

Numerical Investigation of Tonal noise Directivity of the INSEAN E779A marine Propeller: Enhancing Prediction with High-Density Hydrophone Arrays

Mohammad hosein Faraji, Hassan Lakzayi, Zeinab Pouransari* 

Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History

Received: October 25, 2025
Revised: November 10, 2025
Accepted: November 13, 2025
ePublished: December 24, 2025

ABSTRACT

Underwater acoustic pollution generated by ship propellers is a significant environmental concern, making accurate prediction during the design phase crucial for mitigating negative impacts. This study investigates the hydroacoustic performance of the four-bladed INSEAN E779A marine propeller under non-cavitating conditions using a hybrid computational fluid dynamics (CFD) model. This approach combines unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equations with the Ffowcs Williams–Hawkings (FW-H) acoustic analogy to simulate turbulent flow and subsequently predict the far-field noise propagation. The propeller operates at a constant rotational speed of $n=720$ RPM and an advance speed of $V=1.3$ m/s, resulting in an advance coefficient of $J=0.49$. To accurately map the sound pressure level (SPL), a hydrophone array comprising 144 receivers was strategically positioned within the computational domain. Results indicate that the near-field hydrophones record a higher SPL due to severe turbulence, while these values decrease in the far-field due to increased distance and turbulent dissipation. Spectral analysis based on 12 different angles revealed that discrepancies at the second blade-passing frequency harmonic ($k=2$) are relatively minor. However, at the third and fourth harmonics, angular divergence increases, with some angles showing maximum deviations of up to 6 decibels above or below the mean value. This research establishes a robust foundation for noise model validation and the development of technologies for optimizing marine propulsion systems to reduce underwater acoustic pollution by providing rich data on the spatial distribution of acoustic propagation.

Keywords: The marine propeller (INSEAN E779A), Hydroacoustic, Ffowcs Williams-Hawking (FW-H) analogy, High-density hydrophone arrays.

How to cite this article

Faraji M.H, Lakzayi H, Pouransari Z, Numerical Investigation of Tonal noise Directivity of the INSEAN E779A marine Propeller: Enhancing Prediction with High-Density Hydrophone Arrays. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(01):1-14.

*Corresponding author's email: pouransari@iust.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-5380-0285



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی عددی جهت‌مندی نویز تونال پروانه دریایی (INSEAN E779A) با بهره‌گیری از آرایه‌های هیدروفونی با چگالی بالا

محمد حسین فرجی، حسن لکزیایی، زینب پورانصاری*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	آلودگی صوتی زیر آب ناشی از پروانه‌های کشتی‌ها یک نگرانی زیست‌محیطی مهم است که پیش‌بینی دقیق آن در مرحله طراحی برای کاهش اثرات منفی ضروری است. در این مطالعه، عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه دریایی چهارپره INSEAN E779A در شرایط عدم حضور کابیناسیون با استفاده از یک مدل ترکیبی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. این رویکرد، معادلات ناویراستوکس گذرای میانگین‌گیری شده رینولدز (URANS) را با آنالوژی آکوستیکی فاکس ویلیامز-هاوکنگز (FW-H)، ترکیب می‌کند تا پس از شبیه‌سازی جریان آشفته، انتشار نویز میدان دور را پیش‌بینی کند. پروانه با سرعت دورانی ثابت $n = 720$ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی $V = 1/3$ متر بر ثانیه کار می‌کند که منجر به ضریب پیش‌روی $J = 0.49$ می‌شود. برای نقشه‌برداری دقیق از سطح فشار صوتی (SPL)، یک آرایه هیدروفونی شامل ۱۴۴ گیرنده در حوزه محاسباتی جانمایی شدند. نتایج نشان داد که هیدروفون‌های میدان نزدیک به دلیل آشفتگی شدید، سطح فشار صوتی بالاتری را ثبت می‌کنند، در حالی که این مقادیر در میدان دور به دلیل افزایش فاصله و تضعیف آشفتگی کاهش می‌یابند. تحلیل طیفی بر اساس ۱۲ زاویه متفاوت نشان داد که اختلافات در هارمونیک دوم فرکانس عبور تیغه ($k=2$) نسبتاً اندک است. با این حال، در هارمونیک‌های سوم و چهارم، واگرایی زاویه‌ای افزایش می‌یابد و برخی زوایا مقادیر بالاتر یا پایین‌تر از مقدار میانگین با مقدار حداکثر ۶ دسی‌بل را نشان می‌دهند. این تحقیق با فراهم آوردن داده‌های غنی درباره توزیع مکانی انتشار آکوستیکی، پایه‌ای محکم برای اعتبارسنجی مدل‌های نویز و توسعه فناوری‌هایی جهت بهینه‌سازی پیش‌رانه‌های دریایی و کاهش آلودگی صوتی زیر آب ایجاد می‌کند.

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲
آرائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها: پروانه دریایی (INSEAN E779A)، هیدروآکوستیک، آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکنگز (FW-H)، آرایه‌های هیدروفونی با چگالی بالا.

نحوه ارجاع به این مقاله

حسین فرجی محمد، لکزیایی حسن، پورانصاری زینب، بررسی عددی جهت‌مندی نویز تونال پروانه دریایی (INSEAN E779A) با بهره‌گیری از آرایه‌های هیدروفونی با چگالی بالا، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۴-۱-۱۴۰۴:۲۶(۰۱)

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pouransari@iust.ac.ir

*شناسه اریکد نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-5380-0285



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

امضای صوتی پروانه‌های دریایی یکی از دغدغه‌های مهم در علوم مهندسی دریایی است که به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد شناورها و اکوسیستم‌های دریایی تأثیر می‌گذارد. نویز پروانه، ناشی از جدایش گردابه‌ها، نوسانات فشار آشفته و جریان ناپایدار پیرامون پره‌های چرخان، گونه‌های دریایی - به‌ویژه پستاندارانی که برای ارتباط و ناوبری به صدا وابسته‌اند - را دچار مشکل می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که این نویز می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی چشمگیری داشته باشد و همین امر سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) را بر آن داشته است تا پیشرفت در سامانه‌های پیش‌رانش کم‌صدا را مورد توجه و تأکید قرار دهد [۱].

منشأ نویز تولیدشده توسط پروانه، بر اساس یافته‌های پیشین [۲]، از چهار مکانیزم اصلی سرچشمه می‌گیرد: ۱- جابه‌جایی آب توسط پره‌های چرخان پروانه، که به‌عنوان نویز تک‌قطبی یا نویز ضخامت شناخته می‌شود و بیشترین شدت آن در صفحه دوران پروانه رخ می‌دهد؛ ۲- اختلاف فشار بین سطح جلویی و پشتی پره‌های در حال چرخش، که نویز دوقطبی یا نویز بارگذاری نامیده می‌شود و بیشترین شدت آن در جلوی هاب پروانه مشاهده می‌شود؛ ۳- تغییر در حجم حفره‌هایی که روی پره‌ها تشکیل می‌شوند؛ ۴- پدیده فروپاشی این حفره‌ها. در شرایط کاری بدون کاویتاسیون، تنها دو منبع اول و دوم فعال هستند. اما در حضور کاویتاسیون، هر چهار مکانیزم تولید نویز به‌طور همزمان عمل می‌کنند.

مدل‌سازی میدان سیال اطراف پروانه‌های دریایی در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای بر روش‌های عددی تکیه کرده‌است. هرچند روش‌های آزمایشگاهی مانند آزمون در تونل کاویتاسیون و شبیه‌سازی‌های عددی هر دو قادر به پیش‌بینی نویز پروانه هستند، گرایش قابل‌ملاحظه‌ای به سمت روش‌های عددی شکل گرفته‌است. این تغییر رویکرد ناشی از محدودیت‌های ذاتی روش‌های آزمایشگاهی متداول و همچنین پیشرفت سریع دینامیک سیالات محاسباتی است. به‌طور معمول، شبیه‌سازی‌های عددی از رویکرد ترکیبی استفاده می‌کنند که در آن آنالوژی‌های آکوستیکی با حل‌گر هیدرودینامیکی ادغام می‌شوند؛ این روش به‌طور گسترده پذیرفته شده و مطالعات زیادی از آن برای ارزیابی عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌ها استفاده کرده‌اند [۳، ۴].

مطالعات متعددی با بهره‌گیری از روش‌های عددی پیشرفته به بررسی رفتار هیدروآکوستیکی پروانه‌ها پرداخته‌اند. برای مثال، سزن و کیناچی [۳] عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌های دریایی را در شرایط کاویتاسیون و بدون کاویتاسیون بررسی کردند و از رویکرد عددی ترکیبی، شامل حل‌گر هیدرودینامیکی تراکم‌ناپذیر و آنالوژی آکوستیکی فاکس ویلیامز-هاوکینگز (FW-H)، برای پیش‌بینی سطح نویز استفاده نمود. همچنین، نظیر و همکاران [۵] عملکرد

هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه E779A را در شرایط جریان خارج از طراحی (Off-design) مطالعه کردند. ایشان از مدل آشفتگی $k\omega$ -SST در چارچوب معادلات RANS برای تحلیل هیدرودینامیک بهره گرفتند و با کوپل کردن معادلات RANS و معادلات FW-H، ویژگی‌های هیدروآکوستیکی میدان نزدیک را پیش‌بینی کردند.

