تحلیل عددی تاثیر گام هندسی بر سطح نویز انتشاری پروانه اسکیو بالا

احسان یاری*

*استادیار/ مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ehsanyari@mut-es.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

کلمات کلیدی:
گام هندسی
سطح نویز انتشاری
دینامیک سیالات محاسباتی
پروانه اسکیو بالا

چکیده

هدف از این مقاله تحلیل عددی هیدروآکوستیکی نویز انتشاری غیرکاویتاسیونی پروانه اسکیو بالا در گام های هندسی مختلف با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. گام هندسی پروانه از جمله مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در طراحی پروانه های دریایی می باشد، لذا در این مقاله از یک نمونه سری استاندارد پروانه زیرسطحی با تعداد پره های مختلف و در گام های هندسی متفاوت استفاده شده است و داده های مربوط به میدان ورتیسیتی و سطح نویز انتشاری استخراج و مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحلیل عددی از مدل اغتشاشی DES استفاده شده است که با تعداد شبکه متوسط در مقایسه با روش گردابه های بزرگ دارای جوابهای با دقت قابل قبول در حوزه نویز می باشد. به منظور افزایش دقت داده های عددی، شبکه تولید شده حول پروانه در نواحی لبه ابتدایی، لبه انتهایی و نوک پره ها و همچنین در ناحیه دنباله پایین دست جریان با تراکم بالاتری تولید شده است. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش زاویه گام هندسی پره پروانه میزان فشار استاتیکی بر روی سطح جلویی پره افزایش یافته و گردابه های ناشی از باس و هاب طولانی تر شده و میزان تغییرات سطح نویز انتشاری در راستای محوری در فرکانس های پایین کمتر از ۵ دسیبل اما در فرکانس های بالا نوسانی بوده و تغییرات محسوس تر است. بیشترین میزان تغییرات سطح فشار صوت بر حسب گام در راستای عمود بر جهت جریان و تا حدود ۴۰ دسیبل هم می رسد.

Numerical analysis of the effect of geometric pitch on the radiated noise level of high skew propeller

Ehsan Yari *

**Assistant professor, department of mechanical engineering, Maleke-Ashtar University of technology; ehsanyari11@gmail.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 9 Dec 2022
Accepted: 3 Feb 2025
Available online: 8 Feb 2025

Keywords:
Geometric pitch
Sound pressure level
CFD
High skew propeller

ABSTRACT

The purpose of this article is the numerical hydro acoustic analysis of non-cavitating radiated noise in different geometric pitches using the computational fluid dynamics method. The geometric pitch of the propeller is one of the most important influencing parameters in the design of marine propellers, Therefore, in this article, a sample of the standard underwater propeller series with different number of blades and different geometric pitches has been used and the data related to the vorticity field and the radiated noise level have been extracted and studied. In this numerical analysis, the DES turbulence model has been used, which has solutions with acceptable accuracy in the noise subject with an average grid number, compared to the large eddies method. In order to increase the accuracy of the numerical data, the grid generated around the propeller in the areas of the leading edge, trailing edge, tips of the blades and in the region of the downstream, has been produced with a higher grid density. According to the obtained results, by increasing the geometric pitch angle of the propeller blade, the static pressure on the pressure side of the blade increases, and the vortices caused by the boss and hub become longer, and the amount of change in the sound pressure level in the axial direction at low frequencies is less than 5 dB, but at high frequencies it is oscillating and the changes are more noticeable. The highest amount of change in the sound pressure level in terms of pitch is in the direction perpendicular to the flow direction and reaches up to about 40 db.

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

۱- مقدمه

انتقال صوت به دو صورت طولی و عرضی منتشر می‌شود. وقتی صدایی در یک رسانه منتشر می‌شود، نوسانات فشار آن بالاتر یا پایین‌تر از فشار اتمسفر محیط می‌شود. صداها معمولا با یک فرکانس منتشر نمی‌شوند، بلکه در حالت عمومی صداها مخلوط پیچیده‌ای از نوسانات فشار است که نسبت به فاز، فرکانس و دامنه تغییر می‌کنند. بدست آوردن یک رابطه ریاضی بین خصوصیت‌های متفاوت برای یک چنین مخلوط پیچیده‌ای بسیار دشوار است. در شناورهای زیرسطحی پروانه مهمترین بخش و عامل در تولید نویزهای هیدرودینامیکی و مکانیکی می باشد. جابجایی سیال آب، چرخش سیال آب توسط پروانه و میدان ویک و ورتکس های تولید شده و همچنین حباب های کاویتاسیونی از جمله عوامل اصلی در نویز تولیدی توسط پروانه های دریایی می باشند.

تاریخچه فعالیت های علمی در خصوص هیدروآکوستیک و نویز در پروانه های دریایی قدمت زیادی نداشته و اولین روابط تئوری معتبر به دهه ۵۰ میلادی بر می گردد. در ادامه برخی مطالعات عددی و تجربی مربوط به پروانه های دریایی که مرتبط با مقاله حاضر می باشند، ارائه شده است.

سئول و همکاران به بررسی عددی نویز غیرکاویتاسیونی ناشی از یک پروانه مغروق در شرایط کاری مختلف با و بدون داکت پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تاثیر افزودن داکت بر نویز دوردست بسیار کم و با پروانه بدون داکت تقریبا برابر است[۱]. پارک و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی نویز ناشی از پروانه و یک منبع نویز مجازی مستقر روی توپی پروانه از طریق یک آرایه ۱۰ هیدروفونی در تونل کاویتاسیون MOERI پرداختند. پروانه در شرایط و یک ناشی از استقرار مدل در تونل بررسی‌شده است. در این تحقیق‌تر از شدت صوت در یک‌سوم اکتاو باندها با در نظر گرفتن تغییرات در فشار تونل تعیین‌شده است[۲]. کورکوت و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی هیدرودینامیکی، کاویتاسیونی و آکوستیکی پروانه با پوشش پرداختند. آن‌ها برای تست از پروانه شناور تانکر استفاده کرده و در تونل کاویتاسیون امرسون دانشگاه نیوکاسل تست‌های به هیدرودینامیکی و نویز انجام‌شده است[۳]. هون و همکاران در سال۲۰۱۳ به بررسی مدل پروانه نصب‌شده به شناور در حوضچه تست SSMB و ثبت سیگنال نویز در آن پرداختند. هدف از این تحقیق بررسی سیگنال نویز به روش تبدیل فوریه کوتاه‌مدت و تشخیص فرکانس ترکیدن حباب در کاویتاسیون ورتکس نوک پره و نویز ناشی از آن بوده است[۴]. آکتاس و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی و مقایسه نویز ناشی از پروانه شناور کاتاماران به روش آزمایشگاهی در تونل امرسون و مقایسه نتایج با تست میدان آزاد پرداختند. در این تحقیق، تراز شدت صوت در فرکانس‌های یک‌سوم اکتاو بندها به هم نزدیک بوده است و مشخص شد که تونل نتایج مناسب از تست میدانی را در اختیار قرار می‌دهد. آکتاس و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی رخداد کاویتاسیون و اندازه‌گیری نویز یک پروانه پنج پره متعلق به شناور کاتاماران در شرایط جریان با زاویه برخورد به مدل پروانه در تونل کاویتاسیون امرسون پرداختند. تست‌ها در زوایای بررسی تا ۶ درجه و با تغییرات فشار تکرار شده است[۵]. کیم و همکاران نویز آیروآکوستیکی یک فن را به روش هولوگرافی آکوستیکی نزدیک شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش به خوبی می توان از روش آیروآکوستیکی مبتنی بر معادلات ویلیامز-هاوکینگز برای پیش بینی نویز فن محوری آزاد استفاده کرد. نتایج این مطالعه برای فرکانس‌های پایین تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد[۶]. جانگ و همکاران به مطالعه عددی نویز پروانه در جریان غیرکاویتاسیونی به کمک نرم افزار اس سی تترا به روش مکانیک سیالات محاسباتی و به کارگیری مدل دوقطبی چرخان پرداختند. شبیه‌سازی‌ها برای هر دو حالت جریان ورودی پایا و غیرپایا انجام شده و نتایج از دقت خوبی برخوردار بوده است[۷]. زِنگ و دو به مطالعه عددی طیف خطی فرکانس نویز پروانه‌های معکوس گرد پرداخته و مکانیزم اثر تداخل، اثر میدان هارمونیک محیط، طیف خطی فرکانس و جهت گیری فشار صدا را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند[۸]. در سالهای اخیر روشی جدید برای پیش بینی تجربی نویز کاویتاسیونی توسط اکتاس و همکاران ارائه گردید. در این روش نویز پروانه‌ی مدل پس از آزمایش در تونل کاویتاسیون اندازه‌گیری شده و با برونیابی نویز پروانه در مقیاس واقعی پیش‌بینی شده است[۹]. بروکر و هامفری نویز کاویتاسیونی یک شناور تحقیقاتی کوچک را در آب کم عمق اندازه‌گیری کردند. آنها از سه هیدروفون با آرایه‌های مختلفی استفاده کرده و نویز پروانه در مقیاس واقعی و همچنین میزان عدم قطعیت آزمایش‌ها را نیز بررسی کردند[۱۰]. کیم و همکاران دو روش تجربی برای پیش بینی نویز ناشی از پروانه ارائه کردند. در روش اول بر اساس مدل پروانه، فرمول های نیمه تجربی بر مبنای تئوری نویز گردابه‌ی نوک پره توسعه داده شده و در روش دوم، نویز پروانه در مقیاس واقعی بر اساس ضریب انتقال صوت در پاشنه شناور پیش بینی می‌شود[۱۱]. هایمف و همکاران نویز غیرکاویتاسیونی پروانه را به صورت تجربی پیش بینی کردند. آنها پس از تفریق میزان نویز ناشی از محیط آزمایشگاه و پس زمینه از نویز اندازه‌گیری شده برای پروانه مدل و با برونیابی، نویز پروانه در مقیاس واقعی را پیش بینی کردند[۱۲]. تانی و همکاران در مطالعات تجربی خود به بررسی پالس‌های فشاری و نویز کاویتاسیونی منتشر شده از دو پروانه با توزیع ریک متفاوت پرداختند. نتایج تست‌های انجام شده در تونل آب نشان داده است که وقوع کاویتاسیون لایه‌ای به طور قابل توجهی شدت نویز را افزایش می‌دهد[۱۳]. پارک و سئونگ روش جدیدی برای تخمین نویز ناشی از کاویتایسون گردابه‌های نوک پره در مدل‌های تجربی ارائه کردند. در این مطالعه روشی ارائه شده که مبتنی بر معادله‌ی ریلی-پلست، مدل گردابه‌ی رانکین، تئوری خط برآزا و تعدادی فرضیات فیزیکی است. بر اساس نتایج بدست آمده نتایج این روش نسبت به سایر روش‌ها دقت بالاتری دارد[۱۴]. اکتاس و همکاران در فعالیتی دیگر در سال ۲۰۱۸ به مطالعه‌ی تجربی نویز ناشی از کاویتاسیون در پروانه‌های سری استاندارد پرداختند. در این مطالعه مکانیزم ایجاد نویز کاویتاسیونی از طریق پردازش سیگنال‌های زمان-فرکانس انجام شده و پارامترهای هندسی مختلف شامل نسبت سطح پره، نسبت گام به قطر و تعداد پره‌ها را مورد بررسی قرار داده است[۱۵]. درسال۱۹۵۲ لایت هیل با استفاده از روابط کلی حاکم بر سیال از روابط پیوستگی و ممنتوم بدون در نظرگرفتن فرض های ساده کننده، توانست رابطه‌ی کلی صوت را برای نویز حاصل از جت در هوا ، با استفاده از تحلیل اکوستیکی ارائه کند[۱۶].

