



Hydroacoustic and hydrodynamic optimization of a high-skew marine propeller

Mohammad Reza Najafi^{1*} 

¹ Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University; 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:

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*^۱ 

^۱ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، Drmrnafari@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:

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



۱ - مقدمه

امروزه کاهش نویز سیستم رانش شناورها به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید نویز [1] مورد توجه طراحان قرار گرفته است [2]. کاهش نویز پروانه‌ها می‌تواند نویز کلی شناور را بطور چشمگیری کاهش دهد [3]. از روش‌های مختلفی به منظور کاهش نویز 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 تویی 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 نویز پروانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برتتا 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 نویز، باعث کاهش پدیده کاویتاسیون نیز گردد. سانچز و همکاران [18] به بررسی عددی تاثیر 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 نویز، 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 نویز تولیدی را پیش‌بینی کرده است. گاگرو و همکاران [20] به بهینه‌سازی پروانه با نوک کج (کج) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پارتو (Pareto designs) بر اساس محیط modeFRONTIER به منظور بهبود بازدهی و رفتار کاویتاسیون و نویز 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 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 نویز تولیدی پروانه، تغییرات در زاویه اسکيو می‌باشد. در این مقاله به طراحی پروانه اسکيو بالا به صورت دو هدفه کاهش نویز 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 نویز پروانه بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد افزایش زاویه اسکيو تا ۴۵ درجه باعث کاهش نویز تولیدی پروانه می‌شود. همچنین افزایش زاویه ریک باعث کاهش نویز تولیدی می‌شود. ولی افزایش این دو پارامتر باعث کاهش بازدهی و تراست پروانه هم می‌شود. گرام و همکاران [25]، به بررسی نویز 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 نویز تولیدی کمتری در فرکانس‌های مختلف بوده ولی افزایش زاویه اسکيو باعث کاهش ضریب تراست پروانه می‌شود. هادی پور و همکاران [26]، به منظور پیش‌بینی نویز یک پروانه اسکيو بالا از معادلات فاکس ویلیمامز-هاوکنگز (FW-H) استفاده کرده‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش بارگذاری بر روی پره پروانه مقدار نویز پروانه بیشتر می‌شود. همچنین مقدار نویز 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 نویز تولیدی پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد نویز تولیدی در پروانه اسکيو بالا در جهت محوری نسبت به پروانه متداول کاهش چشمگیری داشته است. ابراهیمی و همکاران [28] تاثیر پارامترهای

آن است. این روش حل نخستین بار توسط فوکس ویلیامز و دیوید هاوکنگز [33] پیشنهاد شده است.

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

که در این رابطه، Ω دامنه انتگرال گیری روی حجمی است که آشفتگی در آن باعث ایجاد نویز می گردد

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

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

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

که c سرعت صوت در سیال، ρ چگالی سیال، r فاصله منبع صوت و ناظر، M عدد ماخ، M_r تصویر بردار ماخ بر روی بردار x و $\vec{x}$ زمان و مکان ناظر، p فشار هیدروپنماتیکی، 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 می شوند. پارامترهای رابطه (2) و (3) به صورت زیر تعریف می شود:

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

هندسی مانند تعداد پره ها، 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 هیدروپنماتیکی و آکوستیکی پیشنهاد دادند. قاسمی و قدیمی [29] به منظور دستیابی به بالاترین نیروی رانش ممکن، حداقل گشتاور و راندمان، به بهینه سازی پارامترهای هندسی و هیدروپنماتیکی 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 هیدروپنماتیکی 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 پره ها بر عملکرد هیدروپنماتیکی 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 پره ها به صورت جداگانه، بازده هیدروپنماتیکی در هر نسبت پیشروی کاهش می یابد.