تستا و همکاران [۶] نویز پروانه E779A را در حضور کاویتاسیون صفحه‌ای ناپایدار مدل‌سازی کرده و علاوه بر استفاده از معادلات FW-H، روش پنل (Panel Method) را برای شبیه‌سازی جریان اطراف پروانه به کار بردند. فلی و فلیکی [۷] یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی دینامیک دنباله پروانه در شرایط جریان مایل انجام دادند. آنان با استفاده از تصویربرداری سرعت ذرات (PIV) و سامانه چند دوربین، رفتار ساختارهای دنباله را تا فاصله $4/5$ برابر قطر پروانه در پایین‌دست تحلیل کردند. این مطالعه مکانیسم‌های تکامل، ناپایداری و فروپاشی دنباله را در زوایای انحراف مختلف به‌طور منظم بررسی کرد و بر ناپایداری نامتقارن گردابه‌های نوک پره و تعامل گردابه‌های نوک، هاب و پشت پره‌ها تمرکز داشت. سالواتوره و فلیچه [۸] مجموعه داده آزمایشگاهی جامع پروانه E779A را ارائه دادند که شامل اندازه‌گیری‌های توزیع فشار و انتشار نویز بوده و اکنون مرجع گسترده‌ای در مطالعات هیدرودینامیک و هیدروآکوستیک محسوب می‌شود.

مطالعه‌ای که توسط پورکاچیا و همکاران [۹] انجام شد، اثر زاویه برخورد جریان را بر نویز انتشاری زیرآب پروانه بررسی کرد. روش آن‌ها شامل استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌ای جداشده (DES) برای مدل‌سازی میدان جریان و کوپل کردن آن با معادلات FW-H برای محاسبات هیدروآکوستیکی بود. ایشان به بررسی دقیق ویژگی‌های نویز یک پروانه مغروق در شرایط جریان مستقیم و مایل پرداختند و دیدگاه‌های ارزشمندی در مورد برهم‌کنش پیچیده دینامیک جریان و انتشار آکوستیک ارائه دادند.

تا کنون مطالعات متعددی برای پیش‌بینی نویز پروانه دریایی انجام شده‌است. برای نمونه، عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌ها با استفاده از آنالوژی آکوستیکی FW-H تحت شرایط جریان یکنواخت و غیریکنواخت در تحقیقات پیشین بررسی شده‌است [۴، ۱۰]. اما استفاده از آرایه‌های پرتراکم برای تحلیل سطح نویز پروانه دریایی در فواصل و زوایای مختلف تحت سرعت‌های پیشروی مختلف، هنوز به‌خوبی در منابع توصیف نشده‌است. انگیزه اصلی این پژوهش نیز پاسخ به این خلأ علمی بوده‌است.

با وجود پیشرفت‌های گسترده در پیش‌بینی نویز، بررسی دقیق الگوی جهت‌مندی همچنان چالش‌برانگیز است. مطالعاتی مانند پژوهش ایانیلو و همکاران [۱۱] رفتار جهت‌دار نویز پروانه E779A را با استفاده از آنالوژی FW-H بررسی کردند و نشان دادند که نویز بارگذاری دارای الگوی دوقطبی مشخصی است. همچنین گاگرو و

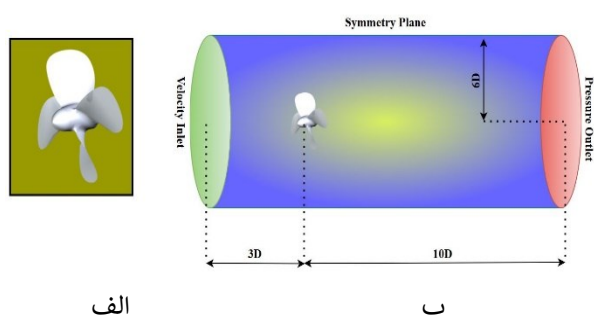
رفتار جهت‌مندتری از خود نشان می‌دهد و گذار از میدان نزدیک به دور چه تاثیری بر این الگو دارد؟ فرضیه اصلی تحقیق این است که در حالی که فرکانس پایه عبور تیغه عمدتاً از الگوی تابش دوقطبی کلاسیک پیروی می‌کند، در هارمونیک مرتبه بالاتر به دلیل کاهش طول موج، الگوهای تیزتری شکل می‌گیرند. راستی‌آزمایی این فرضیه نیازمند نمونه‌برداری فضایی با چگالی بالاست که در این مطالعه با استفاده از آرایه‌های پرتراکم هیدروفونی انجام می‌پذیرد. ساختار ادامه مقاله به این صورت است: بخش ۲ جزئیات هندسه مسئله، دامنه حل و چیدمان گیرنده‌های صوتی در دامنه حل را ارائه می‌کند؛ بخش ۳ به تشریح روش حل و معادلات حاکم می‌پردازد؛ در بخش ۴ جزئیات فنی مربوط به شبکه‌بندی و سائز مناسب شبکه ارائه می‌شود؛ بخش ۵ نتایج مربوط به اعتبارسنجی کار را بیان می‌کند؛ در بخش ۶ نتایج عددی سطح فشار صوتی پروانه در موقعیت‌های مختلف بیان و بحث می‌شود و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- شرح مسئله

۲-۱ هندسه و دامنه حل

مطالعه حاضر بر روی پروانه چهارپره INSEAN E779A که یک مدل گام ثابت با قطر $D = 0.227$ متر است، متمرکز شده است. شماتیک هندسه مورد استفاده، در شکل ۱-الف نشان داده شده است. این پروانه به عنوان یک مدل مرجع در تحقیقات عددی و تجربی هیدرودینامیک و هیدروآکوستیک شناخته می‌شود زیرا داده‌های آزمایشگاهی قابل اعتماد برای اهداف اعتبارسنجی آن در دسترس هستند. ویژگی‌های هندسی اصلی این پروانه در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

شکل ۱-ب طرح شماتیک حوزه محاسباتی شامل ابعاد و شرایط مرزی را برای شبیه‌سازی پروانه در شرایط آب آزاد نشان می‌دهد.



شکل ۱ (الف) مدل CAD پروانه INSEAN E779A؛ (ب) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مرتبط با پروانه، که در آن D قطر پروانه است و مقدار آن برابر با $D = 0.227$ m می‌باشد.

Fig.1 (a) The INSEAN E779A propeller CAD model; (b) The computational domain and boundary conditions related to the propeller, where D is the diameter of the propeller, $D=0.227$ m.

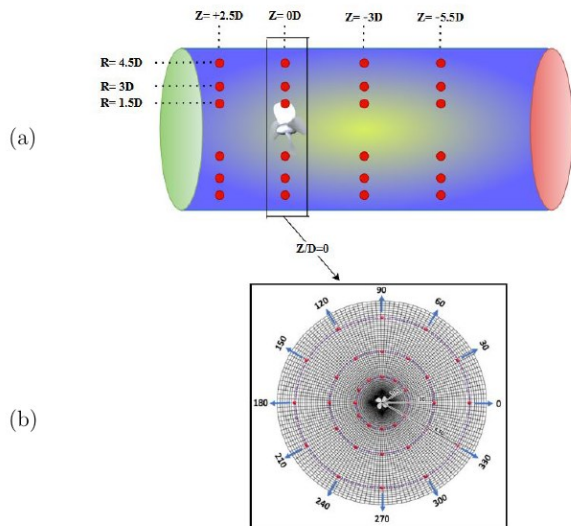
همکاران [۱۲] با توسعه روش‌های عددی، انتشار نویز در میدان دنباله را تحلیل کرده و وابستگی شدید سطح فشار صوتی به زاویه ناظر را گزارش نمودند. در مطالعه‌ای دیگر وی و همکاران [۱۳] اثر نوسانات فشار روی پره بر جهت‌مندی میدان دور را مورد ارزیابی قرار دادند. با این حال اکثر این تحقیقات از آرایه‌های محدود استفاده کردند که منجر به ارائه‌ی تصویری گسسته از میدان صوتی می‌شود. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از آرایه‌های هیدروفونی با چگالی بالا، سعی در ارائه نقشه‌ای پیوسته از جهت‌مندی نویز تونال دارد.

به‌طور دقیق‌تر، در این مطالعه نوآوری اصلی در تحلیل جامع جهت‌مندی (Directivity) نویز در میدان نزدیک و دور به صورت همزمان است. برخلاف تحقیقات گذشته که معمولاً نویز را در نقاط محدود بررسی کردند، این پژوهش با ایجاد یک چیدمان پرتراکم فضایی با استفاده از آرایه هیدروفونی پرتراکم شامل ۱۴۴ گیرنده با جانمایی هدفمند که پوشش فضایی کامل‌تری فراهم کرده و امکان تحلیل دقیق سطح فشار صوتی را مهیا می‌سازد، نحوه انتشار و میرایی فرکانس‌های مختلف (BPF و هارمونیک‌های آن) را در زوایا و فواصل مختلف تحلیل کرده است. این کار امکان شناسایی دقیق‌تر منابع تولید نویز (تفاوت رفتار نویز ضخامت و بارگذاری) را فراهم می‌کند. در واقع هدف نویسندگان بابت استفاده از چیدمان گیرنده‌های با تعداد بالاتر نسبت به مطالعات قبلی این بوده است که نقشه‌های صوتی (Acoustic maps) در مکان‌های مختلف استخراج شود که این موضوع باعث شناخت عمیق‌تری از رفتار صوتی پروانه می‌شود. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که استخراج این نقشه‌های صوتی گامی مهم در باز طراحی پروانه با هدف کاهش سطح نویز و عملکرد بهتر از لحاظ اختفا برای یک پروانه دریایی است.