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

ازدن و همکاران نویز پروانه‌ی هفت پره‌ای را در شرایط مختلف جریان با استفاده از مدل اغتشاشی کی-امگا اس‌اس‌تی و مدل آکوستیکی مبتنی بر معادلات ویلیامز-هاوکینگز مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده در صورت عدم وجود مدل بدنه‌ی زیردریایی می توان صرفا با داشتن الگوهای گردابی جریان ورودی به پروانه نویز آن را با دقت قابل قبولی پیش بینی کرد[۱۷]. وی و همکاران به بررسی تاثیر بازتابی بدنه‌ی زیردریایی بر نویز غیرکاویتاسیونی پروانه‌ی آن پرداختند. بر اساس نتایج، حداکثر افزایش شدت صوت در اثر پراکنش از سطح بدنه در فرکانسی معادل سه برابر فرکانس گذر پروانه تا ۲۰ دسیبل افزایش یافته است[۱۸]. سزن و همکاران به پیش بینی عملکرد هیدرودینامیکی و تعیین طیف نویز پروانه‌ی DTMB4119 پرداختند. نتایج این پژوهش عددی نشان داد که نویز پروانه در حالت بدون کاویتاسیون عمدتا ناشی از گردابه های نوک پره بوده و با افزایش سرعت چرخش پروانه میزان نویز آن نیز افزایش می‌یابد[۱۹]. نصیر و همکاران نویز غیرکاویتاسیونی یک پروانه را با استفاده از نرم افزار فلوئنت و به دو روش گردابه های بزرگ و RANS انجام دادند. برای مدلسازی RANS از مدل استاندارد گی- اپسیلون استفاده شده است. اطلاعات فشاری بدست آمده از مدلسازی هیدرودینامیکی با استفاده از آنالوژی آکوستیکی ویلیام-هاوکینگز برای پیش‌بینی نویز پروانه استفاده شده است[۲۰]. بررسی تاثیر زاویه ریک نوک پره بر مشخصات هیدرودینامیکی و شدت نویز پروانه DTMB4382 توسط قاسمی و همکاران انجام گرفت. در این مطالعه از نرم افزار انسیس فلوئنت برای شبیه سازی جریان استفاده شده است. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه ریک شدت نویز کاهش می یابد البته بازدهی پروانه نیز مقداری افت می کند[۲۱]. خالد و همکاران به بررسی نویز هیدروفویل نوسانگر پرداختند. در این مطالعه با استفاده از معادلات ویلیام-هاوکینگز نویز ناشی از شنای ماهی را در محدوده وسیعی از پارامترهای سینماتیکی و همچنین محدوده وسیعی از پارامترهای جریان از جمله عدد رینولدز، فرکانس کاهش یافته و عدد استروهال مطالعه کردند[۲۲]. ژانگ و همکاران با توسعه چند کد محاسباتی مشخصات نویز ناشی از پروانه‌ی مغروق و روش‌های پیش بینی آن را در فرکانس‌های پایین و متوسط از سه روش ترکیبی المان مرزی و المان محدود، المان محدود و المان نامحدود و همچنین المان محدود و لایه خود تطبیق دهنده مورد بررسی قرار دادند[۲۳]. در سال ۲۰۱۹ جی دانگ و همکاران برروی توسعه پروانه های سری تونل‌دار برای نویز و لرزش کم مطالعات کستردهای را به مدل سه سال زیر نظر موسسه تحقیقاتی هند انجام داده‌اند. هدف از این تحقیقات طراحی یک پروانه تونل‌دار (داکت‌دار) برای کلاس شناور کامفورد بوده. در این مطالعه اثرات طول تونل (۲,۵ تا ۱۲,۰ برابر قطر تونل)، شیب بدنه کشتی (۹۰ درجه تا ۶۵ به صورت عمودی و افقی)، فرم‌های دهانه تونل (پخ، گرد، تیز و دو پخ) را پوشش می‌دهد. این مطالعه برای پروانه‌های گام ثابت با گام متغییر با تعداد پره‌های مختلف (۴ تا ۷)، نسبت سطح گسترش‌یافته (۰,۴۵ تا ۰,۹۰) و نسبت گام (۰,۶۵ تا ۱,۱۵) انجام شده است. روش طراحی پروانه نیز با توجه به پارامترهای اصلی، مانند اسکیو (به جلو و عقب)، توزیع گام و همچنین فرم S شکل خط کمبر برای تیغه‌های پروانه‌های گام ثابت مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه اثرات پارامترهای مذکور را بر روی نیروی جانبی، عملکرد کاویتاسیون، سطوح پالس فشار، نیروهای تحریک در بخش تونل و سطوح نویز تابش شده زیر آب در میدان دور را بررسی کرده است[۲۴].

ولادیمیر کراسیلنیکوف و همکاران در سال ۲۰۲۲ برروی روش‌های قابل اطمینان برای پیشبینی نویز پروانه‌ها پرداخته‌اند. در این مقاله، مروری بر دامنه تحقیقاتی پروژه ProNoVi با هدف بهبود روش‌های پیش‌بینی نویز و ارتعاشات ناشی از پروانه‌های دریایی انجام شده است. این مقاله محتویات نتایج آزمایشی انجام شده، مجموعه داده‌های اعتبار سنجی توسعه‌یافته، و کاربرد روش‌های عددی با دقت بالا برای محاسبه عملی عملکرد هیدروآکوستیک پروانه‌هایی را که در شرایط آب آزاد و پشت بدنه کشتی کار می‌کنند، توصیف می‌کند. مقایسه‌هایی بین روش‌های عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی در یک مورد کشتی مرجع، برای شرایط یکسان ارائه می‌شود، و چالش‌هایی که در طول اعتبارسنجی با آن مواجه می‌شوند مورد بحث قرار می‌گیرند[۲۵].

جون یونگ پارک و همکاران در سال ۲۰۲۲ برروی مطالعه موردی در مورد طراحی پروانه برای کشتی تجاری با در نظر گرفتن نویز زیر آب و راندمان پیشرانه، مطالعاتی انجام داده‌اند. در این مطالعه، سه نوع پروانه چهار پره با توزیع شعاعی مختلف گام و کمبر برای بررسی رابطه بین نویز زیر آب (URN) و راندمان هیدرودینامیکی طراحی شد. در مرحله طراحی پروانه، عملکرد هیدرودینامیکی آن‌ها با استفاده از CFD مورد ارزیابی قرار گرفته است. توزیع جریان حول پروانه نیز از روش المان مرزی (BEM) به عنوان شاخص مرجع محاسبه شد. تست‌های تجربی نیز در تونل کاویتاسیون برای سه پروانه به ترتیب برای تجزیه و تحلیل راندمان پیشرانه و نویز زیر آب توسط ملخ انجام شد[۲۶].

هدف از مطالعه حاضر تحلیل عددی نویز پروانه سری استاندارد MAU با کاربرد در شناورهای زیرسطحی می باشد. بدین منظور چند هندسه با گام های هندسی مختلف تولید شده و تحت شرایط جریانی یکسان به منظور بررسی تاثیر گام هندسی بر روی سطح نویز انتشاری زیرسطحی (جریان تک فازی) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

اصل اساسی که در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقاء جرم است. این اصل بیان می‌دارد که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی بیان می‌گردد. این معادله برای سیالات تراکم‌پذیر به فرم زیر بیان می‌شود[۲۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \qquad (۱)$$

که در آن V بردار سرعت و ρ چگالی می‌باشد. مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقاء اندازه حرکت را درباره آن بیان کرد. قانون دوم نیوتون بیان می‌کند که برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر است با تغییرات خالص مومنتم با در نظر گرفتن جریان غیرقابل تراکم و ثابت فرض کردن ضریب ویسکوزیته، شکل معادله ناویراستوکس به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 V \qquad (۲)$$

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

که در آن V بردار سرعت، P بیانگر فشار، f نیروهای حجمی و μ ویسکوزیته می‌باشد. اپراتور $\frac{D}{Dt}$ بیانگر مشتق مادی می باشد. در پروانه‌های دریایی به دلیل نرخ بسیار کم انتقال حرارت می‌توان از حل معادله انرژی صرف‌نظر کرد. در این مقاله برای مدلسازی اغتشاش از مدل توربولانسی DES[1] استفاده شده است. DES در واقع ترکیبی از دو روش RANS و LES[2] است به این صورت که در نواحی نزدیک دیواره از روش RANS و در سایر نواحی از روش LES استفاده می‌کند. در نواحی نزدیک دیواره جامد طول مقیاس آشفتگی کمتر از حداکثر ابعاد شبکه است به همین دلیل در این نواحی از مدل RANS برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده می‌شود. با افزایش طول مقیاس آشفتگی نسبت به ابعاد شبکه جریان توسط مدل LES شبیه‌سازی می‌شود که دقت به مراتب بالایی دارد[۲۸-۲۹].

سه منبع اصلی تولید صوت عبارتند از تولید جرم، تغییر مومنتوم و منابع غیر خطی همانند جریان مغشوش. البته منابع دیگری مانند واکنش های شیمیایی و حرارتی نیز از جمله منابع جدی تولید صوت مطرح می باشند. رابطه کلی مربوط به موج آکوستیکی بصورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 p' = q \qquad (۴)$$

که q برابر با منابع تولید صوت یا همان عبارات چشمه هستند.

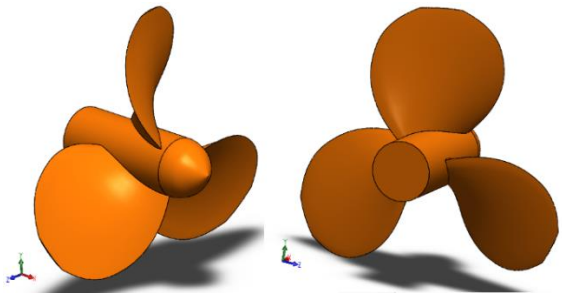
در این مقاله برای مدلسازی میدان آکوستیکی از روش ویلیام و هاوکینگز استفاده شده است. فرمولاسیون ویلیام و هاوکینگز شکل کلی تحلیل آکوستیکی لایتهیل است و قادر است صدای تولید شده با منابع آکوستیکی هم ارزی چون تک قطبی[3]، دو قطبی[4] و چهارقطبی[5]ها را پیش بینی کند. روش اصلی که توسط لایتهیل برای حل معادله غیرهمگن موج پیشنهاد شده است، منجر به فرمولی انتگرالی می شود. این روش بر پایه استفاده از تابع گرین[6] در دامنه نامتناهی می باشد. ,

$$\rho'(x;t) = \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{\Omega} \frac{T_{ij}\left(y; t - \frac{|x-y|}{a_0}\right)}{|x-y|} dy \qquad (۵)$$

که در معادله فوق، Ω دامنه انتگرال گیری بر روی حجمی است که توربولانس در آنجا باعث تولید نویز می شود. این دامنه باید تمامی منابع تولید نویز را پوشش دهد. x بردار مکان گیرنده نویز، y بردار مکان منبع نویز و a_0 سرعت صوت می‌باشد. با حل معادله انتگرالی (۵)، نوسانات چگالی برای گیرنده صوت در مکان x و در زمان t حاصل می شود. در ادامه ابتدا در مورد هندسه پروانه، دامنه حل، شبکه بندی دامنه و همچنین در مورد شرایط مرزی و سپس در مورد جزئیات شبیه‌سازی جریان توربولانس به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی به منظور یافتن نویز حاصل از پروانه توضیح داده خواهد شد. پروانه مورد نظر جهت اعتبارسنجی تحلیل عددی DTMB4119 است، ابتدا به بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی پرداخته می‌شود. سپس به صحت سنجی نتایج هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه با تحقیقات انجام شده پرداخته خواهد شد.

۳- اعتبارسنجی نتایج عددی

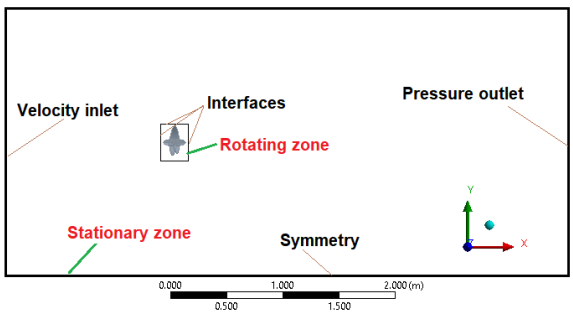
پروانه DTMB4119 یک نمونه پروانه سه پره‌ای بنچمارک می باشد که نتایج تحقیقات تجربی هیدرودینامیکی و داده های هیدروآکوستیکی آن در ضرایب پیشروی مختلف موجود می باشد. هندسه پروانه در شکل ۱ نمایش داده شده است و مشخصات هندسی بیشتر در مرجع [۳۰] قابل دسترس می‌باشد.