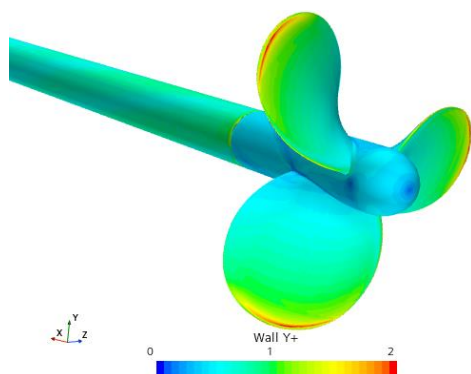
با ملاحظه پژوهش های انجام شده در زمینه طراحی پروانه های اسکيو بالا، دراکثر پژوهش ها، طراحی پروانه به صورت جزئی و با یک هدف واحد (یا کاهش نویز یا افزایش بازدهی) بررسی شده است. تمرکز بر اثر افزایش زاویه اسکيو و استخراج بهینه ترین هندسه پروانه های اسکيو بالا در کنار جلوگیری از کاهش بازدهی، هدف اصلی این مقاله بوده است. تاکنون پژوهشی برای طراحی پروانه های 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 شبیه سازی هیدروپنماتیکی و هیدروآکوستیکی یک پروانه متداول که داده های آن موجود می باشد، مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. پس از بررسی پارامتریک و بهینه سازی پروانه اسکيو بالا، عملکرد هیدروپنماتیکی و هیدروآکوستیکی که از ویژگی های بارز این نوع از پروانه ها است، بررسی و با یک پروانه متداول سری B در شرایط کارکردی برابر، مقایسه شده است.

۲- روش حل و معتبرسازی شبیه سازی

۲-۱- معادلات حاکم

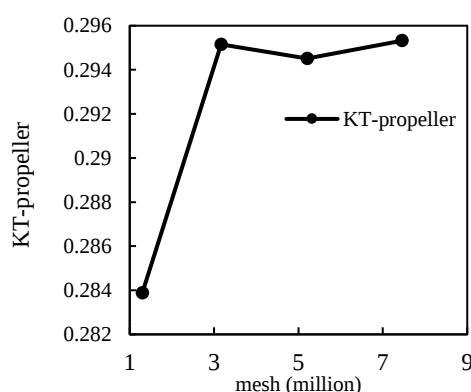
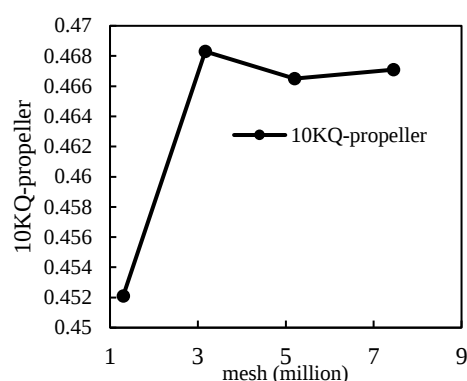
لایت هیل (Lighthill) با استفاده از روابط اصلی حاکم بر جریان سیال یعنی روابط پیوستگی و مومنوم، معادله کلی تولید صوت از ناشی از تنش برشی سیال را استخراج کرد [32]. یکی از حل های ساده تحلیلی که برای معادله لایت هیل ارائه شده است، حل انتگرالی

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،

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

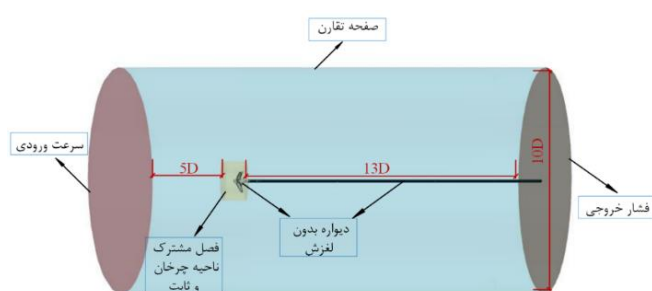
با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن آب در اعداد ماخ پایین، ρ با ρ_0 برابر است. همچنین، با توجه به اینکه پروانه بصورت صلب در نظر گرفته میشود، مقدار سرعت برخورد جریان به پروانه (v) و سرعت منبع صوت (u) با هم برابر است. بنابراین خواهیم داشت:

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

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

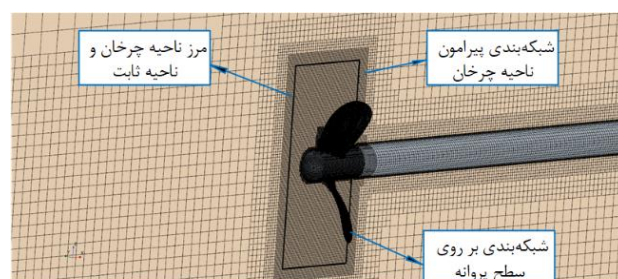
۲-۲- استقلال از شبکه

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)

پارامتر	ضریب تراست	ضریب گشتاور
	KT	10KQ
تعداد شبکه (ریز) N_1	۵۲۰۲۷۰۰	۵۲۰۲۷۰۰
تعداد شبکه (متوسط) N_2	۳۱۶۷۵۴۴	۳۱۶۷۵۴۴
تعداد شبکه (درشت) N_3	۱۲۹۹۷۰۶	۱۲۹۹۷۰۶
نسبت اندازه شبکه‌بندی ریز r_{21}	۱/۱۷۹۹	۱/۱۷۹۹
نسبت اندازه شبکه‌بندی درشت r_{32}	۱/۳۴۵۷	۱/۳۴۵۷
جواب شبکه‌بندی ریز ϕ_1	۰/۲۹۴۵	۰/۴۶۶۵
جواب شبکه‌بندی متوسط ϕ_2	۰/۲۹۵۲	۰/۴۶۸۲
جواب شبکه‌بندی درشت ϕ_3	۰/۲۸۳۹	۰/۴۵۲۱
نسبت ظاهری p	۱۰/۱۳۰۲	۷/۸۹۸۴
خطای نسبی تقریبی e_a^{21}	۰/۲۱۷۳	۰/۳۸۵۹
خطای نسبی برون‌یابی شده e_{ext}^{21}	۰/۰۵۰۱	۰/۱۴۳۵
درصد خطای شبکه‌بندی متوسط GCI_{Mean}^{21}	۰/۰۶۲۶	۰/۱۷۹۱

می‌شود) پارامتر ε به صورت $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ ،
 $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ است که در آن ϕ_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، r نسبت میانگین شبکه، ϕ مقدار ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه، ε اختلاف ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه در اندازه مش‌های مختلف و p مرتبه ظاهری است که فرمول آن در زیر ارائه شده است.

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

که :

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

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

که در آن، فاکتور r برای سه شبکه مختلف، یعنی (۱) ریز، (۲)

متوسط و (۳) درشت $r_{32} = \frac{h_3}{h_2}$ ، $r_{21} = \frac{h_2}{h_1}$ ، h_i مقدار میانگین

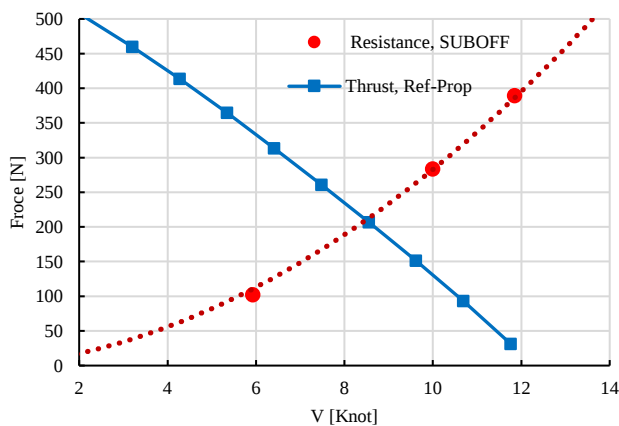
اندازه شبکه که از تعداد شبکه (N_i) و دامنه محاسباتی تعیین