در این مطالعه، از رویکرد عددی برای بررسی نویز انتشاری زیرآب پروانه چهارپره INSEAN E779A در شرایط عدم حضور کاپیتاسیون، استفاده شده است. مدل ترکیبی دینامیک سیالات محاسباتی، شامل معادلات گذرای میانگین‌گیری شده رینولدز و معادلات FW-H، برای پیش‌بینی نویز به کار رفته است. مدل آشفتگی مورد استفاده مدل SST $k-\omega$ بوده است. این مدل به دلیل دقت بالا در پیش‌بینی جریان‌های مرزی و جدایش جریان در نزدیکی دیواره‌ها (پره‌ها) انتخاب شد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری استار سی‌سی‌ام پلاس (STAR-CCM+) [۱۴] انجام شده و بینش دقیقی درباره سطح فشار صوتی در فواصل و زوایای مختلف نسبت به پروانه ارائه می‌دهد. بمنظور اطمینان از کارآمدی روش حل، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در برابر داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند.

پژوهش حاضر حول یک پرسش کلیدی سازماندهی شده است: آیا الگوی توزیع فضایی نویز تونال پروانه با افزایش مرتبه هارمونیک،

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس



شکل ۲ چیدمان عددی گیرنده‌های صوتی پیرامون پروانه اصلی؛ اندازه‌ها بر حسب متر هستند. (a) موقعیت هیدروفون‌ها در دامنه محاسباتی؛ (b) آرایش گیرنده‌ها حول پروانه، برش عرضی $Z/D=0$.

Fig.2 The numerical arrangement of sound receivers around the main propeller. Dimensions are in meters. (a) The position of hydrophones in the computational domain; (b) Arrangement of receivers around the propeller; cross section $Z/D = 0$.

شکل ۲ قسمت پایین، چیدمان گیرنده‌های صوتی را در مقطع عرضی $Z/D=0$ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر لایه طولی شامل سه لایه شعاعی است که در فواصل $1.5D$ ، $3D$ و $4.5D$ از محور پروانه جای گرفته‌اند. در هر لایه شعاعی نیز ۱۲ گیرنده با فاصله زاویه‌ای 30° درجه از یکدیگر به‌صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. لازم‌به‌ذکر است که آرایش دقیق گیرنده‌ها برای ثبت اندازه‌گیری‌های آکوستیکی قابل اطمینان، اهمیت حیاتی دارد. جدول ۲ نام‌گذاری گیرنده‌ها و اطلاعات دقیق موقعیت آن‌ها را ارائه می‌دهد. گیرنده‌های میدان نزدیک (Layer 1) برای ثبت نویز با دامنه بالا در نواحی آشفتگی شدید و دنباله جریان به کار می‌روند، در حالی که گیرنده‌های میدان دور (Layer 3) داده‌هایی از نحوه انتشار نویز جهت‌دار و امضای صوتی در نواحی با آشفتگی کمتر فراهم می‌کنند. این آرایش سبب دستیابی به پوشش جامع امضای آکوستیکی در هر دو ناحیه میدان نزدیک و میدان دور می‌گردد.

جدول ۲ نام‌گذاری هدفمند هیدروفون‌ها و جزئیات جانمایی آن‌ها.

Table 2 The Strategic nomenclature of hydrophones and their placement details.

Hydrophone ID	Longitudinal Position (Z)	Radial Position (R)	Angle (θ)
1-+2.5D/1.5D	+2.5D	1.5D	$1=0^\circ$
4.0/5D	0D	5.0D	$4=90^\circ$
11-3D/3D	-3.0D	3.0D	$11=300^\circ$
7-5.5D/3D	-5.5D	3.0D	$7=180^\circ$

ابعاد دامنه‌ی محاسباتی براساس توصیه‌های استاندارد ITTC و ادبیات فنی مشابه مانند مرجع [۱۰] انتخاب شد تا از عدم تاثیر مرزها بر توسعه‌ی جریان دنباله اطمینان حاصل شود. فاصله ۱۰ برابر قطر پروانه در پایین‌دست برای اجازه دادن به توسعه کامل گردابه‌های نوک پره و جلوگیری از جریان برگشتی در خروجی در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله شعاعی و بالادست طوری انتخاب شدند که شرایط آب آزاد (Open water) بدون اثر انسداد شبیه‌سازی شود. در سمت چپ، ورودی دامنه به‌صورت ورودی سرعت تعریف شده و در سمت راست، خروجی آن به‌صورت خروجی فشار تنظیم شده است. سطح پروانه به‌عنوان یک دیوار بدون لغزش مدل‌سازی شده که فرض می‌کند سرعت نسبی بین سیال و سطح پروانه صفر است. مرزهای جانبی به‌صورت صفحات تقارن در نظر گرفته شده‌اند تا هزینه محاسباتی کاهش یابد بدون آنکه بر نتایج تاثیر بگذارد.

جدول ۱ مشخصات اصلی پروانه INSEAN E779A.

Table 1 The main particulars of the INSEAN E779A propeller.

Parameter	Symbol	Units	Values
Diameter	D	[m]	0.227
Number of Blades	Z	[-]	4
Hub Ratio	d_h/D	[-]	0.20
Expanded Area Ratio	EAR	[-]	0.689
Pitch-Diameter Ratio	P/D	[-]	1.1

دامنه محاسباتی به دو بخش تقسیم شده است: ناحیه ساکن و ناحیه چرخان. هر دو بخش ساکن و چرخان در محیط نرم‌افزار عددی توسعه یافته‌اند. این دامنه محاسباتی یک ناحیه استوانه‌ای است که پروانه در مرکز آن قرار دارد. این دامنه به‌صورت طولی، $L=10D$ در جهت پایین‌دست و $3D$ در جهت بالادست امتداد یافته و شعاع آن $R=6D$ است. چنین ابعادی، با هدف کاهش اثرات مرزی و فراهم کردن فضای کافی برای توسعه جریان دنباله، در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۲ چیدمان دریافت‌کننده‌های صوتی

برای بررسی عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه، تعداد ۱۴۴ گیرنده صوتی به‌صورت هدفمند درون حوزه محاسباتی جای‌گذاری شده‌اند. شکل ۷ طرح شماتیک حوزه محاسباتی را به همراه آرایه هیدروفون‌ها نشان می‌دهد که پیرامون پروانه توزیع شده‌اند تا تغییرات مکانی و جهتی سطح فشار صوتی را ثبت کنند. این گیرنده‌ها در چهار لایه طولی واقع در موقعیت‌های $+2.5D$ (بالادست)، $0D$ ، $-3D$ و $-5.5D$ (پایین‌دست پروانه) نسبت به محور پروانه قرار گرفته‌اند.

در این روش فشار آکوستیکی کل $p'(x, t)$ در موقعیت ناظر x و زمان t حاصل جمع دو مولفه نویز ضخامت (p'_T) و نویز بارگذاری (p'_L) است که به صورت (۴) تعریف می‌شوند [۱۶]:

$$p'(x, t) = p'_T(x, t) + p'_L(x, t) \quad (۴)$$

نویز ضخامت که ناشی از جابجایی سیال توسط حجم پره‌هاست (منابع تک قطبی) از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{V}_n}{r(1-M_r)^2} + \frac{\rho_0 \dot{V}_n (rM_r + c_0(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (۵)$$

و نویز بارگذاری که ناشی از توزیع نیروهای هیدرودینامیکی روی سطح پره است (منابع دو قطبی)، طبق رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید:

$$4\pi p'_L(x, t) = \frac{1}{C_0} \int_{f=0} \left[\frac{i_r}{r(1-M_r)^2} + \frac{l_r(rM_r + c_0(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{l_r}{r^2(1-M_r)} \right]_{ret} ds \quad (۶)$$

در این معادلات، مندرجات داخل براکت $[...]_{ret}$ باید در زمان تأخیر یافته ارزیابی شوند که بیانگر زمان انتشار صوت از منبع به ناظر است. r فاصله ناظر تا منبع، C_0 سرعت صوت در سیال و ρ_0 چگالی سیال ساکن است. M_r عدد ماخ نسبی در راستای انتشار به سمت ناظر است. $\dot{V}_n$ سرعت عمود بر سطح و i_r مولفه نیروی وارد بر سیال در راستای بردار فاصله r است. این فرمول بندی به دلیل در نظر گرفتن دقیق اثرات حرکت چشمه صوتی و جابجایی داپلر در ترم $(1-M_r)$ ، برای پیش بینی نویز پروانه‌های دریایی بسیار کارآمد است.

باید توجه شود که فرمول Farassat-1A برای سطوح نفوذناپذیر (Impermeable surface) استفاده شده است و سطح انتگرال گیری دقیقاً بر روی سطوح جامد (پره‌ها و هاب) منطبق است. دلیل این انتخاب ماهیت فیزیکی نویز پروانه‌های دریایی است. از آنجاییکه پروانه در عدد ماخ بسیار پایین کار می‌کند، طبق تئوری لایت هیل، شدت منابع نویز چهارقطبی که ناشی از تنش‌های برشی در حجم جریان آشفته هستند و متناسب با توان پنجم عدد ماخ می‌باشند در مقایسه با منابع دوقطبی ناشی از نوسانات فشار روی سطح که متناسب با توان سوم عدد ماخ هستند، بسیار ناچیز و قابل صرف نظر هستند. بنابراین اگرچه استفاده از سطح نفوذپذیر برای دریافت نویز چهارقطبی در جریان‌های با سرعت بالا مثلاً هوایی رایج است اما در کاربردهای دریایی حل دقیق نوسانات فشار روی سطح جامد برای پیش بینی نویز غالب کافی است.