شکل ۱- هندسه سه بعدی پروانه DTMB4119

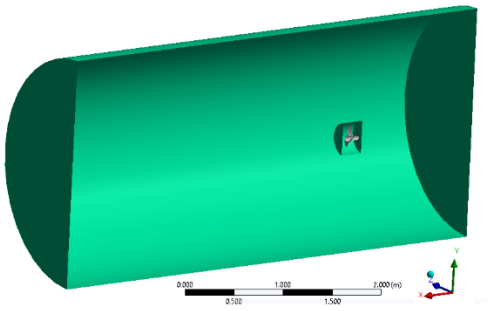
۴- دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و تنظیمات حل

دامنه محاسباتی به صورت دو هندسه استوانه ای چرخان و ثابت در نظر گرفته شده است(شکل۲). ابعاد استوانه ثابت که در واقع دامنه محاسباتی اصلی می باشد بگونه‌ای در نظر گرفته شده که اثرات دیواره های میدان حل بر روی میدان جریان حول پروانه حذف شود. میدان حل شامل استوانه‌ای بزرگ به شعاع پنج قطر پروانه و طول پانزده قطر پروانه می‌باشد و قطر و طول استوانه کوچک دربرگیرنده پروانه نیز به ترتیب D ۱/۱ و ۰/۶D است که به عنوان حجم دوار در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی شامل شرط مرزی ورودی از نوع سرعت[7] و شرط مرز خروجی از نوع فشار[8] با فشار نسبی صفر است . مرزهای جانبی استوانه بزرگ از نوع متقارن[9] است که دارای تنش برشی صفر است . از شرط مرزی سطح مشترک[10] برای تمامی سطوح استونه دوار کوچک حول پروانه استفاده شده و همچنین برای تمامی سطوح پروانه از شرط مرزی دیواره چرخان[11] درشرایط بدون لغزش[12] بهره گرفته شده است. دامنه محاسباتی مطابق شکل۳ ترکیبی از دو شبکه سازمان یافته[13] و بی سازمان است. در شبکه لایه مرزی از ۱۰ لایه با ضخامت لایه اول۰/۱ میلی‌متر و با نرخ رشد[14] ۱/۱ استفاده شده است.

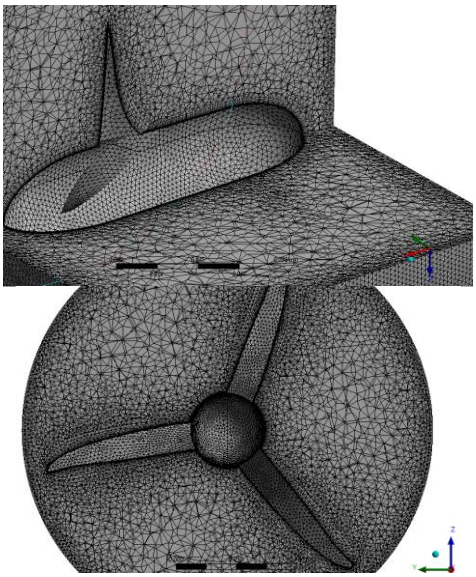


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]



شکل ۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حول پروانه

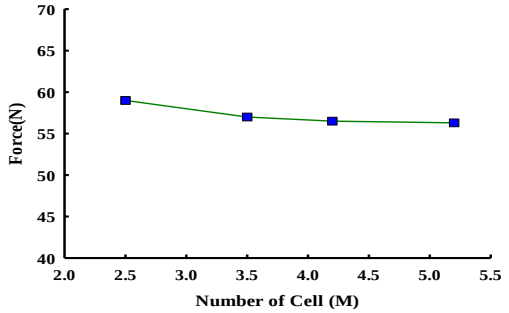


شکل ۳- لایه مرزی و شبکه بی سازمان حول پروانه

با توجه به خصوصیات آب و تعریف عدد رینولدز، عدد رینولدز از مرتبه ۱۰ میلیون است. سیال آب به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است زیرا عدد ماخ کوچکتر از مقدار ۰/۳ است. سرعت صوت در آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و چگالی آب ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. فشار مرجع آکوستیک [۱۵] برای سیال آب برابر با 10^{-6} پاسکال است.

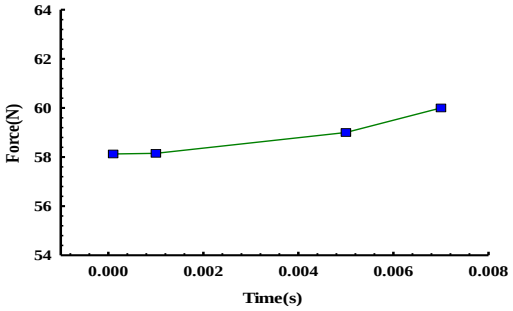
۵-استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

جواب‌های حل عددی باید مستقل از سایز ، تراکم شبکه و بازه زمانی باشند. بدین منظور مطابق شکل۴ مقدار نیروی تراست برای پروانه در چندین سایز شبکه و بازه زمانی مختلف(شکل۵) به دست آمده تا شبکه و بازه زمانی انتخاب شوند که اندازه و زمان آن روی مقدار نیروی تراست و حل تاثیری نداشته باشد.



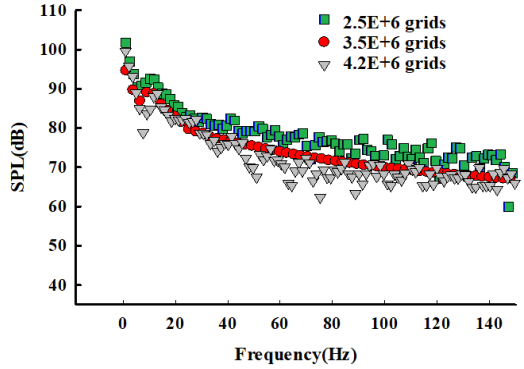
شکل ۴- استقلال شبکه نیروی تراست در برابر تعداد شبکه

(بر حسب میلیون گره محاسباتی)



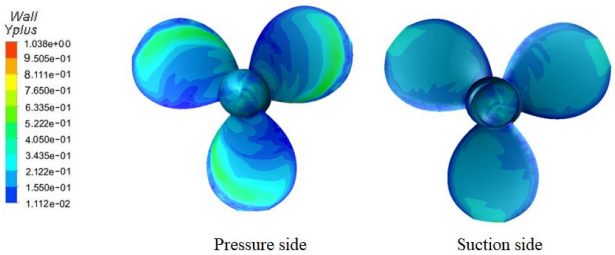
شکل ۵- نمودار استقلال حل از گام زمانی

در شکل۶ بررسی استقلال حل از شبکه در مورد نویز دریافتی از هیدروفونی که در موقعیت $\theta=0$ و $R=5D$ قرار دارد نشان داده شده است. مطابق شکل اختلاف محسوسی بین نتایج بدست آمده با تعداد شبکه مختلف مشاهده نمی شود، لذا مقدار شبکه ۴/۲ میلیون گره محاسباتی برای انجام تحلیل های عددی انتخاب شده است.



شکل ۶- نمودار استقلال حل اکوستیکی از تعداد گره محاسباتی

در شکل۷ کانتور توزیع پارامتر $Y+$ بر روی سطح جلویی و پشتی پروانه نشان داده شده است، همانگونه که مشاهده می گردد در اکثر نقاط این مقدار کمتر از ۱ است.



شکل ۷- نمودار توزیع پارامتر $Y+$ بر روی سطح پروانه DTMB4119

۵-۱-آنالیز حساسیت شبکه و عدم قطعیت نتایج عددی

در هر شبیه‌سازی عددی، اطمینان از مستقل بودن نتایج از تعداد و نوع شبکه محاسباتی مورد استفاده ضروری است . روش شاخص همگرایی شبکه (GCI) که برای اولین بار توسط روچ [۳۲] ارائه شد، برای ارزیابی خطای گسسته سازی و عدم قطعیت های عددی استفاده می شود . این روش به حداقل سه شبکه S_1، S_2، وS_3 به ترتیب با تعداد سلول های

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

مختلف N_1 ، N_2 و N_3 ، از درشت ترین شبکه (۱) تا ریزترین(۳) نیاز دارد. ضریب پالایش شبکه (r) به صورت زیر تعریف شده است:

$$r_{21} = (\frac{N_1}{N_2})^{1/3} \quad (۶)$$

- **شاخص همگرایی شبکه (GCI)**

بر اساس روش روچ، نسبت همگرایی به صورت زیر تعریف می شود:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (۷)$$

که در آن T نیروی تراست پروانه می باشد. در این معادله ε ، نشان دهنده تفاوت نتایج بدست آمده از حل با استفاده از شبکه i,j است .برای نسبت همگرایی، سه سناریو را می توان در نظر گرفت: اگر $R > 1$ باشد، شبکه در حال واگرایی است .اگر $R < 0$ باشد، همگرایی نوسانی است .اگر R $1 >$باشد، شبکه به صورت یکنواخت همگرا می شود.

هنگامی که نتایج به‌دست‌آمده با شبکه‌های مورد بررسی در حالت همگرایی هستند، از برون‌یابی ریچاردسون برای تخمین مرتبه هم‌گرایی استفاده می‌شود . مرتبه دقت این الگوریتم طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود، جایی که r نسبت اصلاح شبکه است، همانطور که قبلاً تعریف شد [۳۲]:

$$P = \frac{Ln(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}})}{Ln(r)} = \frac{Ln(\frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1})}{Ln(r)} \quad (۸)$$

در نهایت با استفاده از رابطه (۹) شاخص همگرایی شبکه محاسبه می شود .در این معادله ضریب Fs ضریب تضمین همگرایی است و مقدار Fs=1.25توصیه می شود[۳۲]. علاوه بر این، در این معادله، نماد $|\varepsilon_{ij}|$ خطای نسبی تقریبی را نشان می دهد.

$$GCI_{fine} = F_S \frac{|\varepsilon_{12}|}{r^p - 1} = \frac{F_S}{r^p - 1}\left|\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right|$$
$$GCI_{Coarse} = F_S\, r^p \frac{|\varepsilon_{23}|}{r^p - 1} = \frac{F_S\, r^p}{(r^p - 1)}\left|\frac{T_2 - T_3}{T_2}\right| \quad (۹)$$

شاخص همگرایی شبکه ای نشان می دهد که نتایج به دست آمده چقدر از مقدار دقیق فاصله دارد .به عبارت دیگر، این روش نشان می دهد که چگونه نتایج با پالایش شبکه تغییر می کند .مقادیر کوچک این شاخص نشان می دهد که اصلاح بیشتر شبکه نتایج را بهبود نمی بخشد.

- **پالایش شبکه و نتایج**

شبکه‌های محاسباتی با افزایش و کاهش ارتفاع اولین لایه از تقسیمات لایه مرزی پالایش شده‌اند. بر اساس مقدار y+ (کمتر از ۱) ارتفاع لایه اول در شبکه ریز ۰/۰۵ میلی متر محاسبه می شود. نتایج در جدول۱ ارائه شده است.

جدول۱- مطالعه استقلال شبکه برای تراست

ارتفاع اولین لایه از لایه مرزی (میلی متر)	شبکه محاسباتی (×10+6)	تراست (نیوتن)
ΔS_1=0.20	۳/۵	۵۶/۴۴
ΔS_2=0.10	۴/۲	۵۶/۴۳
ΔS_3=0.05	۵/۲	۵۶/۴۰

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، خطاهای میزان تراست در بین سه نوع شبکه بسیار ناچیز است که استقلال شبکه را تایید می کند. میزان $R = \frac{1}{3}$ بوده و علاوه بر این، مقادیر GCI_{fine}=0.0001 و GCI_{coarse}=0.0099هستند که مقادیر کوچک و مطلوب هستند. نسبت همگرایی R برابر با $R = \frac{1}{3}$ است که کمتر از ۱ است و نشان دهنده همگرایی شبکه است. بنابراین، مقدارΔS_2=0.10 برای تولید شبکه در همه موارد انتخاب شد.

