J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 46, 2025. (44-57)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۶، ۱۴۰۴، (۵۷-۴۴)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بهینه‌سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی یک پروانه دریایی اسکیو بالا

محمدرضا نجفی*[۱]

[۱] استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، Drmrnajafi@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه 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 اسکیو بالا

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 تاثیرات 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 هیدوردینامیکی از یک پروانه متداول که داده‌های آن موجود می‌باشد، استفاده شده است. نتایج در این تحقیق نشان میدهد پروانه اسکیو 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.

ISSN: 2645-8136

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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 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 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 بهینه سازی پروانه با نوک کج) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی 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) شبیه سازی 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 داری 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 هیدرودینامکی 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 می‌گذارند. 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 اسکیو می‌باشد. در این مقاله به طراحی پروانه اسکیو بالا به صورت دو هدفه کاهش نویز تولیدی و افزایش بازدهی پرداخته شده است. در ادامه به مروری بر پژوهش‌های انجام شده پروانه اسکیو بالا پرداخته می‌شود:

گرجی و همکاران[24]، اثر تغییرات زاویه ریک و اسکیو را بر روی نویز پروانه بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد افزایش زاویه اسکیو 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. گارام و همکاران[25]، به بررسی نویز و کاویتاسیون نوک دو پروانه اسکیو بالا با زاویه اسکیو ۱۷و ۳۸ به صورت عددی و تجربی پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد پروانه زاویه اسکیو بالاتر، دارای نویز تولیدی کمتری در فرکانس‌های مختلف بوده ولی افزایش زاویه اسکیو باعث کاهش ضریب تراست پروانه می‌شود. هادی پور و همکاران[26]، به منظور پیش‌بینی نویز یک پروانه اسکیو بالا از معادلات فاکس ویلیمامز-هاوکینگز (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 اسکیو بالا با زاویه اسکیو ۳۰درجه، برای یک زیرسطحی جهت پیش‌بینی نویز تولیدی پرداخته‌اند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد نویز تولیدی در پروانه اسکیو 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]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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 اسکیو 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 اسکیو و استخراج بهینه ترین هندسه پروانه های اسکیو بالا در کنار جلوگیری از کاهش بازدهی، هدف اصلی این مقاله بوده است. تاکنون پژوهشی برای طراحی پروانه‌های اسکیو 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 اسکیو بالا، عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی که از ویژگی‌های بارز این نوع از پروانه‌ها است، بررسی و با یک پروانه متداول سریB 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 مومنتوم، 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.

$$\rho(x,t) = \frac{1}{4\pi c^2}\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}\int_\Omega \frac{T_{ij}(y, t-\frac{|x-y|}{c})}{|x-y|}dy \quad (۱)$$

که در این رابطه، Ω دامنه انتگرال‌گیری 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:

$$4\pi P'_T(x,t) = \int_s \left[\frac{\rho(\dot{U}_n + U_n)}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret} ds + \int_s \left[\frac{\rho u_n (r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]_{ret} ds \quad (۲)$$

$$4\pi P'_L(x,t) = \frac{1}{c}\int_s \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret} ds + \frac{1}{c}\int_s \left[\frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2}\right]_{ret} ds + \frac{1}{c}\int_s \left[\frac{L_r(r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]_{ret} ds \quad (۳)$$

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 r، t 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:

$$U_i = (1-\frac{\rho}{\rho_0})v_i + \frac{\rho u_i}{\rho_0} \quad (۴)$$

$$L_i = P_{ij}\hat{n}_i + \rho u_i(u_n - v_n) \quad (۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

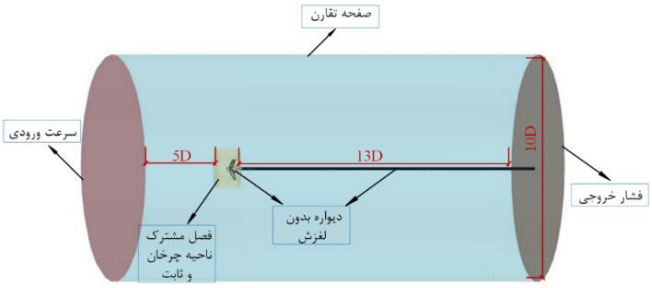
با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن آب در اعداد ماخ پایین، ρ با ρ_0 برابر است. همچنین، با توجه به اینکه پروانه بصورت صلب در نظر گرفته میشود، مقدار سرعت برخورد جریان به پروانه (v) و سرعت منبع صوت (u) با هم برابر است. بنابراین خواهیم داشت:

$$U_i = v_i \qquad (۶)$$

$$L_i = P_{ij}\hat{n}_i \qquad (۷)$$

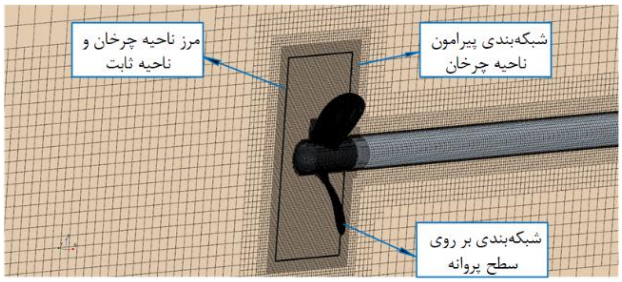
۲-۲- استقلال از شبکه

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.



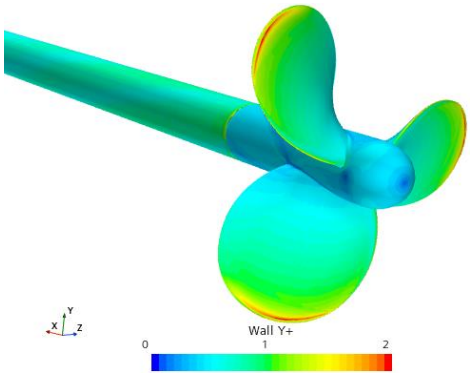
شکل ۱ ابعاد و شرایط دامنه محاسباتی

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 ۰/۰۰۵میلیمتر و تعداد شبکه‌های داخل لایه مرزی ۲۲ شبکه در نظرگرفته شده است. **شکل ۲** شبکه‌بندی دامنه محاسباتی و بر روی سطح پروانه را نشان می‌دهد.



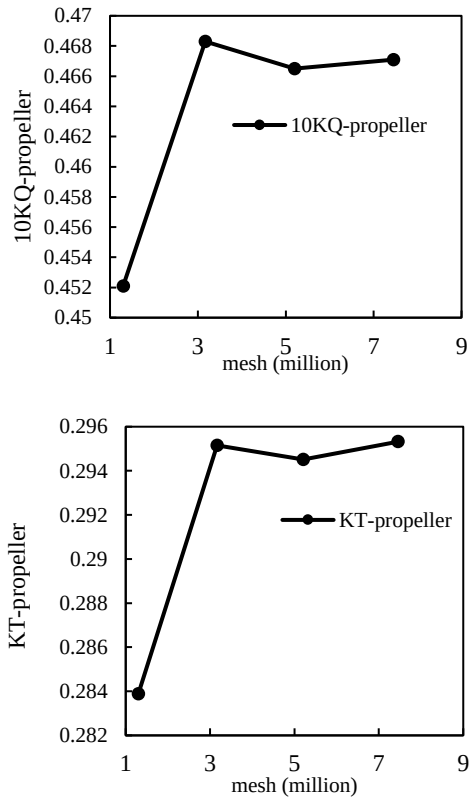
شکل ۲ شبکه‌بندی بر روی پروانه و دامنه محاسباتی

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،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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	ضریب‌تراست **KT**	ضریب گشتاور **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

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.

$$p = \frac{1}{ln(r_{21})}\left|ln\left|\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right| + q(p)\right| \qquad (۸)$$

که :

$$q(p) = ln\left(\frac{r_{21}^{p} - s}{r_{32}^{p} - s}\right) \qquad (۹)$$

$$s = 10\, sgn\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن، فاکتور r برای سه شبکه مختلف، یعنی (۱) ریز، (۲) متوسط و (۳) درشت $r_{21} = \frac{h_2}{h_1}$ ، $r_{32} = \frac{h_3}{h_2}$ (که h_i مقدار میانگین اندازه شبکه که از تعداد شبکه (N_i) و دامنه محاسباتی تعیین می‌شود) می‌باشد. پارامتر ε به صورت $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ ، $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$ است که در آن φ_i نشان‌دهنده جواب (در اینجا K_T و K_Q) روی تعداد شبکه‌بندی مورد بررسی است. حال می‌توان خطای نسبی تقریبی $\left(e_a^{32}\right)$، خطای نسبی برون‌یابی $\left(e_{ext}^{32}\right)$ و ضریب همگرایی شبکه GCI بصورت زیر بدست می‌آید.