۳- روش حل و معادلات حاکم

شبیه سازی‌های جریان با استفاده از نرم افزار استار سی سی ام پلاس انجام شده است. از آنجاییکه نویز تولید شده توسط یک پروانه که با سرعت زیرصوت کار می‌کند، در درجه اول به تغییرات فشار سطحی اعمال شده بر سیال اطراف نسبت داده می‌شود [۱۵]، محاسبات هیدرودینامیکی با فرض ثابت بودن چگالی انجام می‌شود. معادلات حاکم که جریان غیردائم را مشخص می‌کنند، نسخه‌های تراکم ناپذیر معادلات مومنوم و ناویر-استوکس هستند.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (۲)$$

در معادله (۲)، $\bar{u}_j$ سرعت در جهت j ، ρ چگالی، p فشار و τ_{ij} نشان دهنده تانسور تنش رینولدز است. تانسور تنش رینولدز τ_{ij} بیانگر اثرات نوسانات آشفته بر جریان میانگین است و با استفاده از فرضیه بوسینسک (Boussinesq) به گرادیان‌های سرعت متوسط مرتبط می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\bar{u}'_i \bar{u}'_j = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (۳)$$

که در آن ν_t ویسکوزیته سینماتیکی آشفته، k انرژی جنبشی آشفته و دلتای δ_{ij} کرونگر است. مقدار ν_t توسط مدل آشفته‌گی انتخابی محاسبه می‌شود. مدل آشفته‌گی مورد استفاده مدل $k-\omega$ SST بوده است. این مدل به دلیل دقت بالا در پیش بینی جریان‌های مرزی و جدایش جریان در نزدیکی دیواره‌ها (پره‌ها) انتخاب شد.

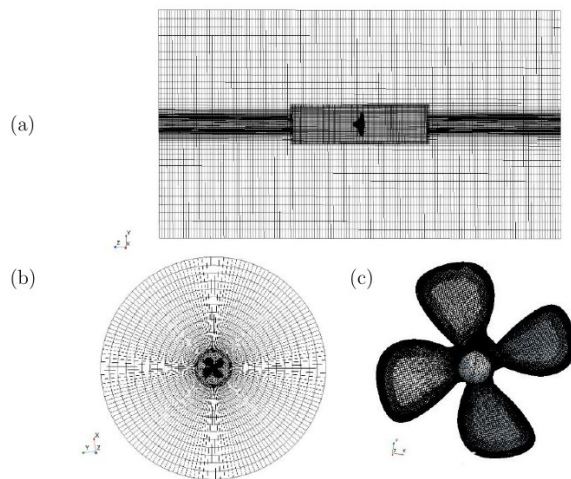
در این پژوهش برای تحلیل هیدروآکوستیکی در حالت غیر دائم، یک رویکرد ترکیبی برای پیش بینی نویز تولید شده از جریان اتخاذ شده است که در آن حل میدان جریان و میدان آکوستیک به صورت مجزا صورت می‌گیرد (کوپلینگ یک طرفه). ابتدا میدان جریان ناپایا با استفاده از معادلات URANS حل می‌شود تا نوسانات هیدرودینامیکی نسبت به زمان با دقت شبیه سازی گردند. در این فرایند سطوح پره‌ها و هاب پروانه به عنوان سطوح نفوذناپذیر برای انتگرال گیری آکوستیکی تعریف شده‌اند. در هر گام زمانی مقادیر لحظه‌ای فشار آکوستیکی و مولفه‌ی تانسور تنش لزجت بر روی این سطوح دوار از حلگر CFD استخراج و ذخیره می‌شوند. این متغیرهای هیدرودینامیکی به عنوان ورودی‌های اصلی معادله FW-H عمل می‌کنند. در این پژوهش از فرمولاسیون Farassat-1A که حل انتگرالی برای معادله فاکس ویلیامز - هاو کینگز (FW-H) است، استفاده شده است که بیانگر حل انتگرالی معادله FW-H برای سطوح صلب دوار است. در نهایت فشار صوتی در موقعیت هیدروفون‌ها با انتگرال گیری از منابع تک قطبی و دوقطبی روی سطوح پروانه حاصل می‌شود.

۴- شبکه بندی و استقلال از شبکه

فرآیند تولید شبکه برای ناحیه حل، گامی حیاتی و اساسی در اجرای هر نوع شبیه‌سازی عددی به شمار می‌آید. کیفیت و دقت شبکه‌بندی تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج شبیه‌سازی دارد. برای این منظور، از نرم‌افزار STAR-CCM+ جهت ایجاد شبکه در حوزه محاسباتی استفاده شده‌است.

سرعت دورانی پروانه مورد مطالعه برابر با ۷۲۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده‌است. همچنین در این شبیه‌سازی برای مدل‌سازی حرکت دورانی پروانه، از قابلیت Dynamic Mesh در نرم‌افزار STAR-CCM+ استفاده شده‌است. در این روش، ناحیه پیرامون پروانه به‌صورت یک حجم کنترل جداگانه تعریف شده و با استفاده از مدل Overset Mesh (Chimera)، حرکت چرخشی پروانه نسبت به دامنه ثابت اطراف شبیه‌سازی می‌شود. بدین ترتیب، شبکه اطراف پروانه همراه با آن دوران می‌کند و اطلاعات جریان از طریق مرزهای همپوشان (Overset interface) بین شبکه متحرک و ساکن تبادل می‌شود. این روش شامل شبکه ریزتر در اطراف پره‌های پروانه برای مدل‌سازی دقیق اغتشاشات میدان نزدیک و گردابه‌های نوک پره، و نیز شبکه‌ای درشت‌تر در نواحی دور از جسم (جریان آزاد) است.

در نواحی کلیدی مانند اطراف بدنه، درون دامنه تداخلی (interface domain) و ناحیه پشت پروانه، از شبکه‌های با اندازه کوچک‌تر استفاده شده‌است. هنگام ساخت شبکه در نزدیکی دیواره‌ها، فاصله اولین گره محاسباتی از دیواره که معادل ضخامت اولین لایه سلولی است و همچنین تعداد گره‌ها در لایه مرزی، وابستگی زیادی به مدل جریان آشفته انتخابی دارد.



شکل ۳ توزیع مش پیرامون پروانه. (a) توزیع مش در کل دامنه محاسباتی، $z/D=0$; (b) نمای برش مقطع، $x/D=0$; (c) توزیع مش بر روی تیغه‌های پروانه.

Fig.3 The mesh distribution around the propeller. (a) The mesh distribution in the entire computational domain, $z/D=0$; (b) The cross section view, $x/D=0$; (c) The mesh distribution on propeller blades.

چگالی آب برابر با $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ و سرعت صوت برابر $c_0 = 1500 \text{ m/s}$ تنظیم شده‌است [۱۷]. رابطه‌ی ۱A مطابق معادله‌ی (۷) تعریف می‌شود [۱۶].

$$p'(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{1}{1-M_r} \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\rho_0 v_n}{r(1-M_r)} + \frac{p \cos \theta}{c_0 r(1-M_r)} \right] + \left[\frac{p \cos \theta}{r^2(1-M_r)} \right] \right]_{\tau_e} dS \quad (7)$$

اینجا $r = |x - y|$ و $M_r = (x - y)v/r c_0$ است. متغیر v_n سرعت عمود بر سطح محلی است و τ_e نشان دهنده زمان انتشار است. علاوه بر این، $\cos \theta = (x - y) \cdot n$ ، که در آن v بردار واحد نرمال بر سطح است. پیش‌بینی نوپژ در این مطالعه تنها یک سطح انتگرال-ناپذیر را برای فرمول ۱A در نظر می‌گیرد. سطح یکپارچه شامل تیغه-ها و هاب پروانه است.

برای اطمینان از رسیدن به رژیم شبه‌پایا، شبیه‌سازی‌ها تا رسیدن به حداقل ۸ دور کامل پروانه اجرا شدند. پس از آن نیز شبیه‌سازی ۵ دور کامل برای داده‌برداری نوپژ ادامه یافت. این تعداد دور چرخش این اطمینان را می‌دهد که اثرات شرایط اولیه روی پاسخ نوپژ محاسبه شده از بین رفته‌است.

برای حل معادلات گسسته‌سازی شده، از الگوریتم SIMPLE جهت کوپلینگ سرعت و فشار استفاده شده‌است. معیار همگرایی حل عددی به این صورت قابل توجه قرار گرفت که در هر گام زمانی، معیار همگرایی داخلی بر اساس کاهش باقیمانده‌های معادلات پیوستگی و مومنتم به مقادیر کمتر از 10^{-4} رسید. به این منظور تعداد تکرار داخلی برای هر گام زمانی برابر با ۴۰ و در حل آکوستیک برابر با ۲۰ در نظر گرفته شد تا از همگرایی کامل معادلات در هر چرخش جزئی پروانه اطمینان حاصل شود. همچنین همگرایی کلی حل ناپایا با پایش ضرایب هیدرودینامیکی (ضریب تراست و ضریب گشتاور) ارزیابی شد. شبیه‌سازی تا زمانی ادامه یافت که این ضرایب به یک میانگین آماری ثابت برسند. تنظیمات شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار مطابق جدول ۳ اعمال شد.

جدول ۳ تنظیمات حل عددی در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام پلاس.

Table 3 Numerical solution settings in Star-CCM+ software.