۶- صحت سنجی نتایج عددی پروانه DTMB4119

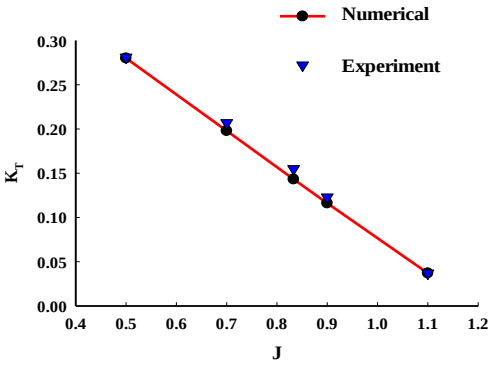
برای بیان نتایج تحلیل هیدرودینامیکی پروانه از ضریب پیشرانش[۱۶] ، ضریب گشتاور[۱۷] و بازده هیدرودینامیکی[۱۸] استفاده می شود. این ضرایب و راندمان به ترتیب مطابق فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردند:

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

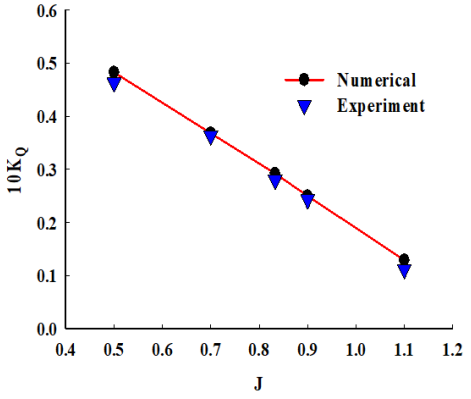
$$K_Q = \frac{Q}{\rho\, n^2 D^5} \quad (۱۱)$$

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

که در این روابط $J = \frac{V}{nD}$ ضریب پیشروی، T نیروی پیشرانش تولیدی توسط پروانه، Q گشتاور وارد بر پروانه، ρ چگالی سیال و n سرعت چرخش پروانه بر حسب دور بر ثانیه است. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان هر یک از این ضرایب را بر حسب ضریب پیشروی مشاهده نمود. مقدار این ضرایب مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و این نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی است.



شکل ۸- نمودار ضریب تراست بر حسب ضریب پیشروی در مقایسه با نتایج تجربی [۳۰]



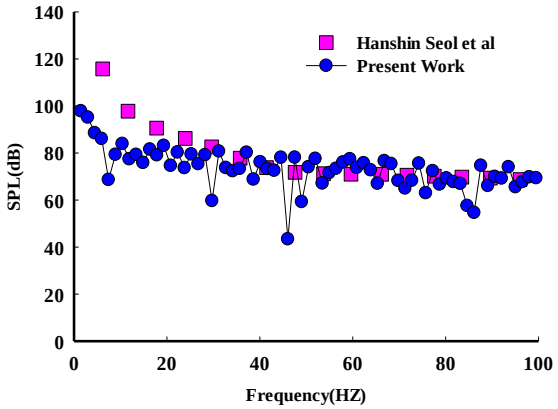
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

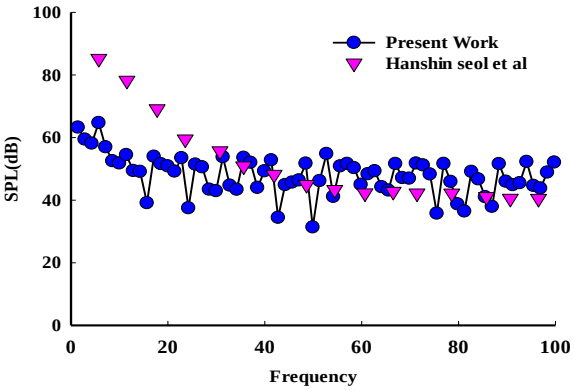
شکل ۹- نمودار ضریب گشتاور بر حسب ضریب پیشروی در مقایسه با نتایج تجربی [۳۰]

۷- نتایج هیدروآکوستیکی پروانه DTMB4119

برای صحت سنجی نتایج هیدروآکوستیکی از داده های هانشین سئول و همکاران [۳۱] استفاده شده است. آن‌ها با در نظر گرفتن دو دریافت‌کننده در جهت شعاعی و عمود بر محور چرخش پروانه در فواصل پنج برابر قطر پروانه از محور چرخش، مقادیر نویز پروانه را در این نقاط به دست آوردند. مقدار سرعت چرخشی پروانه و سرعت جریان ورودی به ترتیب برابر با ۱۲۰ دور بر دقیقه و۱/۶ متر بر ثانیه است.



شکل ۱۰- مقایسه تراز فشار صوتی کار حاضر با نتایج هانشین سئول [۳۱] در فاصله5D و θ=0o



شکل ۱۱- مقایسه نمودار تراز فشار صوتی کار حاضر با نتایج هانشین سئول [۳۱] در فاصله5D و θ=90

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان تراز فشار صوتی (SPL) را بر حسب فرکانس‌های مختلف در شرایط کارکرد مشابه در دو نقطه دریافت کننده مشخص، در کار حاضر و نتایج هانشین سئول و همکاران [۳۱] مشاهده نمود. همانطور که دیده می‌شود، نمودار تراز فشار صوتی با نتایج مراجع مذکور تطابق خوبی دارد. معمولا در بررسی نویزهای غیر کاویتاسیونی پروانه‌های زیر دریایی فرکانس‌های مورد بررسی در بازه ۰ تا ۱۰۰ هرتز می‌باشد. در واقع بعد از حل شدن معادلات آکوستیکی که در فصل سوم به آن‌ها پرداخته شد، فشار آکوستیکی بر حسب زمان به دست می‌آید که معمولا با تبدیل فوریه از فضای زمانی به فضای فرکانسی منتقل می‌شود. تمامی تحلیل‌های آکوستیکی در فضای فرکانسی انجام شده است.

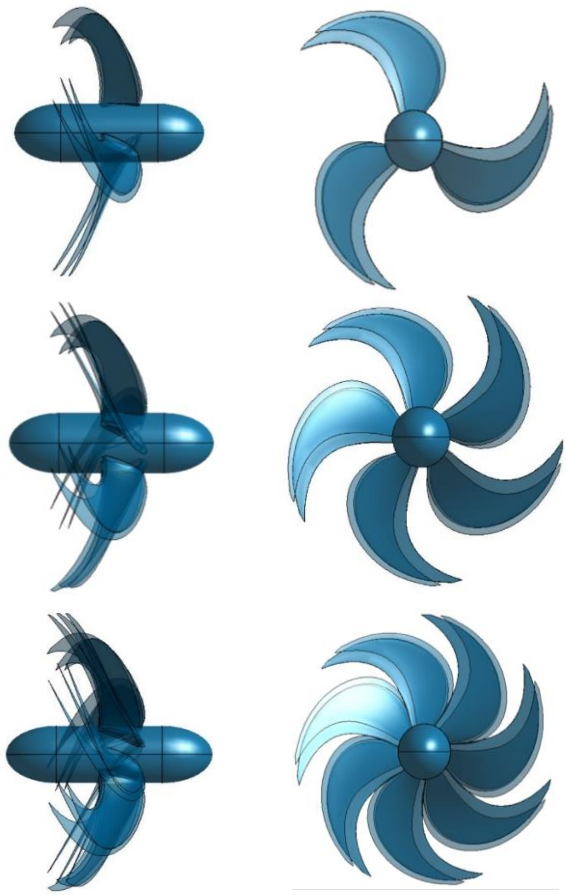
۸- تحلیل هیدرواکوستیکی پروانه‌های اسکیو بالا در گام-های مختلف هندسی

در این بخش هندسه پروانه های اسکیو بالا در گام های هندسی مختلف و همچنین با تعداد پره های مختلف تولید شده است و نتایج ضرایب هیدرودینامیکی و نویز هیدروآکوستیکی تحت شرایط جریانی مختلف استخراج شده است. در جدول۲ مشخصات هندسی پروانه اسکیو بالا ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی پروانه اسکیو بالا

نوع پروانه	اسکیو بالا
قطر پروانه (متر)	۰/۳۰۴۸
نسبت گام به قطر	۰/۷ ، ۰/۹ ، ۱/۱
تعداد پره ها	۲ تا ۷ پره

جهت بررسی اثر تغییر گام بر نویز انتشاری، از پروانه HSP با ۵،۳ و ۷ پره، در گامهای ۰/۷ ، ۰/۹ و ۱/۱ شده است.(شکل۱۲)



شکل ۱۲- هندسه پروانه های اسکیو بالا ۳، ۵ و ۷ پره با گام های هندسی مختلف

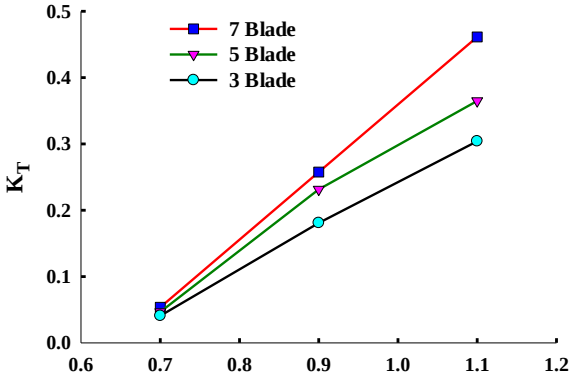
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

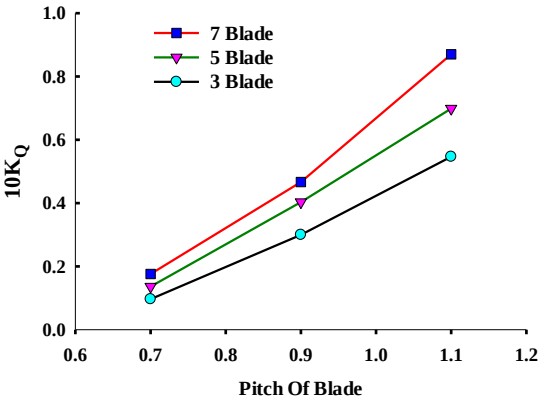
دامنه حل در این حالت برای پروانه های اسکیو بالا نیز مانند بخش قبل متشکل از دو استوانه، یکی چرخان و دیگری ثابت است. برای ابعاد دامنه محاسباتی نیز قطر استوانه خارجی ۱۰ برابر قطر پروانه و طول آن ۲۰ برابر قطر پروانه می باشد بگونه ای که دیواره های جانبی بر میدان حل حول پروانه بی تاثیر می باشند. برای محاسبه دقیق تنش برشی در لایه مرزی از ۱۰ لایه استفاده شده است و ضخامت اولین لایه ۰/۱ میلی متر می باشد. حل به صورت گذرا با بازه زمانی ۰/۰۰۱ انجام شده که در هر بازه زمانی ۱۵ مرتبه حل تکرار می‌شود. مدل اغتشاشی جهت شبیه سازی جریان مدل DES می‌باشد. جهت بررسی نویز انتشاری تمامی تحلیل‌های این بخش در ضریب پیشروی ۰/۷ و در سرعت ۳ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۸۴۳ دور بر دقیقه انجام شده است.

۸-۱- ضرایب هیدرودینامیکی و نتایج عددی پروانه اسکیو بالا

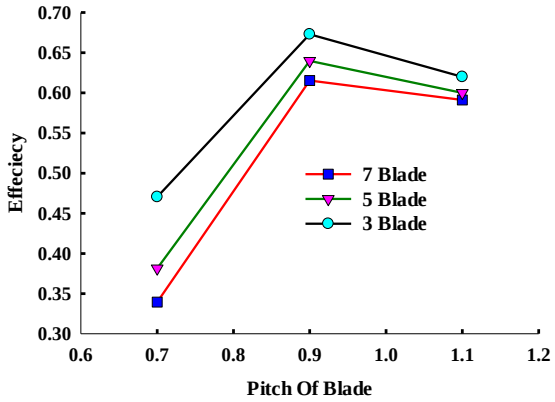
ضرایب پیشروی، ممنتوم و بازدهی پروانه HSP (۵،۳ و ۷ پره)در گام‌های مختلف مطابق شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ می‌باشد. ضرایب پیشروی و ممنتوم با افزایش گام افزایش می‌یابد اما ضریب بازدهی از گام ۰/۷ تا ۰/۹ افزایش و سپس کاهش یافته است .