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

جدول ۳ مشخصات هندسی زیرسطحی

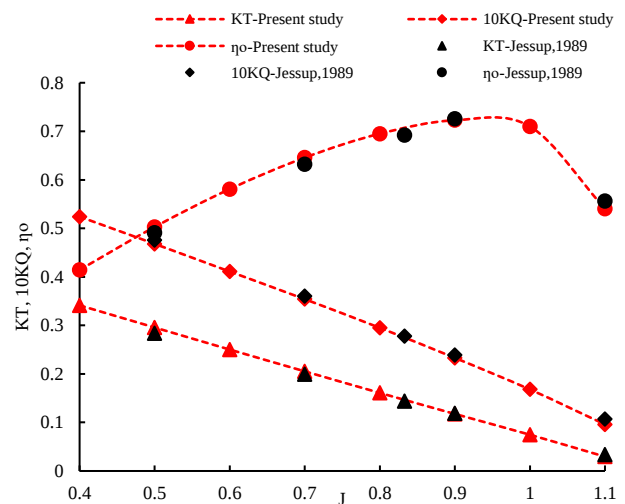
مشخصات	مقدار
طول کل [m]	۴/۳۵۶
طول بین دو عمود [m]	۴/۲۶۱
بیشینه قطر بدنه [m]	۰/۵۰۸
مرکز بویانسی [m]	۰/۴۶۲۱ برابر طول کل
حجم جابه‌جایی [m^3]	۰/۷۰۸
سطح خیس شده [m^2]	۵/۹۹۸

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 ($V_s=8 \text{ knot}$) انتخاب شده است.

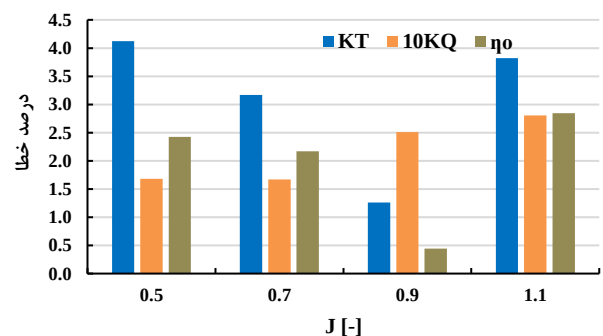


شکل ۷ نمودار مقاومت بدنه زیرسطحی و تراست تولیدی پروانه در سرعت‌های مختلف

متوسط سرعت و یک ورودی در سرعت ۸ نات در محل پروانه ۲/۸۲ متر بر ثانیه ($V_A=2.82 \text{ m/s}$) 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_O)	۰/۳۵

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

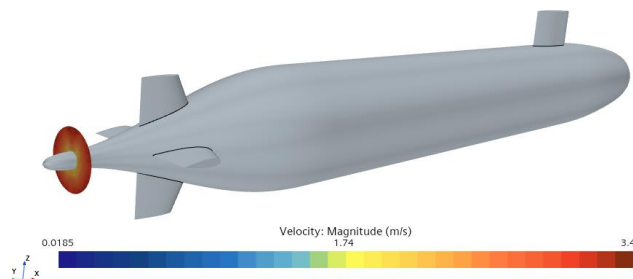
زاویه اسکيو	تراست J	Eta بازدهی	تغییرات بازدهی	KT	10KQ
۰	۰/۵۱۳	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸
۳۶	۰/۵۱۱	۰/۵۱۸	+۰/۳۹	۰/۲۴۳	۰/۳۸۱
۵۴	۰/۵۱۴	۰/۵۱۹	+۰/۵۸	۰/۲۴۶	۰/۳۸۷
۷۲	۰/۵۰۵	۰/۵۱۷	+۰/۱۹	۰/۲۳۹	۰/۳۷۱
۹۰	۰/۴۹۹	۰/۵۱۴	-۰/۳۹	۰/۲۳۴	۰/۳۶۱

با توجه بر اینکه مهمترین و بیشترین نویز تولیدی از پروانه در اولین (BPF1) و دومین (BPF2) فرکانس عبوری پره ایجاد می شود. جهت مقایسه بهتر عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه ها، سطح فشار صوت تولیدی در این دو فرکانس مقایسه و بررسی می شوند. برای اندازه گیری 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	BPF1			BPF2		
	شدت صوت	فرکانس	تغییرات	شدت صوت	فرکانس	تغییرات
	SPL (dB)	(Hz)	SPL (dB)	SPL (dB)	(Hz)	SPL (dB)
S-0	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۹۲/۴	۱۵۰/۲	-
S-36	۷۵/۴	۱۰۵/۲	-۰/۴	۹۷/۶	۱۵۰/۸	+۵/۲
S-54	۷۴/۹	۱۰۲/۹	-۲/۷	۸۹/۲	۱۴۹/۹	-۳/۲
S-72	۷۶/۳	۱۰۰/۲	-۵/۴	۹۳/۹	۱۵۲/۶	+۱/۵
S-90	۷۷	۱۰۱/۲	-۴/۴	۹۳/۶	۱۵۴/۱	+۱/۲

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



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 می آید.