$$e_a^{32} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_2} \qquad (۱۱)$$

$$e_{ext}^{32} = \frac{\varphi_{ext}^{23} - \varphi_2}{\varphi_{ext}^{23}} \qquad (۱۲)$$

$$GCI_{Mean}^{32} = \frac{1.25 e_a^{32}}{r_{32}^{p} - 1} \qquad (۱۳)$$

مقدار GCI شبکه‌بندی متوسط برای ضریب پیشران و ضریب گشتاور پروانه در ضریب پیشروی ۰/۵ به‌ترتیب 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.

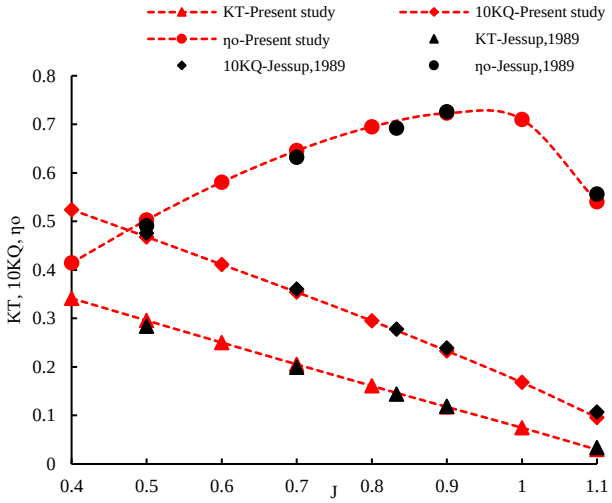
۳- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

شکل ۵ مقایسه نتایج عملکرد هیدرودینامکی 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.

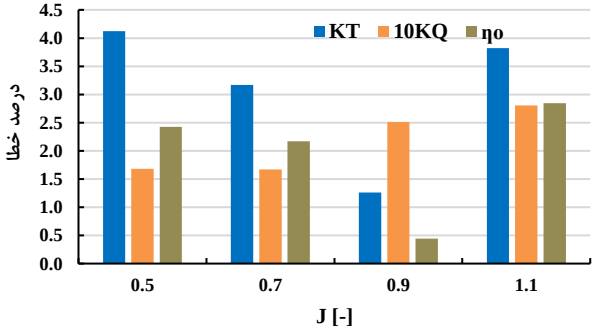
اختلاف درصد خطا میان شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های عددی، کیفیت مش‌بندی (با توجه به محدود بودن سیستم محاسباتی)، شرایط محیطی متفاوت و یا خطای اندازه‌گیری در داده‌های تجربی، باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]



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 سریB) به عنوان پروانه مرجع انتخاب شده و مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ مشخصات پروانه مرجع

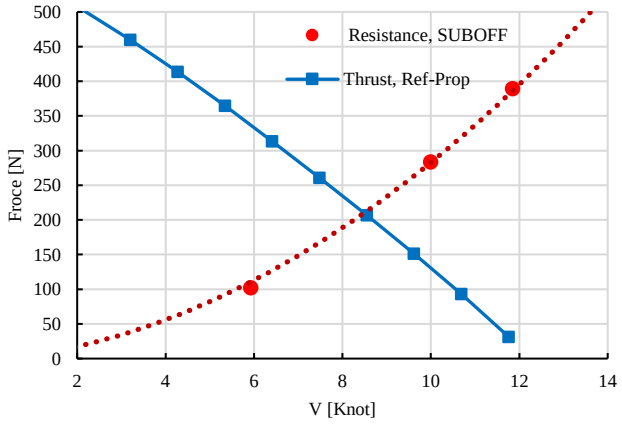
مشخصات	مقدار
نوع	سری B
قطر (میلیمتر)	۲۲۰
تعداد پره	۳
نسبت قطر هاب به قطر پروانه (d/D)	۰/۲
نسبت میانگین پیچ به قطر پروانه (P/D)	۱/۰۳
نسبت سطح گسترش یافته (A_E/A_O)	۰/۳۵

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 knot) انتخاب شده است.