شکل۱۳- نمودار ضریب تراست بر حسب گام هندسی در پروانه با تعداد پره های مختلف

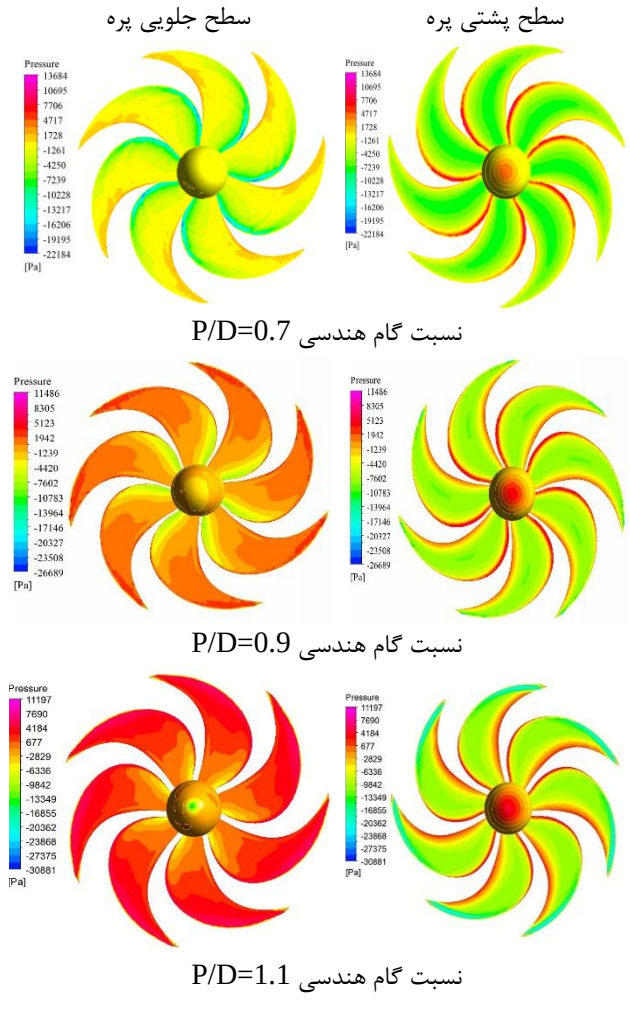


شکل۱۴- نمودار ضریب گشتاور بر حسب گام هندسی در پروانه با تعداد پره های مختلف



شکل۱۵- نمودار راندمان هیدرودینامیکی بر حسب گام هندسی در پروانه با تعداد پره های مختلف

با بررسی کانتور فشار بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه های ۷، ۵ و ۳ پره با گامهای مختلف مشاهده می‌شود با افزایش گام هندسی فشار هم افزایش می‌یابد. شکل ۱۶ توزیع فشار بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه ۷ پره را نشان می دهد. این افزایش فشار بویژه در سطح جلویی پره تاثیرگذار بوده و کاملاً مشهود می باشد.

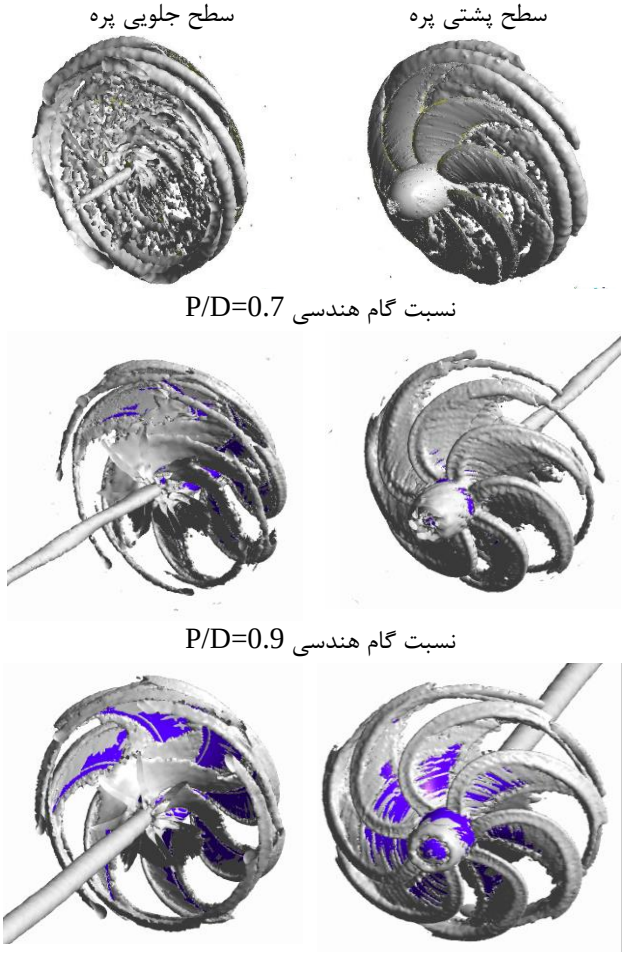


شکل۱۶- کانتور فشار بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

ورتکس‌های تولیدی شده در قسمتهای مختلف پروانه اسکیو بالا ۷ پره که شامل گردابه های تولید شده توسط لبه پره‌ها،توپی و لبه فوقانی پروانه می‌باشد به صورت واضح در شکل۱۷ که به ترتیب وجه جلو و پشت پروانه در گام های مختلف قابل مشاهده می‌باشد.با دقت در سهم قسمتهای مختلف پروانه در گامهای مختلف متوجه می‌شویم که با افزایش گام سهم گردابه‌های تولید شده توسط لبه پره‌ها و لبه فوقانی پره‌ها کاهش می‌یابد و در عوض گردابه‌های تولید شده توسط توپی پروانه رو به افزایش است .



شکل۱۷- گردابه های تولید شده از پروانه۷ پره در گامهای مختلف

گردابه‌های تولید شده توسط توپی پروانه در شکل۱۸ قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش گام طول ورتکس هاب بشدت افزایش یافته است.





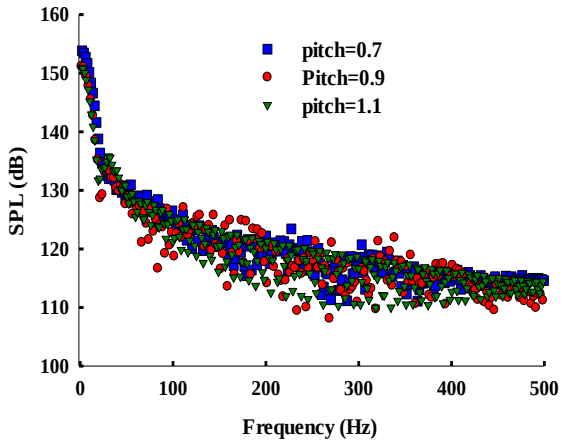
نسبت گام هندسی P/D=1.1

شکل۱۸- گردابه های تولید شده از توپی پروانه در گامهای مختلف

۸-۲- تحلیل نویز پروانه ۷ پره با گام های مختلف

در این بخش نویز هیدروفون‌ها در دو راستای محوری و عمود بر جهت جریان استخراج شده و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌گردد میزان تغییرات سطح نویز انتشاری به واسطه تغییر گام هندسی پروانه در راستای محوری کم اما در راستای عمود بر جهت جریان قابل توجه است. هیدروفون‌هایی که در راستای هاب پروانه هفت پره مستقر هستند را در فواصل مختلف در راستای جریان در شکل ۱۹ بررسی شده اند. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر گام تغییرات نویز انتشاری در تمامی فواصل و زاویه‌ها قابل مشاهده است. در فرکانس‌های پایین میزان تغییرات سطح فشار صوت کم بوده و با افزایش میزان فرکانس میزان نوسانات در هر گام زمانی افزایش یافته و در مقایسه با هم در راستای محوری با افزایش گام میزان تغییرات سطح فشار صوت افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. اما بیشتر تغییرات مربوط به گام ۰/۹ می باشد. تغییرات منحنی بر حسب فرکانس برای هر گام به تعداد پره ها قابل مشاهده است.

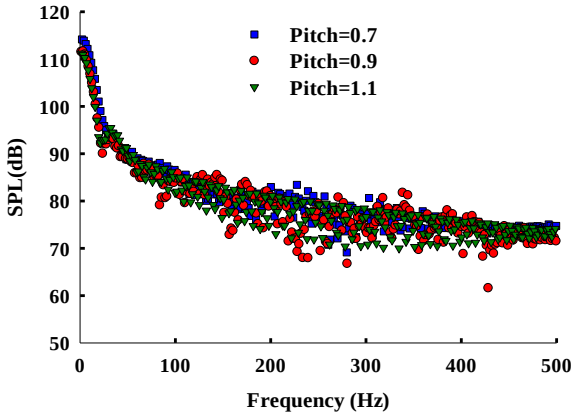
در گام هندسی ۱/۱ پروانه دارای توازن گردابه های تولید شده در قسمتهای مختلف و گردابه هاب پروانه پیوسته و یکنواخت می باشد و گردابه در گام هندسی ۰/۷ نویز خیلی سریع اضمحلال یافته است، اما در گام هندسی ۰/۹ گردابه هاب دارای پیچش، چرخش و تغییر شکل بوده و همین امر سبب اختلاف نسبت به سایر حالات است.



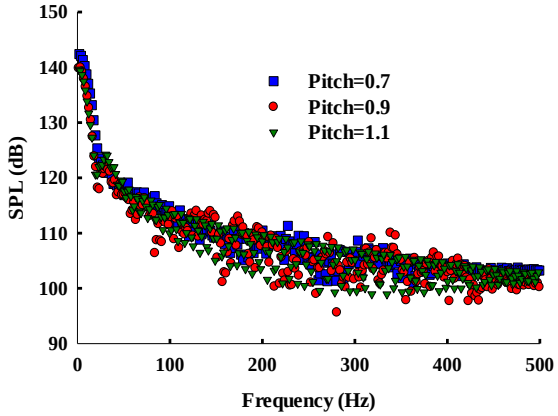
7 Blade $\theta=0^0$ d=R

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]



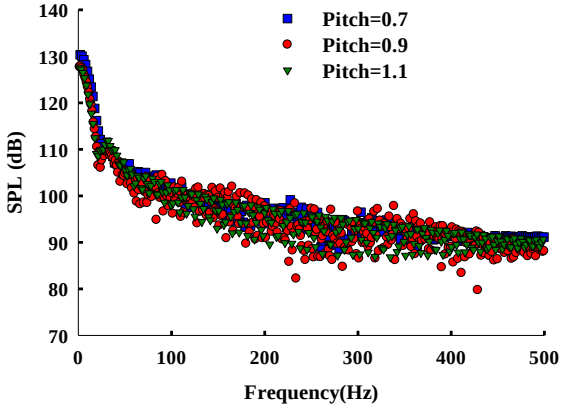
7 Blade $\theta=0^0$ d=20R



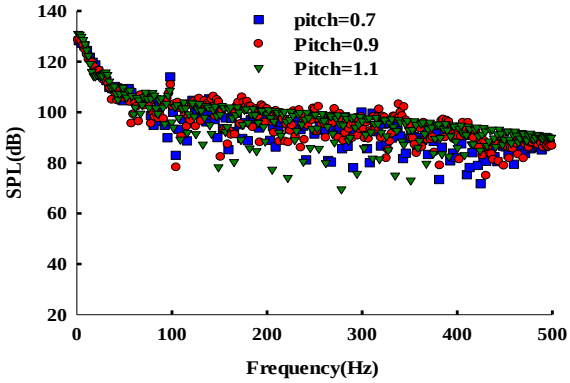
7 Blade $\theta=0^0$ d=4R

شکل۱۹- نمودارهای نویز دریافتی در راستای محور

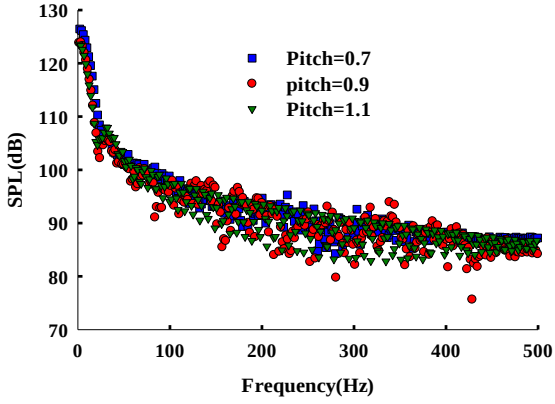
در ادامه به بررسی هیدروفون‌های مستقر در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه پرداخته شده است. مطابق شکل‌های ۲۰ و ۲۱ در نمودار سطح فشار صوت در راستای عمود بر جهت جریان با افزایش فاصله از منبع صوت میزان نوسانات سطح فشار صوت افزیش یافته بگونه ای که در فرکانس های بالا این میزان نوسان تا ۴۰ دسیبل نیز مشاهده می شود. عمده این نویز تحت تاثیر بارگذاری بر روی پروانه می باشد برخلاف نویز در راستای محور که تابعی از ضخامت پره پروانه می باشد، لذا در پروانه های با ضخامت کم تغییرات در راستای شعاعی یا همان عمود بر راستای محوری بسیار بیشتر از راستای محوری است. داده های مربوط به زاویه ۴۵ درجه نیز دارای مقادیری مابین راستای محوری و شعاعی هستند.