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

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

با انجام شبیه سازی پروانه در ضریب پیشروی ($J=0.513$)، پروانه مرجع ۳۵۷ نیوتن تراست تولید می کند همچنین بازدهی پروانه ۵۱/۶ درصد می باشد.

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 پژوهش های انجام شده، شش زاویه (۰-۳۶-۵۴-۷۲-۹۰ درجه) برای زاویه اسکيو پروانه انتخاب گردیده است. زوایای اسکيو انتخاب شده در این پژوهش بر اساس مطالعات انجام شده و همچنین پروانه های ساخته شده اسکيو بالا و با در نظر گرفتن محدوده زوایای معمول این نوع پروانه ها تعیین شده است. این زوایا، به گونه ای انتخاب شده اند 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 به خوبی تحلیل شود. مشخصات هندسی تمام پروانه ها یکسان اما با اسکيو متفاوت هستند. مشخصات پروانه ها در جدول ۴ ارائه شده است. در این بخش نرخ تغییر زاویه اسکيو پروانه در شعاع های مختلف خطی در نظر گرفته شده است. هندسه ها پروانه و اعمال تغییرات هندسی مورد نیاز در این تحقیق با استفاده از نرم افزار PropCad انجام شده است. با انجام شبیه سازی آب آزاد پروانه ها، داده های عملکرد هیدرودینامیکی آب آزاد پروانه ها با تراست برابر در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقایسه تمام پروانه ها در شرایط تراست برابر انجام شده است.

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

درجه با استفاده از روش تاگوچی همراه با سایر پارامترها، بررسی می‌شود تا بهینه‌ترین 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.

باتوجه 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 شده‌است، 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	۰/۴۷	۰/۵۲۵	+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 هیدروآکوستیکی 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	فرکانس	شدت	تغییرات	فرکانس	شدت	تغییرات
توزیع اسکینو	(Hz)	SPL (dB)	SPL (dB)	(Hz)	SPL (dB)	SPL (dB)
مرجع	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۱۵۰/۲	۹۲/۴	-
طراحی ۱	۸۶/۵	۱۰۴/۷	-۰/۹	۱۷۲/۹	۹۷/۹	+۵/۵
طراحی ۲	۸۳/۳	۱۰۴/۱	-۱/۵	۱۶۶/۷	۹۶/۷	+۴/۳
طراحی ۳	۸۰/۸	۱۰۳/۹	-۱/۷	۱۶۱/۶	۹۵/۷	+۳/۳
طراحی ۴	۸۴/۴	۱۰۲/۹	-۲/۷	۱۶۸/۸	۹۴/۹	+۲/۵
طراحی ۵	۸۱/۹	۱۰۲/۳	-۳/۳	۱۶۳/۹	۹۳/۲	+۰/۸
طراحی ۶	۸۷/۹	۱۰۲/۷	-۲/۹	۱۷۵/۹	۹۳/۳	+۰/۹
طراحی ۷	۸۳/۵	۱۰۰/۸	-۴/۸	۱۶۶/۹	۹۰/۷	-۱/۷
طراحی ۸	۸۹/۶	۱۰۱/۱	-۴/۵	۱۷۹/۳	۹۲/۷	+۰/۳
طراحی ۹	۸۷/۴	۹۹/۸	-۵/۸	۱۷۴/۸	۹۰/۷	-۱/۷

پژوهش این طور نیست زیرا خروجی بازده هرچه بیشتر باشد بهتر است و خروجی نویز تولیدی پروانه هر چه کمتر باشد بهتر است. در این پژوهش برای این که بتوان خروجی‌ها را با یک معیار عملکردی بررسی کرد، به جای خروجی بازده از خروجی تلفات پروانه (بازده - ۱۰۰) استفاده شده‌است. در این تحقیق TL_i برای سه خروجی تلفات و نویز تولیدی محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۱۰ آورده شده‌است.

