: 10.1115/1.2960953
- [37] M. Renilson, *Submarine Hydrodynamics*, 2nd ed. Springer International Publishing, 2018. doi: 10.3723/ut.33.137.
- [38] H. Mohamed, M. H. Lee, S. Salleh, B. Sanugi, and M. Sarahintu, "Taguchi Approach for Performance Evaluation of Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks," *J. Stat. Model. Anal.*, vol. 1, no. 2, pp. 10–18, 2010.