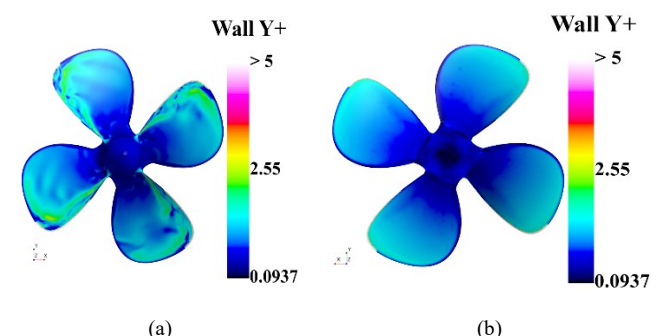
پارامتر / تنظیمات	روش / مقدار
نوع حلگر (Solver Type)	Segregated Flow
الگوریتم کوپلینگ سرعت - فشار	SIMPLE algorithm
گسسته‌سازی مکانی (Spatial discretization)	Second-order upwind
گسسته‌سازی زمانی (Temporal discretization)	Second-order implicit
مدل آشفتگی (Turbulence model)	k - ω SST (Menter)
ضریب زیر تخفیف سرعت (Velocity URF)	0.7
ضریب زیر تخفیف فشار (Pressure URF)	0.3
تعداد تکرار در هر گام زمانی (Inner iterations)	20-40

در این شبیه‌سازی، نخستین گره محاسباتی در فاصله 0.08 میلی-متر از دیواره قرار داده شده و ۲۰ گره درون لایه مرزی در نظر گرفته شده‌است.

چرخش پروانه با استفاده از تکنیک شبکه همپوشان (Overset Mesh) مدل‌سازی شده تا تعامل میان پروانه در حال دوران و سیال پیرامونش به دقت شبیه‌سازی گردد. شکل ۳ شبکه تولید شده را نشان می‌دهد؛ شکل (a) ۳ نمای دوبعدی توزیع شبکه در کل دامنه محاسباتی را نمایش می‌دهد. شکل‌های (b) و (c) به ترتیب نمای مقطع عرضی شبکه در $X/D=0$ و شبکه روی تیغه‌های پروانه را نشان می‌دهند.

به منظور اطمینان از استقلال نتایج حل عددی از اندازه شبکه، مطالعه حساسیت‌سنجی با تولید سه شبکه با تراکم‌های مختلف (درشت، متوسط و ریز) به ترتیب با تعداد سلول‌های تقریبی ۳/۵، ۵ و ۸ میلیون انجام گرفت. معیار ارزیابی، تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج نشان داد که با ریزتر کردن شبکه از ۵ به ۸ میلیون سلول، تغییرات ضرایب مذکور کمتر از ۱٪ بوده است. با توجه به اینکه افزایش تعداد سلول به ۸ میلیون منجر به افزایش چشمگیر زمان محاسبات در شبیه‌سازی ناپایا می‌گردد و تاثیر معناداری بر دقت نتایج ندارد، شبکه با ۵ میلیون سلول به عنوان تعادل بهینه میان دقت و هزینه محاسباتی انتخاب شد.

در شکل ۴ توزیع پارامتر بی‌بعد y^+ بر روی دو سمت مکش و فشار پروانه چهارپره نشان داده شده‌است. این پارامتر معیار مناسبی برای ارزیابی دقت شبکه‌بندی در نواحی نزدیک دیواره محسوب می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر y^+ عمدتاً در بازه کمتر از ۵ (عمدتاً کمتر از ۲/۵) قرار دارند و این موضوع بیانگر آن است که مش اتخاذ شده از دقت کافی برای حل مستقیم زیرلایه لزج برخوردار است.



شکل ۴ توزیع مقدار y^+ بر روی تیغه‌های پروانه. (a) سمت مکش؛ (b) سمت فشار.

Fig.4 The y^+ value distribution on the propeller blades. (a) The suction side; (b) The pressure side.

در سطح مکش، مقادیر y^+ در نواحی نزدیک لبه‌ی حمله و نوک پره اندکی افزایش یافته که ناشی از گرادیان شدید سرعت و تراکم خطوط جریان است. به‌طور کلی، مقادیر پایین و یکنواخت y^+ اعتبار شبکه‌بندی و کیفیت بالای مدل‌سازی جریان نزدیک دیواره را تأیید می‌کند و زمینه را برای پیش‌بینی دقیق نیروهای هیدرودینامیکی و نویز هیدروآکوستیکی فراهم می‌سازد.

همان‌طور که در بخش روش حل و معادلات حاکم بیان شد، برای محاسبه نویز از فرمولاسیون Farassat-1A برای سطوح نفوذناپذیر استفاده شده‌است. این بدان معناست که داده‌های منبع صوتی یعنی نوسانات فشار و سرعت تنها از روی سطح پره‌های پروانه استخراج می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده‌است، شبکه در اطراف پره‌ها و لایه مرزی به حد نیاز مسئله و توان محاسباتی در دسترس، ریز شده‌است ($y^+ \approx 2.5$). بنابراین داده‌های اولیه تولید نویز با دقت قابل قبولی محاسبه می‌شوند. در روش FW-H، انتشار صوت از منبع یعنی پره‌ها به گیرنده از طریق حل شبکه سیالاتی انجام نمی‌شود، بلکه با استفاده از حل تحلیلی معادله موج در فضای آزاد صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر موج صوتی به صورت ریاضی از روی پره به هیدروفون تابیده می‌شود و از میان سلول‌های درشت شبکه عبور نمی‌کند تا دچار استهلاک عددی شود. بنابراین، اگرچه شبکه در فواصل دور برای کاهش هزینه محاسباتی درشت‌تر شده‌است، اما چون محل استخراج داده‌های صوتی یعنی سطح پره‌ها دارای کیفیت شبکه بالایی است، نتایج هیدروفون‌های میدان دور نیز معتبر می‌باشند. البته باید توجه داشت که درشتی مش در دنباله باعث می‌شود ما ساختار دقیق گردابه‌ها در دور دست را از دست بدهیم، اما چون آن گردابه‌های دور دست منبع اصلی صدا نیستند، خطای چشمگیری در محاسبه سطح فشار صوت نهایی ایجاد نمی‌شود. البته این موضوع یعنی محاسبه اثر نویز گردابه‌های دنباله به‌تنهایی می‌تواند در مطالعه‌ی جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

۵- اعتبارسنجی

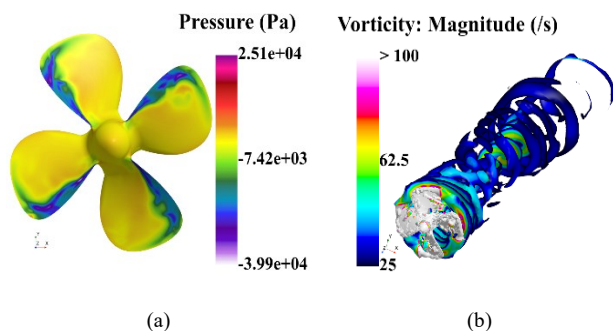
برای اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی، نتایج محاسباتی با داده‌های تجربی ارائه‌شده در دیتاست INSEAN E779A تحت شرایط آب آزاد، به‌طور دقیق مقایسه گردید.

برای استخراج پارامترهای عددی هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه، شبیه‌سازی عددی در شرایط جریان ناپایا (unsteady flow) انجام گرفته‌است. این شبیه‌سازی با مقدار ضریب پیشروی برابر با ۰/۴۹ و سرعت چرخشی ثابت برابر با ۱۲ دور بر ثانیه اجرا شده‌است. گام زمانی از طریق رابطه‌ی $R^\circ/(n \times 360)$ محاسبه می‌شود، که در آن R° نشان‌دهنده‌ی چرخش بر حسب درجه در هر گام زمانی است. مقدار $R^\circ = 0.5$ در نظر گرفته شده‌است؛ در نتیجه، گام زمانی محاسبه‌شده برابر با 1.1×10^{-4} می‌باشد.

۱-۶ تحلیل هیدرودینامیک

رفتار هیدرودینامیکی پروانه با تحلیل توزیع فشار و ساختار دنباله جریان ارزیابی شده‌است؛ همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است. شکل (a) توزیع فشار ساکن را بر روی سطح مکش تیغه‌های پروانه نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نواحی فشار پایین (با رنگ‌های بنفش و آبی تیره) عمدتاً در نزدیکی لبه حمله و نوک تیغه‌ها متمرکز هستند. این افت فشار شدید، نیروی محرکه اصلی برای تولید رانش بوده اما در عین حال، پتانسیل بالایی برای شکل‌گیری کاویتاسیون در این مناطق ایجاد می‌کند که خود باعث تقویت نویز پهن‌بند می‌شود. در مقابل، نواحی با فشار بالاتر (زرد رنگ) در بخش مرکزی و لبه فرار تیغه‌ها مشاهده می‌شوند. این گرادین فشار قابل توجه بین لبه‌های حمله و فرار، عامل اصلی بارگذاری هیدرودینامیکی روی پروانه بوده و یکی از عناصر کلیدی در تعیین راندمان کل نیروی پیشران به شمار می‌آید.

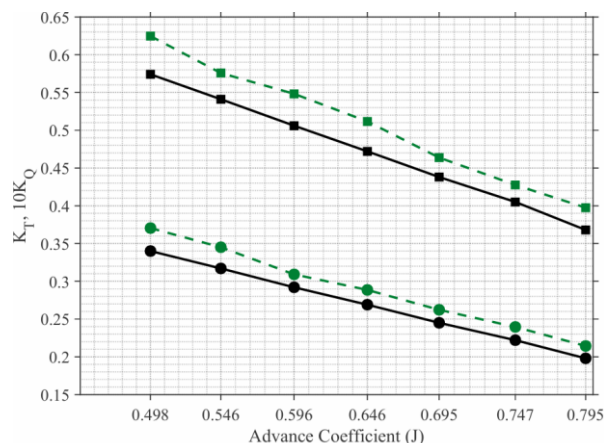
شکل (b) ساختار جریان دنباله را بر اساس معیار Q (Q-criterion) نمایش می‌دهد. ویژگی اصلی این جریان، شکل‌گیری گردابه‌های نوک تیغه با ساختار مارپیچی بسیار منظم است که از نوک هر چهار تیغه جدا شده و به سمت پایین دست امتداد می‌یابند. این گردابه‌ها دارای هسته با سرعت بالا هستند که در شکل با رنگ سبز مشخص شده‌اند. این ساختارهای پایدار گردابه‌ای، منبع اصلی نویز تونال در فرکانس عبور تیغه (BPF) و هارمونیک‌های آن به شمار می‌روند. علاوه بر این، برهم‌کنش این گردابه‌ها با یکدیگر و در نهایت شکستگی آن‌ها در فاصله پایین دست بیشتر از پروانه، منجر به تولید نویز پهن‌بند می‌شود.