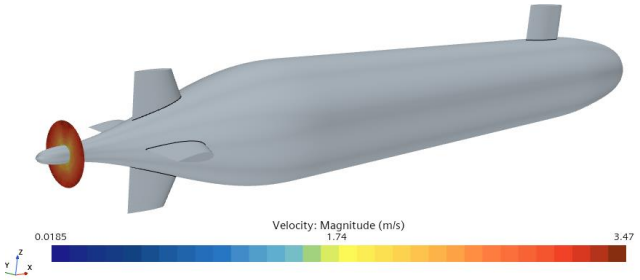


شکل ۷ نمودار مقاومت بدنه زیرسطحی و تراست تولیدی پروانه در سرعت‌های مختلف

متوسط سرعت ویک ورودی در سرعت ۸ نات در محل پروانه ۲/۸۲ متربرثانیه (V_A=2.82 m/s) می‌باشد(**شکل ۸**). در نتیجه از این سرعت ورودی در شبیه‌سازی‌های آب آزاد استفاده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]



شکل ۸ سرعت ویک 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.

$$\begin{cases} V_A = 2.82\ m/s \\ n = 1500\ rpm = 25\ rps \\ D = 22\ cm \end{cases} \rightarrow J = \frac{V_A}{n.D} \qquad (۱۴)$$

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

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

۴-۲- بررسی پارامتریک تغییر زاویه اسکیو

در این بخش تاثیرات زاویه اسکیو بر روی بازدهی و نویز پروانه (مرجع) بررسی شده است. با توجه به مرور و مطالعه پژوهش‌های انجام شده، شش زاویه (۹۰-۷۲-۵۴-۳۶-۰ درجه) برای زاویه اسکیو پروانه انتخاب گردیده است. زاویای اسکیو انتخاب‌شده در این پژوهش بر اساس مطالعات انجام‌شده و همچنین پروانه‌های ساخته شده اسکیو بالا و با در نظر گرفتن محدوده زوایای معمول این نوع پروانه‌ها تعیین شده است. این زوایا، 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 اسکیو بر عملکرد پروانه در شرایط مختلف به‌خوبی تحلیل شود. مشخصات هندسی تمام پروانه‌ها یکسان اما با اسکیو متفاوت هستند. مشخصات پروانه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. در این بخش نرخ تغییر زاویه اسکیو 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.

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

زاویه اسکیو	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	۳۵۸	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 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 اسکیو متفاوت ارائه شده است.

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

مدل پروانه	BPF1 فرکانس (Hz)	BPF1 شدت صوت SPL (dB)	BPF1 تغییرات SPL (dB)	BPF2 فرکانس (Hz)	BPF2 شدت صوت SPL (dB)	BPF2 تغییرات SPL (dB)
S-0	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۱۵۰/۲	۹۲/۴	-
S-36	۷۵/۴	۱۰۵/۲	-۰/۴	۱۵۰/۸	۹۷/۶	+۵/۲
S-54	۷۴/۹	۱۰۲/۹	-۲/۷	۱۴۹/۹	۸۹/۲	-۳/۲
S-72	۷۶/۳	۱۰۰/۲	-۵/۴	۱۵۲/۶	۹۳/۹	+۱/۵
S-90	۷۷	۱۰۱/۲	-۴/۴	۱۵۴/۱	۹۳/۶	+۱/۲

با ملاحظه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود افزایش اسکیو پروانه مرجع تا زاویه ۷۲ درجه سبب افزایش بازدهی در پروانه می‌شود. همچنین با افزایش اسکیو نویز تولیدی از پروانه هم کاهش می‌یابد. بهترین زاویه اسکیو از دیدگاه افزایش بازدهی و کاهش نویز تولیدی زاویه اسکیو 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 اسکیو ۳۶، ۵۴ و ۷۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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

۴-۳- 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 می شود.

۴-۳-۱-طراحی آزمایش به روش تاگوچی

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

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

سطح	زاویه اسکیو (درجه)	نوع نرخ تغییر اسکیو	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 اسکیو بالا در طراحی به روش تاگوچی

شماره شبیه‌سازی	زاویه اسکیو (درجه)	نوع نرخ تغییر اسکیو	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
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

۴-۳-۲-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	۳۵۸	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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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

نوع نرخ توزیع اسکیو	BPF1 فرکانس (Hz)	BPF1 شدت صوت SPL (dB)	BPF1 تغییرات SPL (dB)	BPF2 فرکانس (Hz)	BPF2 شدت صوت SPL (dB)	BPF2 تغییرات 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

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 همکارن 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 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