جدول ۱۰ مقادیر نرمال‌سازی شده ترکیب سه خروجی

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

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 می‌گیرد. روش دوم که به ویژه برای آزمایش‌های همراه با تکرار توصیه می‌شود، روش نسبت سیگنال به نویز است. در این روش، با بررسی تغییرات نتایج، شرایط بهینه و مؤثرترین شرایط کاری شناسایی می‌شود. به عبارت دیگر، این نسبت میزان پراکندگی داده‌ها در اطراف یک مقدار خاص را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه این نسبت بالاتر باشد، پراکندگی کمتر و اثر آن عامل برجسته‌تر خواهد بود.

حال که مقادیر ترکیبی نرمال‌سازی شده دو خروجی تلفات و نویز تولیدی محاسبه شده‌است، می‌توان 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 نرم‌افزار مینی‌تب استخراج شده در شکل ۹ آورده شده‌است.

با ملاحظه به نتایج مشاهده می‌شود تمام ترکیب‌های هندسی استخراج شده از روش تاگوچی باعث افزایش بازدهی و تا حدودی کاهش نویز تولیدی پروانه شده‌اند. بهترین و بهینه‌ترین هندسه طراحی شده در ترکیب پارامترها، هندسه شماره ۷ می‌باشد که سبب افزایش بازدهی پروانه به میزان ۱/۴ درصد و کاهش نویز به میزان ۴/۸ دسی‌بل در فرکانس عبوری پره اول و ۱/۷ دسی‌بل 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 می‌باشد.

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

در روش بهینه‌سازی تاگوچی، تنها می‌توان سطوح بهینه را فقط برای یک خروجی محاسبه کرد. بنابراین برای بهینه‌سازی نسبت به سه خروجی به روش تاگوچی باید با روشی پارامترها را باهم ترکیب کرد. هازورا و همکاران در سال ۲۰۱۰ جهت بهینه‌سازی نسبت به چند خروجی به روش تاگوچی، استفاده از فاکتور وزنی را پیشنهاد کردند [38]. برای استفاده از این روش باید خروجی‌ها به گونه‌ای 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

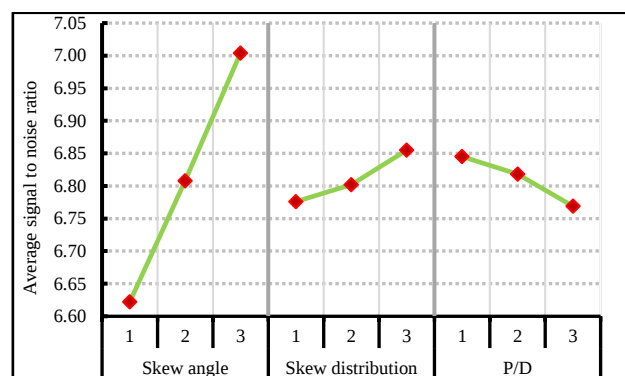
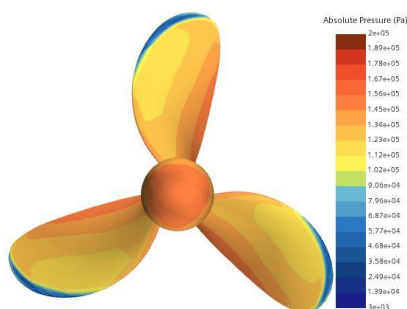
همچنین برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت هیدروفون در فاصله ۱ متر بالای پروانه قرار گرفته شده است. در جدول ۱۲ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه‌های طراحی ۷ و ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۲ مقایسه هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه طراحی شده

نوع نرخ توزیع اسکيو	BPF1			BPF2		
	شدت صوت	فرکانس (Hz)	تغییرات SPL (dB)	شدت صوت	فرکانس (Hz)	تغییرات SPL (dB)
مرجع	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۹۲/۴	۱۵۰/۲	-
طراحی ۷	۸۳/۵	۱۰۰/۸	-۴/۸	۹۰/۷	۱۶۶/۹	-۱/۷
(ترکیب پارامترها)						
طراحی ۱۰	۹۰/۱	۱۰۰/۳	-۵/۳	۹۰/۶	۱۸۰/۲	-۱/۸
(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 اسکيو بالا 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 پارامترتاثیر 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	بازدهی Eta	تغییرات بازدهی	KT	10KQ
پروانه مرجع	۰/۵۱	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸
طراحی ۷	۳۵۸				
(ترکیب پارامترها)	۰/۴۶	۰/۵۲۳	+۱/۴	۰/۱۹۸	۰/۲۷۸