شکل ۶ تحلیل هیدرودینامیکی پروانه. (a) توزیع فشار بر روی تیغه‌های پروانه؛ (b) ساختار جریان دنباله را بر اساس معیار Q (Q-criterion).
Fig.6 Hydrodynamic analysis of a propeller blade: pressure and wake velocity structures. (a) Pressure distribution on the propeller blade; (b) Iso-surfaces of the Q-criterion visualizing the propeller wake vortical structures.

۲-۶ تحلیل هیدروآکوستیک

شکل‌های ۷ تا ۱۰ طیف‌های سطح فشار صدا را در موقعیت‌های محوری و شعاعی مختلف نشان می‌دهند. کلیه منحنی‌ها در بازه‌ی فرکانسی کمتر از ۱۰۰۰ هرتز ارائه شده‌اند. از آنجا که حد بالای ۱۰۰۰ هرتز پایین‌تر از حد نایکوئیست فضای آرایه چینی (حدود ۱/۴ کیلوهرتز) بوده و نسبت سیگنال به نویز در داده‌های ما پس از ۱ کیلوهرتز به‌طور محسوس کاهش می‌یابد، مقدار ۱ کیلوهرتز به عنوان یک فرکانس قطع مناسب (cutoff frequency) در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۵ مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه حاضر با مطالعه سالواتوره و فلیچه [۸]. سبک‌های خطوط به صورت زیر هستند: خط‌های پیوسته نمایانگر ضریب گشتاور بوده و خط‌های بریده بریده نمایانگر ضریب تراست می‌باشند.

Fig. 5 Comparison of the hydrodynamic coefficients of the present propeller with those of the study by Salvatore and Felice [8]. The line styles are as follows: solid lines represent the torque coefficient, while dashed lines denote the thrust coefficient.

شکل ۵ توزیع ضریب نیروی تراست (K_t) و ضریب گشتاور ($10K_Q$) را در مقادیر مختلف ضریب پیشروی نشان می‌دهد که با نتایج تجربی گزارش شده در مطالعه سالواتوره و فلیچه [۸] مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در مطالعه حاضر تطابق قابل قبولی با اندازه‌گیری‌های تجربی در پژوهش‌های پیشین را نشان می‌دهند. به‌منظور ارزیابی کمی عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی، خطای نسبی بین داده‌های عددی و داده‌های تجربی برای ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی در بازه گسترده‌ای از ضرایب پیشروی وجود دارد. تحلیل خطا نشان می‌دهد که بیشترین انحراف در ضریب پیشروی $J=0.5$ رخ می‌دهد که در آن اختلاف برای ضریب تراست برابر با ۸/۷ درصد و برای ضریب گشتاور برابر ۷/۵ درصد است. این اختلاف ناشی از پیچیدگی جریان و جدایش شدید در شرایط بارگذاری سنگین است. با افزایش ضریب پیشروی و کاهش بارگذاری، این خطا به کمتر از ۳ درصد کاهش می‌یابد که قابلیت اطمینان روش حاضر را تأیید می‌کند.

۶- بحث و نتایج

این بخش تحلیلی جامع از عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پروانه INSEAN E779A در شرایط آب آزاد را، بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر ارائه می‌دهد. بحث در دو محور اصلی سازماندهی شده‌است:

- ۱- ویژگی‌های هیدرودینامیکی که ویژگی‌های دینامیک سیال مرتبط با عملکرد پروانه را مورد توجه قرار می‌دهند.
- ۲- تحلیل هیدروآکوستیکی که بر الگوهای تشعشع نویز وابسته به فضا و فرکانس که توسط پروانه تولید می‌شود تمرکز دارد.

جریان است. شدت این نویز معمولاً با افزایش فرکانس کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۷ طیف میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی به همراه بازه انحراف معیار $\pm 1\sigma$ در موقعیت $z/D=0$ و $r/D=3$ را نشان می‌دهد. شکل ۸ طیف میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی به همراه بازه انحراف معیار $\pm 1\sigma$ در موقعیت $|z|/D=3$ و $r/D=4.5$ را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۷ و ۸، سبک خطوط به این ترتیب است که خط سیاه رنگ، میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی و باند قرمز رنگ نوار $\pm 1\sigma$ را نمایش می‌دهند.

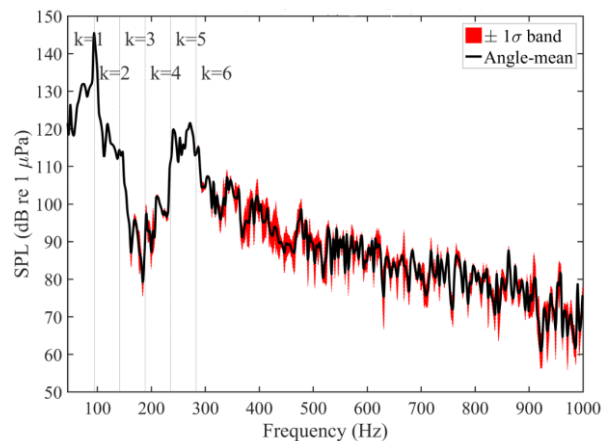
اولین پیک تونال مشاهده شده مربوط به دومین هارمونیک فرکانس عبور تیغه است، یعنی $k=2 \approx 94/3$ هرتز، که در آن k نمایانگر شماره هارمونیک فرکانس عبور تیغه است. پیک‌های بعدی در هارمونیک‌های بالاتر به ترتیب در $k=3 \approx 141/5$ هرتز، $k=4 \approx 188/6$ هرتز، $k=5 \approx 235/8$ هرتز، و $k=6 \approx 282/9$ هرتز ظاهر می‌شوند. این پیک‌ها بر روی یک زمینه‌ی طیفی پهن‌بند با روند کاهشی قرار گرفته‌اند.

باند $\pm 1\sigma$ ، به عنوان شاخصی از غیر یکنواختی زاویه‌ای، نشان می‌دهد که در حوالی $k=2$ پراکندگی بین زوایا کمتر است (همگرایی بهتر)، اما با افزایش مرتبه‌ی هارمونیک (به ویژه در $k=3$ و $k=4$) این بازه گسترش یافته و نشان‌دهنده‌ی جهت‌مندی قوی‌تر تابش آکوستیکی در این فرکانس‌ها است. در فرکانس‌های بالاتر از تقریباً ۴۰۰ هرتز، عرض باند $\pm 1\sigma$ کاهش یافته و رفتار مؤلفه‌ی پهن‌بند تمایل به پخش‌شدگی یکنواخت‌تر در تمام جهات پیدا می‌کند.

ترکیب این مشاهدات نشان می‌دهد که در موقعیت $z/D=0$ و $r/D=3$ ، انرژی آکوستیکی عمدتاً در چند هارمونیک پایین متمرکز است، در حالی‌که با افزایش فرکانس، سهم نویز پهن‌بند غالب می‌شود و اختلاف زاویه‌ای تابش صوت کاهش می‌یابد.

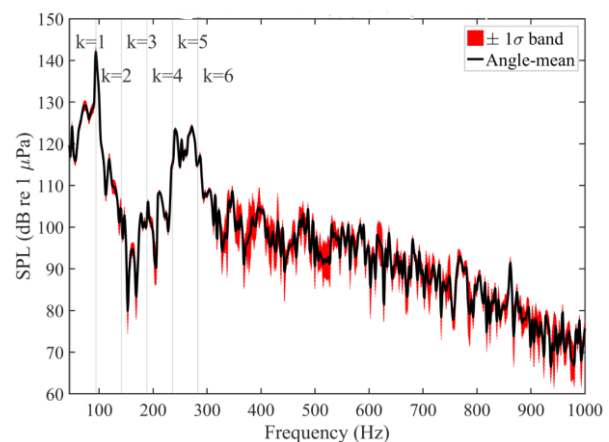
شکل ۹ طیف سطح فشار صوتی را برای ۱۲ زاویه جهتی با اختلاف ۳۰ درجه، همراه با منحنی میانگین زاویه‌ای در موقعیت $z/D=0$ و $r/D=3$ نمایش می‌دهد. در شکل ۱۰ طیف سطح فشار صوتی برای ۱۲ زاویه جهتی با اختلاف ۳۰ درجه، همراه با منحنی میانگین زاویه‌ای در موقعیت $|z|/D=3$ و $r/D=4.5$ نشان داده شده‌است. در هر دو شکل ۹ و ۱۰، خط سیاه بیانگر میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی بوده و خطوط رنگی، طیف‌های حاصل از زوایای مختلف هستند که مطابق با راهنمای رنگ (legend) در نمودار مشخص شده‌اند.