7 Blade $\theta=0^0$ d=8R



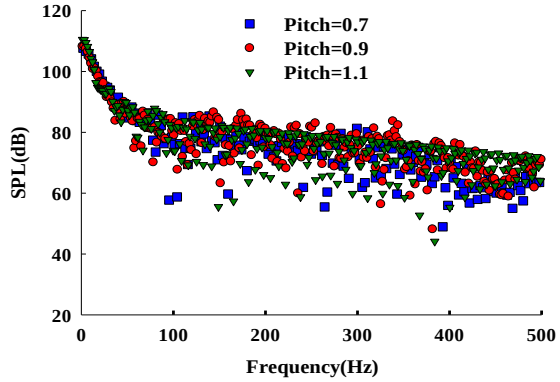
7 Blade $\theta=90^0$ d=2R



7 Blade $\theta=0^0$ d=10R

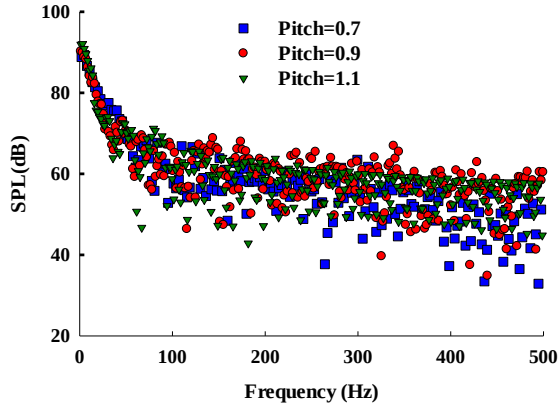
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

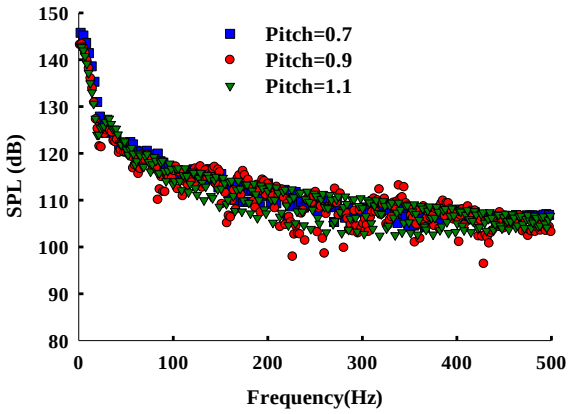


7 Blade $\theta=90^0$ d=4R

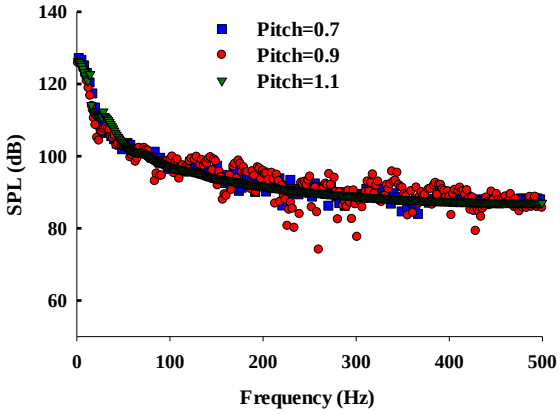
شکل۲۰- نمودارهای نویز دریافتی در راستای محور عمود بر جهت جریان



7 Blade $\theta=90^0$ d=۸R



7 Blade $\theta=45^0$ d=R



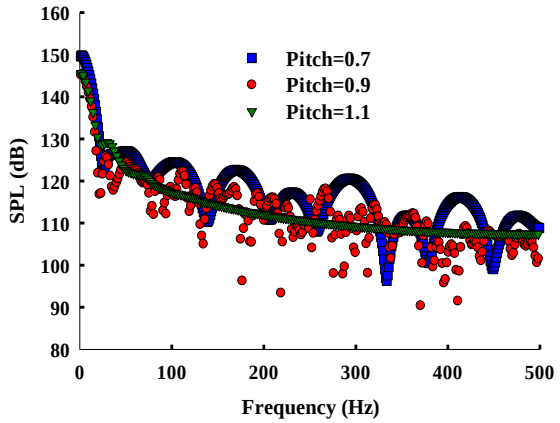
7 Blade $\theta=45^0$ d=4R

شکل۲۱- نمودارهای نویز دریافتی در زاویه ۴۵ درجه

در نمودار سطح فشار صوت در راستای ۴۵ درجه با افزایش میزان گام هندسی میزان نوسانات سطح فشار صوت در فرکانس های مختلف حذف شده و پراکندگی داده ها حول مقدار ثابتی تغییر می‌کند.

۸-۳- تحلیل نویز پروانه پنج پره با گام های مختلف

در پروانه پنج پره نیز مطابق شکل ۲۲ با افزایش گام مهندسی تغییرات نویز در راستای محوری حدود ۵ تا ۱۰ دسیبل است. در هر گام هندسی پیک های مربوطه به تعداد پره های پروانه به وضوح قابل مشاهده هستند اما این موضوع در گام ۱/۱ کمتر مشاهده می شود که پایداری دنباله جریان در پایین دست می تواند علت آن باشد. نکته ای که قابل ذکر است کاهش میزان نوسانات سطح نویز انتشاری در فرکانس های مختلف در گام هندسی ۱/۱ می باشد. یعنی در واقع افزایش گام هندسی سبب شده است که قله های نمودار سطح فشار صوت کاهش یافته و حذف شود.



5Blade $\theta=0^0$ d=2R

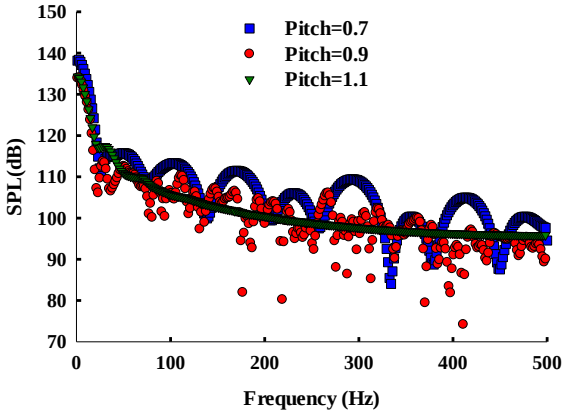
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

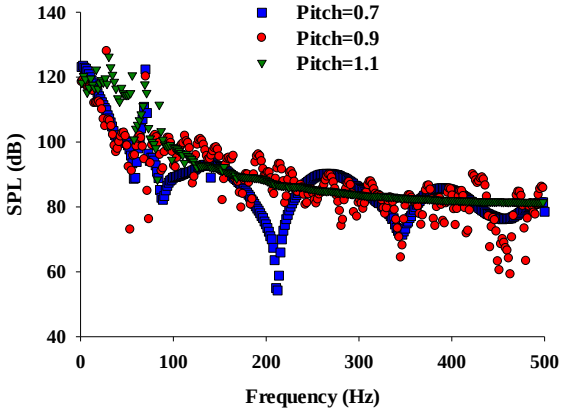
5Blade $\theta=0^0$ d=20R

شکل۲۲- نمودارهای نویز دریافتی پروانه ۵ پره ای در راستای محور X

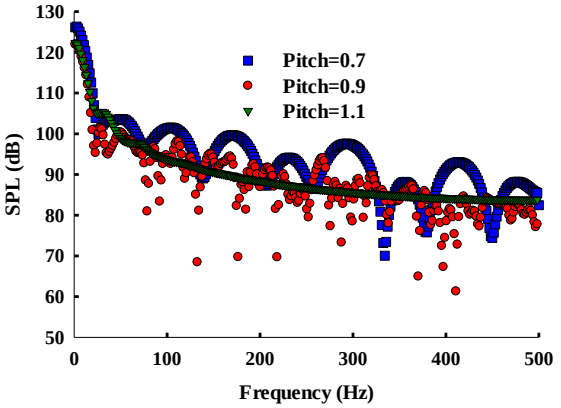
در شکل های ۲۳ و ۲۴ سطح نویز انتشاری دریافت شده توسط هیدروفون ها در راستای عمود و ۴۵ درجه با جریان سیال ورودی در گام های هندسی مختلف پره نشان داده شده است. در مقایسه موقعیت های مکانی مساوی از منبع نویز یعنی پروانه در سه راستای مورد بررسی مشاهده می گردد که سطح نویز انتشاری در راستای محوری جریان سیال حدود ۱۵ الی ۳۰ دسیبل بیشتر از راستای عمود بر جریان و ۵ دسیبل بیشتر از راستای ۴۵ درجه می باشد.