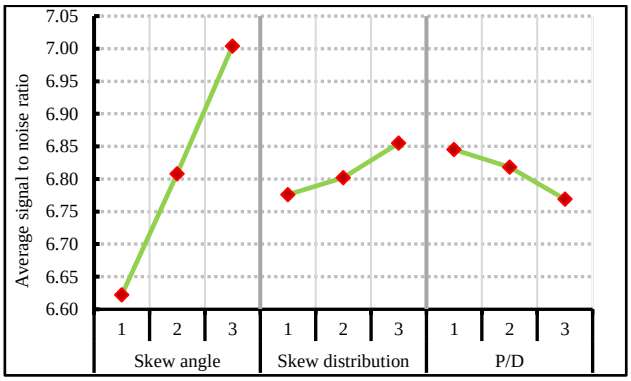
شماره هندسه	خروجی ۱ : تلفات (%)	نویز BPF1 (dB)	نویز BPF2 (dB)	مقادیر نرمال‌سازی شده N_{i1}	N_{i2}	N_{i3}	TL_i
طراحی ۱	۴۶/۸	۱۰۴/۷	۹۷/۹	۰/۹۷۵	۱	۱	۰/۴۷
طراحی ۲	۴۶/۹	۱۰۴/۱	۹۶/۷	۰/۹۷۷	۰/۹۹۴	۰/۹۸۸	۰/۴۶۶
طراحی ۳	۴۷/۴	۱۰۳/۹	۹۵/۷	۰/۹۸۸	۰/۹۹۲	۰/۹۷۸	۰/۴۶۴
طراحی ۴	۴۷	۱۰۲/۹	۹۴/۹	۰/۹۷۹	۰/۹۸۳	۰/۹۶۹	۰/۴۵۹
طراحی ۵	۴۷/۵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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]



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 اسکیو 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 اسکیو ۷۲ درجه، نرخ تغییر اسکیو 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 (طراحی۱۰) 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	۳۵۸	۰/۵۱	۰/۵۱۶	-	۰/۲۴۵	۰/۳۸۸
طراحی۷ (ترکیب پارامترها)		۰/۴۶	۰/۵۲۳	+۱/۴	۰/۱۹۸	۰/۲۷۸
طراحی۱۰ (بهینه‌سازی)		۰/۴۳	۰/۵۲۶	+۱/۹۵	۰/۱۷	۰/۲۱۹

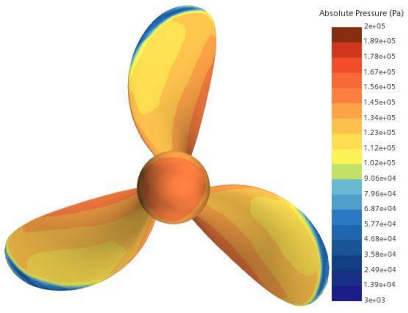
همچنین برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت هیدروفون در فاصله ۱ متر بالای پروانه قرار گرفته شده است. در جدول ۱۲ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه‌های طراحی ۷ و ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۲ مقایسه هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه طراحی شده

نوع نرخ توزیع اسکیو	BPF1 فرکانس (Hz)	BPF1 شدت صوت SPL (dB)	BPF1 تغییرات SPL (dB)	BPF2 فرکانس (Hz)	BPF2 شدت صوت SPL (dB)	BPF2 تغییرات SPL (dB)
مرجع	۷۵/۱	۱۰۵/۶	-	۱۵۰/۲	۹۲/۴	-
طراحی۷ (ترکیب پارامترها)	۸۳/۵	۱۰۰/۸	-۴/۸	۱۶۶/۹	۹۰/۷	-۱/۷
طراحی۱۰ (بهینه‌سازی)	۹۰/۱	۱۰۰/۳	-۵/۳	۱۸۰/۲	۹۰/۶	-۱/۸

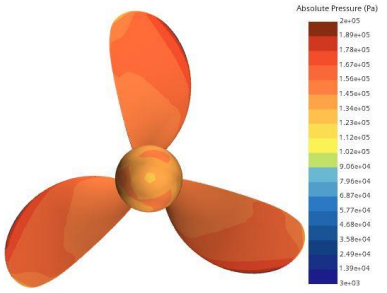
با ملاحظه به نتایج بدست آمده هندسه شماره ۱۰، که هندسه بدست آمده از بهینه‌سازی، بهترین عملکرد را از منظر هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی داشته است که خود نشان دهنده کارامد بودن شیوه بهینه‌سازی به روش تاگوچی می‌باشد.