هدف از ارائه‌ی این شکل، انتقال هم‌زمان دو مفهوم کلیدی است: ۱- مشخص شدن محدوده‌هایی از فرکانس که در آن میانگین زاویه‌ای رفتار کل زوایا را به‌خوبی نمایندگی می‌کند؛ ۲- نمایش این موضوع که مولفه‌های تونال ناشی از عبور تیغه‌ها در این فواصل محوری/شعاعی همچنان ویژگی جهت‌مندی آکوستیکی (directionality) خود را حفظ کرده‌اند، در حالی که مولفه‌ی پهن‌بند به‌تدریج به رفتاری تقریباً بدون جهت (همسانگرد) متمایل می‌شود.



شکل ۷ طیف‌های میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی همراه با نوار انحراف معیار استاندارد $\pm 1\sigma$ در موقعیت $z/D=0$ و $r/D=3$. سبک خطوط به این ترتیب است: خط سیاه: میانگین زاویه‌ای SPL، ناحیه قرمز: نوار $\pm 1\sigma$.

Fig.7 Angular-mean SPL spectra with standard deviation band ($\pm 1\sigma$) at $z/D=0$ and $r/D=3$ positions. Line styles are as follows:— Black line: angle-mean SPL and Red area: $\pm 1\sigma$ band.



شکل ۸ طیف‌های میانگین زاویه‌ای سطح فشار صوتی همراه با نوار انحراف معیار استاندارد $\pm 1\sigma$ در موقعیت $|z|/D=3$ و $r/D=4.5$. سبک خطوط به این ترتیب است: خط سیاه: میانگین زاویه‌ای SPL، ناحیه قرمز: نوار $\pm 1\sigma$.

Fig.8 Angular-mean SPL spectra with standard deviation band ($\pm 1\sigma$) at $|z|/D=3$ and $r/D=4.5$ positions. Line styles are as follows:— Black line: angle-mean SPL and Red area: $\pm 1\sigma$ band.

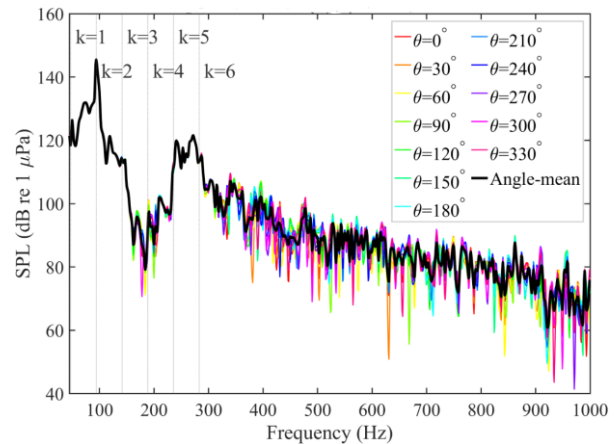
در نمودارهای طیف صوتی دو ویژگی اصلی قابل مشاهده است: نویز تونال دارای پیک‌های تیز و مشخصی در فرکانس‌های متناظر با هارمونیک‌های فرکانس عبور تیغه است. نخستین پیک تونال قابل توجه در فرکانس حدود ۹۴ هرتز ظاهر می‌شود که متناظر با دومین هارمونیک فرکانس عبور تیغه است. پیک‌های بعدی در هارمونیک‌های بالاتر فرکانس عبور تیغه قابل مشاهده‌اند. دامنه‌ی این پیک‌ها بیانگر انرژی آکوستیکی ناشی از بارگذاری تناوبی تیغه‌ها و ریزش گردابه‌های نوک تیغه است. نویز پهن‌بند در فرکانس‌های بالاتر، معمولاً بالاتر از حدود ۲۵۰ هرتز، طیفی پیوسته دارد که منشأ آن ماهیت تصادفی جریان آشسته، ریزش گردابه‌ها و برهم‌کنش‌های غیرخطی در دنباله

اندک است و طیف‌ها به هم نزدیک‌اند؛ اما در حوالی $k=3$ و به‌ویژه $k=4$ واگرایی زاویه‌ای افزایش می‌یابد و برخی زوایا مقادیر بالاتر یا پایین‌تر از مقدار میانگین دارند. در $k=5$ و $k=6$ ، این اختلاف نسبتاً کمتر از مقادیر در $k=3$ و $k=4$ می‌باشد.

در فرکانس‌های بالاتر از حدود ۴۰۰ هرتز، منحنی‌های مربوط به زوایای مختلف به‌طور محسوسی بر هم منطبق می‌شوند و فاصله‌ی آن‌ها از میانگین حداقل می‌گردد، که نشان‌دهنده‌ی ایزوتروپی نسبی مؤلفه‌ی پهن‌بند است. منشأ این رفتار را می‌توان این‌طور توضیح داد که پیک‌های تونال ناشی از بارگذاری تناوبی تیغه‌ها و منابع آکوستیکی هم‌فرکانس با مضارب فرکانس عبور تیغه هستند. با افزایش مرتبه‌ی هارمونیک، طول‌موج مؤثر کاهش می‌یابد و بنابراین، جهت‌مندی انتشار صوت و حساسیت زاویه‌ای افزایش پیدا می‌کند؛ از این رو، هارمونیک‌های سوم و چهارم فرکانس عبور تیغه رفتار آزیمو تال بارزتری نسبت به هارمونیک دوم دارند. در مقابل، در فرکانس‌هایی دور از مضارب فرکانس عبور تیغه، سهم نویز پهن‌بند حاصل از آشفتگی دنباله‌ی جریان و گردابه‌ها غالب است و میدان آکوستیکی رفتاری همگن‌تر و با حساسیت زاویه‌ای کمتر نشان می‌دهد.

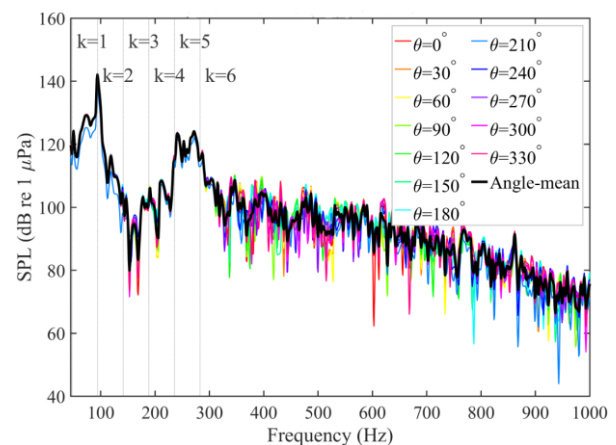
مقایسه‌ی شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که در موقعیت $z/D=3$ و $|z|/D=3$ نسبت به موقعیت نزدیک‌تر به صفحه پروانه، میدان منظم‌تر و همگن‌تری ارائه می‌شود، اگرچه اثر جهت‌مندی هارمونیک‌های مرتبه بالا هنوز به‌طور کامل از بین نرفته‌است. بنابراین، این فریم از یک سو نمایانگر قابلیت اتکای میانگین زاویه‌ای در باندهای بالاتر است و از سوی دیگر تأکید دارد که تحلیل حداکثرهای زاویه‌ای برای مولفه‌های تونال، خصوصاً در $k=3$ و $k=4$ باید به‌صورت جداگانه انجام شود.

این نتیجه از دیدگاه فیزیکی، بازتابی از گذار میدان صوتی از نویز تونال جهت‌دار به نویز پهن‌بند همگن‌تر بوده و از دیدگاه کاربردی، برای تصمیمات کنترلی جهت کاهش تونال‌های مرتبه بالا و مهار جریان‌های آشفتۀ مولد نویز پهن‌بند اهمیت دارد.



شکل ۹ طیف SPL برای ۱۲ زاویه جهتی (با گام ۳۰ درجه) به همراه منحنی میانگین زاویه‌ای در موقعیت $z/D=0$ و $r/D=3$.

Fig.9 The SPL spectrum for 12 azimuths (30° step) along with the angle-mean curve at $z/D=0$ and $r/D=3$.

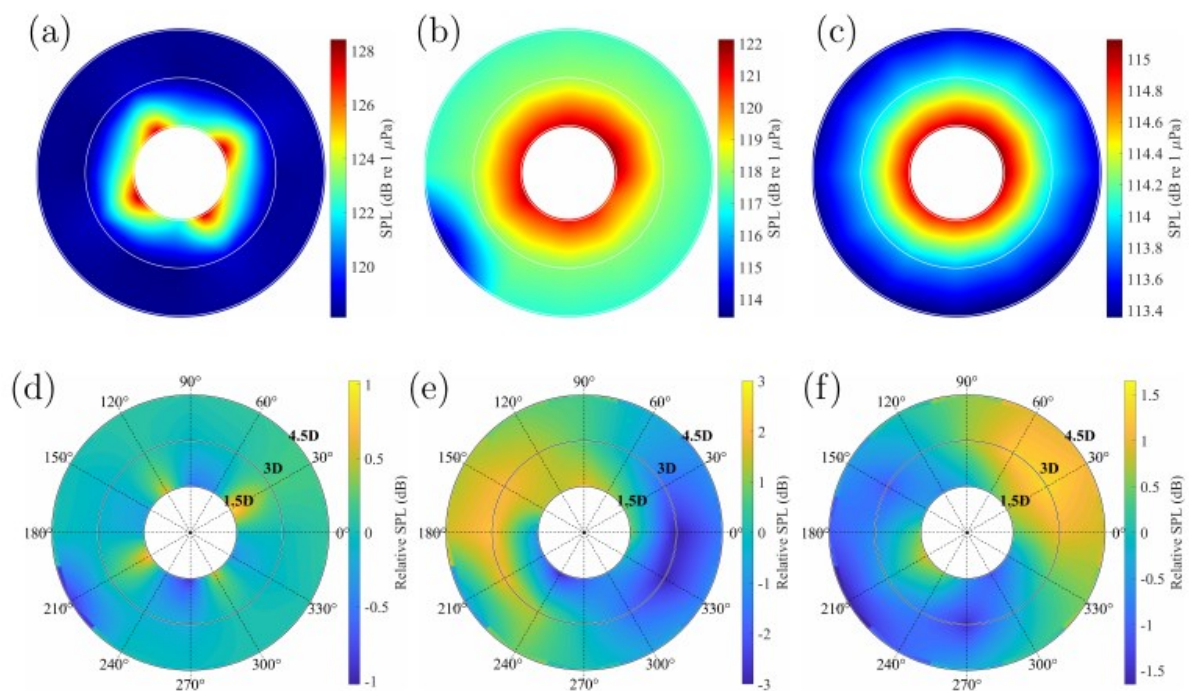


شکل ۱۰ طیف SPL برای ۱۲ زاویه جهتی (با گام ۳۰ درجه) به همراه منحنی میانگین زاویه‌ای در موقعیت $|z|/D=3$ و $r/D=4.5$.