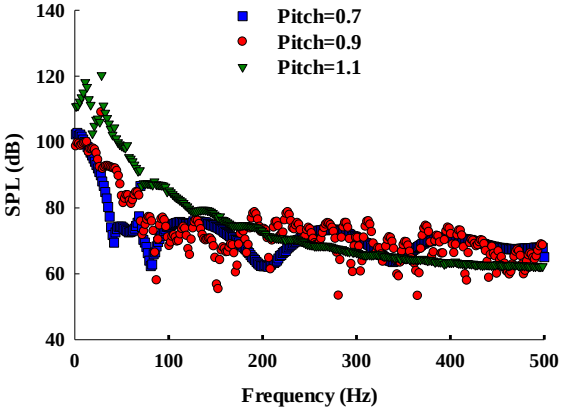
5Blade $\theta=0^0$ d=4R



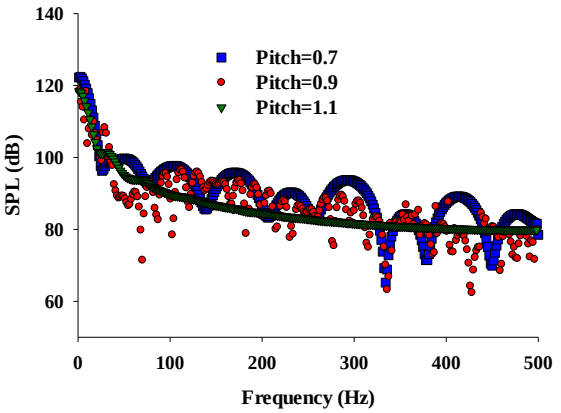
5Blade $\theta=90^0$ d=2R



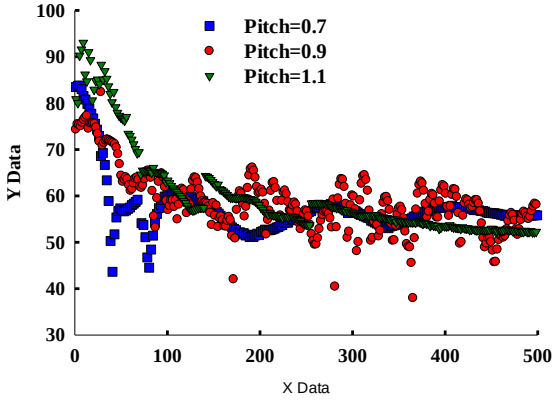
5Blade $\theta=0^0$ d=8R

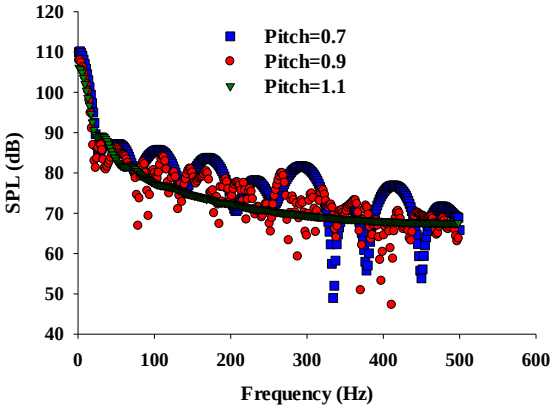


5Blade $\theta=90^0$ d=4R



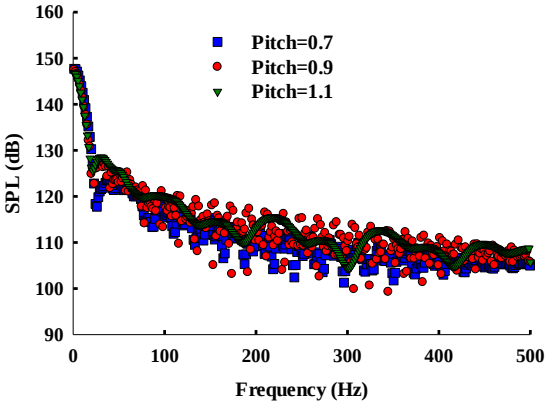
5Blade $\theta=0^0$ d=10R



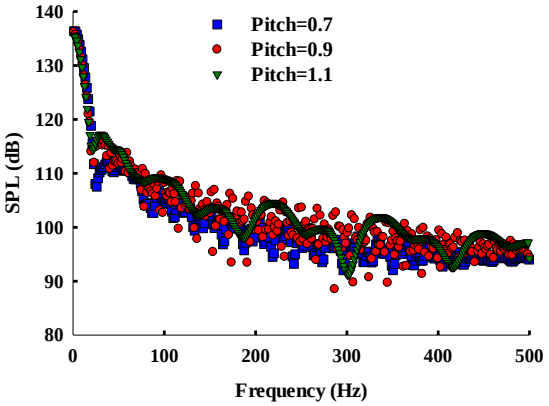


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

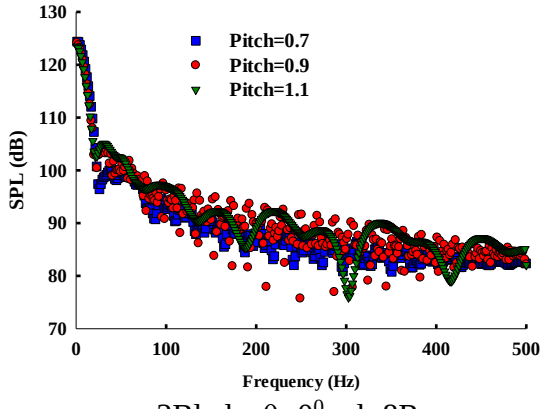
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]



3Blade $\theta=0^0$ d=2R



3Blade $\theta=0^0$ d=4R

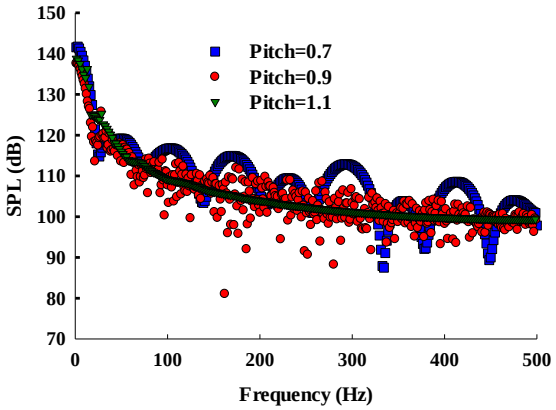


3Blade $\theta=0^0$ d=8R

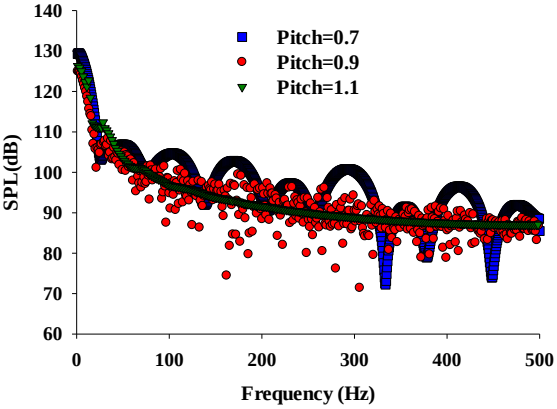
در پروانه ۳ پره بر حسب گام در گام های مختلف بسیار متفاوت از هم می‌باشند. در این حالت بیشترین میزان نوسانات در سطح فشار صوت در نسبت گام ۰/۹ می باشد اما دامنه تغییرات در نسبت گام ۱/۱ بسیار شدید است و در برخی فرکانس ها به سمت بی نظمی می رود. دلیل وقوع این بی نظمی کاهش تعداد پره ها می باشد که سبب تغییرات شدید میدان جریان اطراف و پایین دست پروانه می شود.

5Blade $\theta=90^0$ d=8R

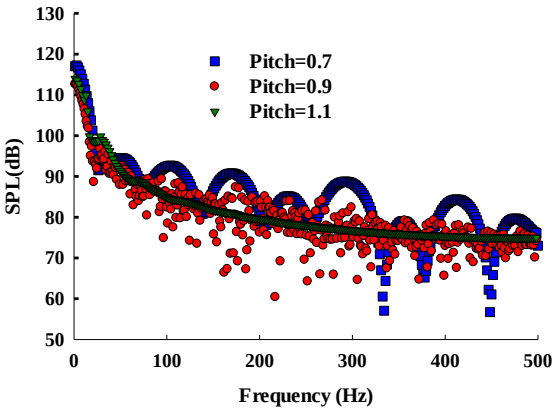
شکل۲۳- نمودارهای نویز دریافتی در زاویه ۹۰ درجه



5Blade $\theta=45^0$ d=2R



5Blade $\theta=45^0$ d=4R



5Blade $\theta=45^0$ d=8R

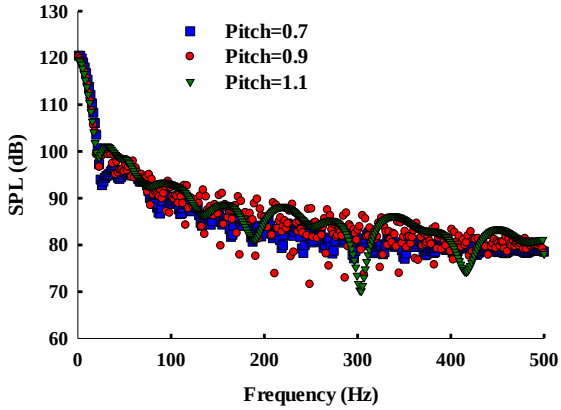
شکل۲۴- نویز انتشاری از پروانه ۵ پره در فاصله 4D و زاویه ۴۵ درجه در گامهای مختلف

۸-۴- تحلیل نویز پروانه سه پره با گام های مختلف

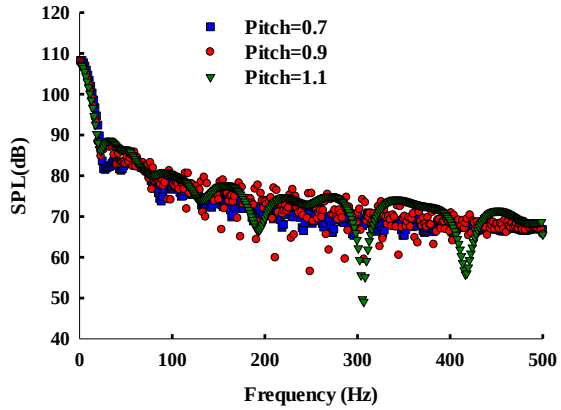
در شکل ۲۵ نمودار سطح نویز انتشاری بر حسب فرکانس برای پروانه ۳ پره در گام های هندسی مختلف و در راستای محور جریان نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، روند تغییرات سطح فشار صوت

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]



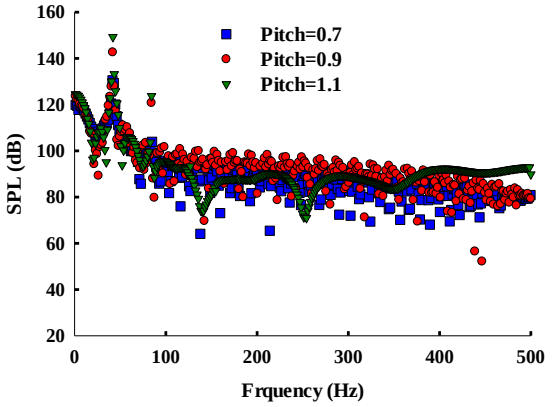
3Blade $\theta=0^0$ d=10R



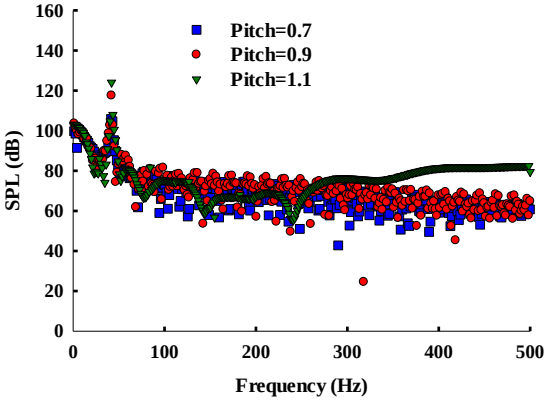
3Blade $\theta=0^0$ d=20R

شکل۲۵- نویز دریافتی از پروانه سه پره در فاصله 10D

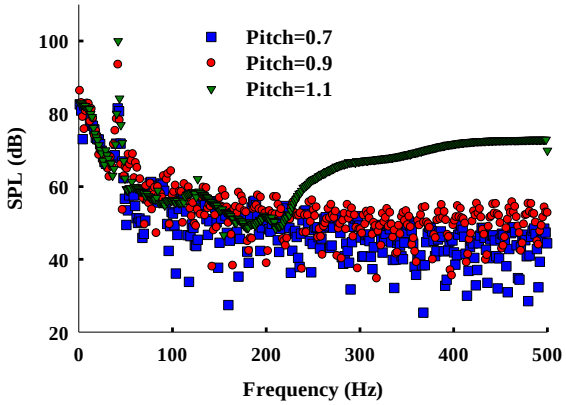
نویز دریافتی توسط هیدروفون‌هایی که در راستای عمود بر جهت جریان قرار دارند با افزایش فرکانس دچار نوسانات بیشتری می شوند(شکل۲۶). شکل۲۷ نمودار نویز برای پروانه ۳ پره در راستای ۴۵ درجه را نشان می‌دهد.