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. شکل۱۱ توزیع فشار بر روی سطح پره‌های پروانه مرجع و پروانه بهینه‌شده اسکیوبالا 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.

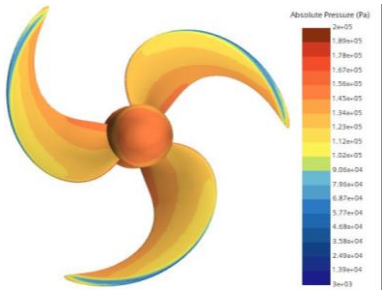


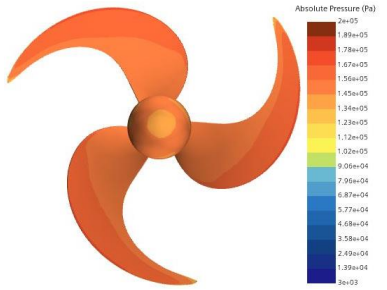
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]



الف)پروانه مرجع

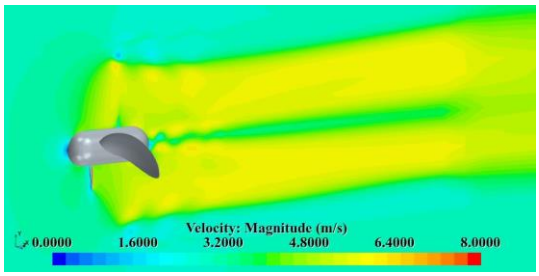




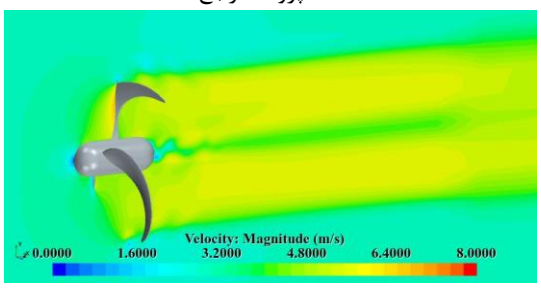
ب) پروانه طراحی شده اسکیو بالا

شکل ۱۰ توزیع فشار بر روی سطح پره‌های پروانه مرجع و پروانه بهینه شده اسکیو بالا

شکل۱۲ نیز توزیع سرعت در نواحی نزدیک دو پروانه در شرایط کارکردی برابر را نشان می‌دهد.



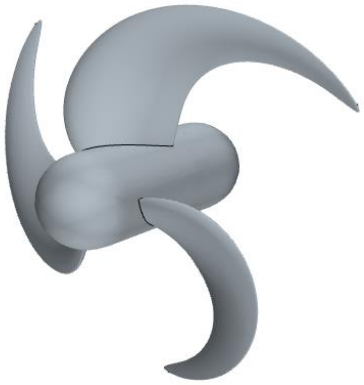
الف)پروانه مرجع



ب) پروانه طراحی شده اسکیو بالا

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

در نهایت شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکیو بالا (طراحی شماره ۱۰) را پس از بهینه سازی **هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی** نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ نمایی از پروانه اسکیو بالا بدست آمده از بهینه‌سازی هیدروآکوستیکی و هیدرودینامیکی

۵ – نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک بررسی پارامتریک جامع و بهینه‌سازی دوهدفه بر روی پروانه‌های اسکیو بالا انجام شد تا تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد این پروانه‌ها بررسی و بهینه شود. نتایج نشان داد که با تنظیم مناسب پارامترهای طراحی، می‌توان به تعادلی میان افزایش بازدهی و کاهش نویز تولیدی دست یافت. افزایش زاویه اسکیو پروانه گرچه کاهش نویز را به همراه داشت اما پس از زوایه ۵۴ درجه منجر به کاهش بازدهی می شد. تحلیل‌های انجام شده نشان داد که بهینه‌سازی هندسی پروانه‌ها با رویکرد چندهدفه نه تنها بهبود قابل توجهی در بازدهی را به همراه دارد، بلکه نویز تولیدی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این نتایج می‌تواند به عنوان یک راهنمای موثر برای طراحی پروانه‌های کارآمدتر در کاربردهای دریایی، به ویژه در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. در بررسی های صورت گرفته در این مقاله نویز پروانه ۵/۳ دسی‌بل 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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

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 *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-Sobrino, 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]

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 Procedings, “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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.4]