در نهایت شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکيو بالا (طراحی شماره ۱۰) را پس از بهينه سازی هیدروآکوستيکی و هیدروديناميکی نشان می دهد.



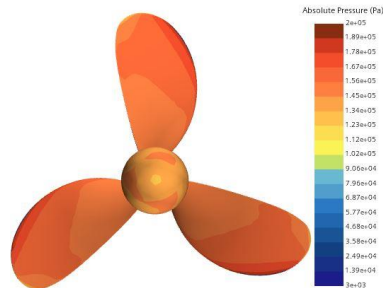
شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکيو بالا بدست آمده از بهينه سازی هیدروآکوستيکی و هیدروديناميکی

۵ - نتیجه گیری

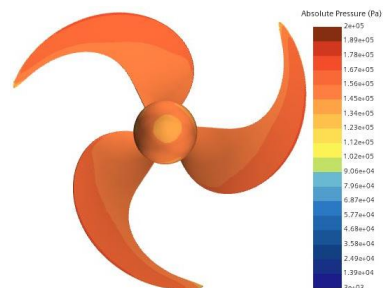
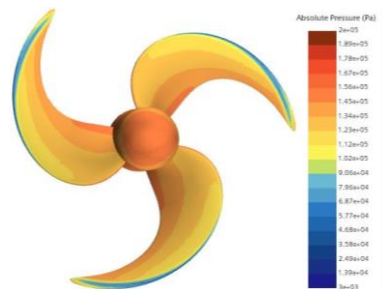
در این مطالعه، یک بررسی پارامتریک جامع و بهينه سازی دودهدفه بر روی پروانه های اسکيو بالا انجام شد تا تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد این پروانه ها بررسی و بهينه شود. نتایج نشان داد که با تنظیم مناسب پارامترهای طراحی، می توان به تعادلی میان افزایش بازدهی و کاهش نویز توليدي دست یافت. افزایش زاويه اسکيو پروانه گرچه کاهش نویز را به همراه داشت اما پس از زاويه ۵۴ درجه منجر به کاهش بازدهی می شد. تحلیل های انجام شده نشان داد که بهينه سازی هندسی پروانه ها با رویکرد چندهدفه نه تنها بهبود قابل توجهی در بازدهی را به همراه دارد، بلکه نویز توليدي 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



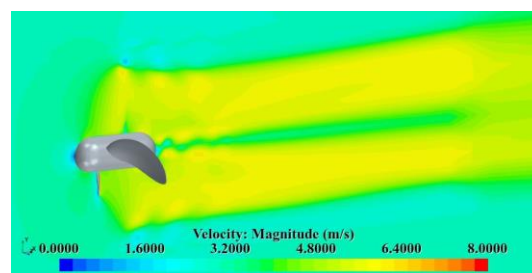
الف) پروانه مرجع



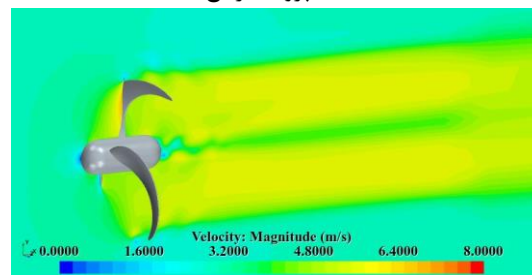
ب) پروانه طراحی شده اسکيو بالا

شکل ۱۰ توزیع فشار بر روی سطح پره های پروانه مرجع و پروانه بهينه 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

P/D گام هندسی پروانه
۱-۶- علائم یونانی
 η_o بازده آب آزاد
 ρ چگالی آب

۷- مراجع

- 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-Sobrinio, 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. 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.