3Blade $\theta=90^0$ d=2R

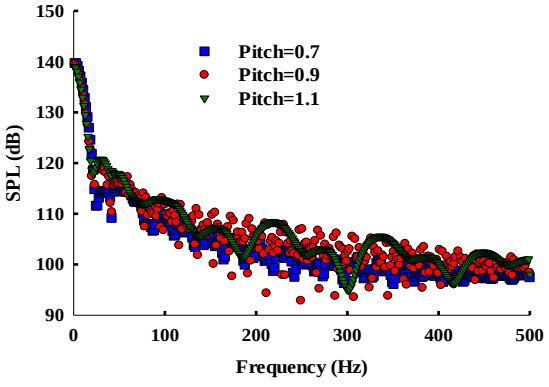


3Blade $\theta=90^0$ d=4R



3Blade $\theta=90^0$ d=8R

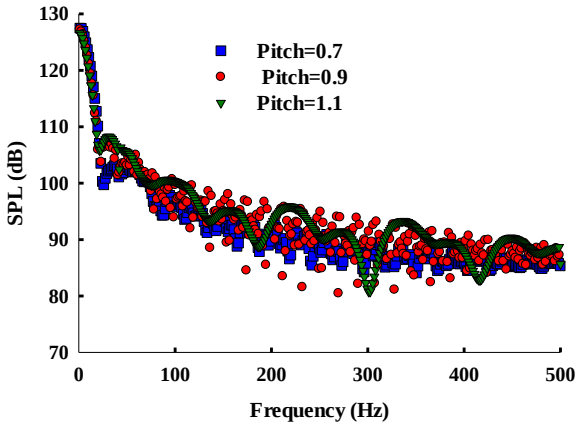
شکل۲۶- نمودار های نویز در فواصل مختلف در راستای محور Y



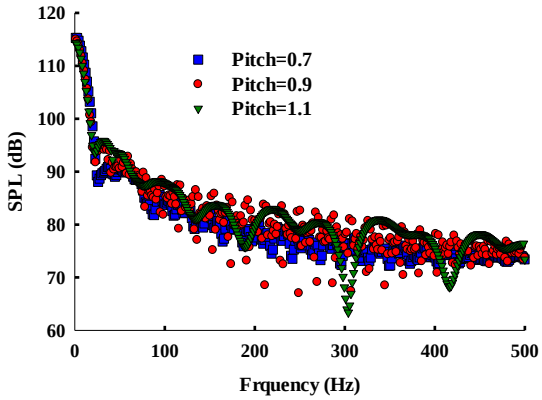
3Blade $\theta=45^0$ d=2R

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]



3Blade θ=45^0 d=4R



3Blade θ=45^0 d=8R

شکل۲۷- نمودار نویز دریافتی پروانه سه پره در زاویه ۴۵ درجه

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه پروانه‌های مورد استفاده در شناورهای زیرسطحی غالباً از نوع پروانه های اسکیو بالا می باشند در این مقاله از پروانه استاندارد SEIUN-MARU (HSP) طراحی شده توسط ITTC جهت بررسی تاثیر پارامتر گام هندسی پروانه استفاده شده است. جهت شبیه سازی عددی هیدروآکوستیکی پروانه از مدل اغتشاشی DES برای مدلسازی جریال سیال بهمراه مدل Ffowcs-Williams & Hawkings بر اساس معادلات لایت هیل استفاده شده است. چیدمانی از هیدروفون‌ها در میدان جریان پایین دست پروانه که محل ریزش گردابه‌ها و دنباله‌ها می باشد در راستاهای محوری، عمودی و راستای ۴۵ درجه قرار داده شده است که در واقع دریافت کننده‌های سطح فشار صوت (SPL) می باشند. نتایج بدست آمده بطور خلاصه به شرح زیر است:

- ضریب تراست با افزایش گام و افزایش تعداد پره‌ها روند صعودی دارد این روند به ترتیب در هر یک از گام های ۰/۹ و۱/۱ اثر افزایش تعداد پره را بیشتر نمایان می‌کند.
- با تغییر گام هندسی، در فرکانس‌های پایین میزان تغییرات سطح فشار صوت کم بوده و با افزایش میزان فرکانس میزان نوسانات در هر گام زمانی افزایش یافته و در مقایسه با هم در راستای محوری با افزایش گام میزان تغییرات سطح فشار صوت افزایش یافته و سپس کاهش می یابد.
- سطح فشار صوت در راستای عمود بر جهت جریان با افزایش فاصله از منبع صوت میزان نوسانات سطح فشار صوت افزیش یافته بگونه ای که در فرکانس های بالا این میزان نوسان تا ۴۰ دسیبل نیز مشاهده می‌شود. عمده این نویز تحت تاثیر بارگذاری بر روی پروانه می باشد برخلاف نویز در راستای محور که تابعی از ضخامت پره پروانه می باشد.
- در هر گام هندسی پیک های مربوطه به تعداد پره های پروانه به وضوح قابل مشاهده هستند اما این موضوع در گام ۱/۱ کمتر مشاهده می شود که پایداری دنباله جریان در پایین دست می تواند علت آن باشد. نکته ای که قابل ذکر است کاهش میزان نوسانات سطح نویز انتشاری در فرکانس های مختلف در گام هندسی ۱/۱ می باشد. یعنی در واقع افزایش گام هندسی سبب شده است که قله های نمودار سطح فشار صوت کاهش یافته و حذف شود.
- در مقایسه سطح نویز انتشاری در سه راستای جریان، عمود بر جهت جریان و ۴۵ درجه بیشترین میزان سطح فشار صوت مربوط به راستای جریان و کمترین آن مربوط به راستای عمود بر جهت جریان می باشد.

کلید واژگان

1-Detached Eddy Simulation (DES)
2-Large Eddy Simulation (LES)
3-Monopole
4-Dipole
5-Quadrupoles
6-Green Function
7-Velocity inlet
8-Pressure outlet
9-Symmetry
10-Interface
11-Moving wall
12-No slip condition
13-Structure grid
14-Growth rate
15-Reference Pressure Acoustic
16-Thrust coefficient
17-Torque coefficient
18-Hydrodynamic performance

فهرست علائم

قطر پروانه[m]	D
فاصله هیدروفون تا پروانه[m]	d

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

نیروهای حجمی[N]	f
ضریب پیشروی[-]	J
ضریب گشتاور[-]	K_Q
ضریب تراست[-]	K_T
سرعت دورانی[rps]	n
فشار استاتیکی[Pa]	P
نسبت گام به قطر پروانه[-]	P/D
گشتاور[N.m]	Q
شعاع پروانه[m]	R
سطح فشار صوت[db]	SPL
تراست[N]	T
سرعت[m/s]	V
راندمان هیدرودینامیکی[-]	η
چگالی[kg/m^3]	ρ
ویسکوزیته دینامیکی[Pa.sec]	μ
زاویه با راستای جریان سیال[deg]	θ

۱۰- مراجع

[1] H. Seol, B. Jung, J.-C. Suh, S. Lee, (2002), *Prediction of non-cavitating underwater propeller noise*, Journal of Sound and Vibration, 257: 131-156.

[2] C. Park, H. Seol, K. Kim, and W. Seong, "A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel ", Ocean Engineering, vol. 36, no. 9, pp. 754-762, 2009.

[3] E. Korkut and M. Atlar, "*An Experimental Study into the effect of foul release coating on the efficiency, noise and cavitation characteristics of a propeller*," in First International Symposium on Marine Propulsors, 2009, pp. 285-293: Trondheim.

[4] L. Jeung-Hoon, H. Jae-Moon, P. Hyung-Gil, and S. Jong-Soo, "*Application of signal processing techniques to the detection of tip vortex cavitation noise in marine propeller*," Journal of Hydrodynamics, Ser. B, vol. 25, no. 3, pp. 440-449, 2013.

[5] B. Aktas, M. Atlar, S. Turkmen, E. Korkut, and P. Fitzsimmons, "*Systematic cavitation tunnel tests of a Propeller in uniform and inclined flow conditions as part of a round robin test campaign*," Ocean Engineering, vol. 120, pp. 136. 17,10

[6] S. Kim, Y. Niu, Y.-J. Kim, (2013), *Computational aero-acoustic modeling of open fan and comparison of predicted and experimental noise fields*, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Vol. 246, Institute of Noise Control Engineering, pp. 970-977.

[7] J.-S. Jang, H.-T. Kim, W.-H. Joo, (2014), *Numerical study on non-cavitating noise of marine propeller*, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Vol. 249, Institute of Noise Control Engineering, pp. 3017-3022.

[8] S. Zeng, X. Du, (2015), *Numerical simulation and analysis of non-cavitation noise line-spectrum frequency of underwater counter-rotation propeller*, International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, Atlantis Press.

[9] B. Aktas, M. Atlar, S. Turkmen, W. Shi, R. Sampson, E. Korkut, P. Fitzsimmons, (2016), *Propeller cavitation noise investigations of a research vessel using medium size cavitation tunnel tests and full-scale trials*, Ocean Engineering, 120: 122-135.

[10] A. Brooker, V. Humphrey, (2016), *Measurement of radiated underwater noise from a small research vessel in shallow water*, Ocean Engineering, 120: 182-189.

[11] T. Kim, J. Jeon, S. Chu, S. Kim, W. Joo, (2016), *Numerical and experimental predictions of underwater propeller radiated noise*, Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA, Vol. 28, ASA, pp. 070004.

[12] H. Haimov, V. Gallego, E. Molinelli, B. Trujillo, (2016), *Propeller acoustic measurements in atmospheric towing tank*, Ocean Engineering, 120: 190-201.

[13] G. Tani, D. Villa, S. Gaggero, M. Viviani, P. Ausonio, P. Travi, G. Bizzarri, F. Serra, (2017), *Experimental investigation of pressure pulses and radiated noise for two alternative designs of the propeller of a high-speed craft*, Ocean Engineering, 132: 45-69.

[14] J. Park, W. Seong, (2017), *Novel scaling law for estimating propeller tip vortex cavitation noise from model experiment*, Journal of Hydrodynamics, 29: 962-971.

[15] B. Aktas, M. Atlar, P. Fitzsimmons, W. Shi, (2018), *An advanced joint time-frequency analysis procedure to study cavitation-induced noise by using standard series propeller data*, Ocean Engineering, 170: 329-350.

[16] M.J. Lighthill, (1952), *On sound generated aerodynamically. I. General theory*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 211: 564-587.

[17] M.C. Özden, A.Y. Gürkan, Y.A. Özden, T.G. Canyurt, E. Korkut, (2016), *Underwater radiated noise prediction for a submarine propeller in different flow conditions*, Ocean Engineering, 126: 488-500.

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]

[18] Y. Wei, Y. Shen, S. Jin, P. Hu, R. Lan, S. Zhuang, D. Liu, (2016), *Scattering effect of submarine hull on propeller non-cavitation noise*, Journal of Sound and Vibration, 370: 319-335.

[19] S. Sezen, A. Dogrul, S. Bal, (2016), *Investigation of marine propeller noise for steady and transient flow*, PROCEEDINGS BOOK, 149.

[20] M.R. Naseer, E. Uddin, K. Rana, S. Zahir, (2017), *Computational validation of hydrodynamic and hydro-acoustic performance of marine propeller*, 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), IEEE, pp. 569-574.

[21] H. Ghassemi, M. Gorji, J. Mohammadi, (2018), *Effect of tip rake angle on the hydrodynamic characteristics and sound pressure level around the marine propeller*, Ships and Offshore Structures, 13: 759-768.

[22] M.S.U. Khalid, I. Akhtar, B. Wu, (2019), *Quantification of flow noise produced by an oscillating hydrofoil*, Ocean Engineering, 171: 377-390.

[23] B. Zhang, Y. Xiang, P. He, G.-j. Zhang, (2019), *Study on prediction methods and characteristics of ship underwater radiated noise within full frequency*, Ocean Engineering, 174: 61-70.

[24] Jie Dang, Do Ligtelijn, (2019) "*Development of Tunnel Thruster Series Propellers for Low Noise and Vibration*" Sixth International Symposium on Marine Propulsors.

[25] Vladimir Krasilnikov, Luca Savio, Kourosh Koushan, Mario Felli, Moustafa Abdel-Maksoud, (2022), "*Towards Reliable Prediction of Propeller Noise: Challenges and Findings of the Project ProNoVi*", 7th International Symposium of Marine Propulsors.

[26] Jeong-yong Park, Hyoungsuk Lee, Sooyeong Park, Hanshin Seol, Hongseok Jeong, (2022) "*Case study on the propeller design for the commercial vessel in consideration of underwater radiated noise and propulsive efficiency*", 7th International Symposium of Marine Propulsors.

[27] M. Kaltenbacher, (2018), *Computational Acoustics*, Springer.

[28] R. Kotapati-Apparao, K.D. Squires, J.R. Forsythe, (2004), *Prediction of the Flow over an Airfoil at Maximum Lift*, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.

[29] R.B. Kotapati-Apparao, K.D. Squires, J.R. Forsythe, (2003), *Prediction of a prolate spheroid undergoing apitchup maneuver*, IN AIAA PAPER 2003-0269 41 ST AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, Citeseer.

[30] Ehsan Yari, Hassan Ghassemi, (2013), *Numerical analysis of sheet cavitation on marine propellers, considering the effect of cross flow*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5: 546-558.

[31] H. Seol, J.-C. Suh, S. Lee, (2005), *Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise*, Journal of Sound and Vibration, 288: 345-360.

[32] Roache, P. J., (1997) Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual review of fluid Mechanics, 29, 123-160.

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

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.10]