Fig.10 The SPL spectrum for 12 azimuths (30° step) along with the angle-mean curve at $|z|/D=3$ and $r/D=4.5$.

نخستین پیک تونال مشاهده‌شده مربوط به دومین هارمونیک فرکانس عبور تیغه در حدود ۹۴ هرتز است. پیک‌های مربوط به هارمونیک‌های بعدی نیز با روندی کاهشی در پس‌زمینه ظاهر می‌شوند، به‌ترتیب در ۱۸۹، ۲۳۶، ۲۸۳ و ۳۳۶ هرتز، یعنی برای $k=3$ تا $k=6$.

با بررسی منحنی‌های ۱۲ زاویه، مشخص می‌شود که در حوالی هارمونیک دوم فرکانس عبور تیغه ($k=2$) اختلاف بین زاویه‌ها نسبتاً



شکل ۱۱ نقشه‌های قطبی در فرکانس عبور تیغه. (a)، (b)، و (c): نقشه‌های قطبی مربوط به اولین فرکانس عبور تیغه ($k=1$) در سه موقعیت محوری به ترتیب

(d)، (e)، و (f): نقشه‌های قطبی SPL نسبی برای هارمونیک‌های ($k=1, k=3, k=4$).

Fig.11 Polar maps at the BPF of the propeller. (a), (b), and (c) polar maps of the first BPF ($k=1$) at three axial levels equal to $z/D=0.0, 3.0, 5.5$, respectively. (d), (e), and (f) polar maps of relative SPL for harmonics $k=1, k=3$, and $k=4$.

صوتی همراه با افزایش فاصله، نتیجه‌ی پراکندگی هندسی و میرایی ویسکوز انرژي صوتی است.

در زیرشکل‌های (d) تا (f) توزیع‌های نسبی سطح فشار صوتی برای هارمونیک‌های $k=1, 3, 4$ نشان داده شده‌است. هارمونیک اول ساختاری مشابه فرکانس پایه دارد و بیانگر غالب بودن آن در طیف است. اما در هارمونیک‌های سوم و چهارم، الگوها نامتقارن‌تر و پراکنده‌تر هستند. این رفتار ناشی از برهم‌کنش‌های غیرخطی جریان دنباله و پرها و وجود اغتشاشات آشفته‌ی موضعی است. در مجموع، شکل ۱۱ روند گذار از تابش صوتی جهت‌دار میدان نزدیک به تابش محوری متقارن میدان دور را به‌خوبی نشان می‌دهد، همچنین کاهش دامنه‌ی هارمونیک‌های بالاتر را به‌صورت تدریجی مستند می‌کند. این نتایج با نظریه‌ی کلاسیک انتشار نویز پروانه‌ها مطابقت داشته و صحت فیزیکی مدل عددی حاضر را تأیید می‌نماید.

به‌منظور اطمینان از صحت پیش‌بینی‌های هیدروآکوستیکی، الگوهای جهت‌مندی و تغییرات هارمونیک‌ها با منابع مقایسه شدند. نتایج تحلیل طیفی که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند، تأیید می‌کنند که انرژی آکوستیکی عمدتاً در چند هارمونیک اول فرکانس عبور تیغه متمرکز است و در فرکانس‌های بالاتر به‌شدت کاهش می‌یابد. این روند در توافق خوبی با یافته‌های سزن و

در شکل ۱۱ توزیع قطبی سطح فشار صوت در فرکانس عبور تیغه و هارمونیک‌های آن در فواصل محوری مختلف نسبت به پروانه نشان داده شده‌است. شکل‌های (a) تا (c) مربوط به اولین فرکانس عبور تیغه ($k=1$) در سه موقعیت محوری $z/D=0.0, 3.0, 5.5$ هستند.

در $z/D=0$ (زیرشکل a)، الگوی سطح فشار صوتی دارای توزیعی غیریکنواخت و جهت‌دار است که بیشترین شدت آن در ناحیه‌ی نوک پرها مشاهد می‌شود. این رفتار بیانگر آن است که در ناحیه‌ی میدان نزدیک، منبع اصلی نویز ناشی از برهم‌کنش دوران پره با ورتکس‌های نوک پره است.

در فاصله‌ی $z/D=3$ (زیرشکل b)، دامنه‌ی تغییرات مکانی سطح فشار صوتی کمتر شده و ناحیه‌ی بیشینه کمی از محور پروانه فاصله گرفته است. این تغییرات ناشی از انتشار موج صوتی و اثرات تداخل فاز بخشی از امواج در طول مسیر است. به‌تدریج ساختار جهت‌دار از بین رفته و الگوی تابش به سمت میدان آکوستیکی غالب در فاصله‌ی متوسط میل می‌کند.

در $z/D=5.5$ (زیرشکل c)، توزیع سطح فشار صوتی تقریباً محوری متقارن شده و تراز شدت صوت به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این پدیده نمایانگر تابش میدان دور (Far-field) است که در آن، الگوی صدای تولیدی عمدتاً از مدهای تابش دیپولی حاصل از نیروی تناوبی بر پرها تبعیت می‌کند. کاهش تراز سطح فشار

جریان تراکم ناپذیر انجام شده است، از آنجا که کاویتاسیون نویز قابل توجهی را به ویژه در محدوده پهن باند معرفی می‌کند عدم مدل‌سازی کاویتاسیون محدودیت اصلی این پژوهش است. تحقیقات آتی با تعمیم این پژوهش به جریان‌های کاویتاسیونی و شرایط عملکردی متنوع، گام بعدی در جهت تکمیل مدل‌سازی رفتار صوتی پروانه‌های دریایی خواهد بود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله کارشناسی ارشد نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

فهرست علائم

BPF	فرکانس عبور تیغه (Hz)
C_0	سرعت صوت در سیال (m/s)
D	قطر پروانه (m)
f	فرکانس (Hz) یا تابع معرف سطح در معادلات FW-H
J	ضریب پیشروی
k	انرژی جنبشی آشفتگی
K_Q	ضریب گشتاور
K_T	ضریب تراست
l_r	نیروی وارد بر سیال در راستای بردار انتشار
M_r	عدد ماخ نسبی در راستای بردار انتشار
n	سرعت دورانی پروانه (rpm)
p	فشار استاتیک سیال (Pa)
p'	فشار آکوستیکی کل (Pa)
p'_L	نویز بارگذاری
p'_T	نویز ضخامت
Q	گشتاور پروانه (N.m)
r	فاصله بین منبع و ناظر (m)
R	شعاع دامنه محاسباتی (m)
SPL	سطح فشار صوتی (dB)
t	زمان ناظر (s)
T	نیروی تراست (N)
u_i	مولفه بردار سرعت میدان (m/s)
V	سرعت پیشروی جریان (m/s)
v_n	سرعت عمود بر سطح (m/s)
v	بردار واحد نرمال بر سطح
v_t	ویسکوزیته سینماتیکی آشفتگی
x_i	مختصات دکارتی
x	بردار موقعیت ناظر
y^+	فاصله بی‌بعد از دیواره
Z	تعداد پره‌ها
$\delta_{i,j}$	دلتای کرونگر

کیناچی [۳] است که روند مشابهی را در کاهش سطح فشار صوتی در هارمونیک‌های فرکانس عبور تیغه برای پروانه‌های دریایی در شرایط بدون کاویتاسیون گزارش کرده‌اند. نقشه‌های قطبی در شکل ۱۱ الگوی تابش دوقطبی را برای هارمونیک اول ($k=1$) نشان می‌دهند که با بیشترین شدت در جهت محوری و کمترین مقدار در صفحه پروانه مشخص شد. این رفتار با مشاهدات نظیر و همکاران [۵] و تستا و همکاران [۶] که نویز ضخامت و بارگذاری را به عنوان منابع دو قطبی اصلی در میدان نزدیک شناسایی کرده‌اند، سازگار است. با این حال مزیت متمایز مطالعه حاضر نسبت به مراجع [۳] و [۵] استفاده از آرایه هیدروفونی با چگالی بالا است. این چیدمان امکان دریافت و بررسی نقشه‌های صوتی را فراهم می‌کند که اغلب در مطالعاتی با چیدمان محدود گیرنده‌ها غیر قابل تشخیص هستند.

۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش تحلیلی جامع از عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه دریایی INSEAN E779A با بهره‌گیری از رویکرد عددی ترکیبی (URANS) کوپل شده با آنالوژی (FW-H) و آرایه هیدروفونی با چگالی بالا ارائه کرد. اگرچه چارچوب عددی به کار رفته توانمندی بالایی را در پیش‌بینی نویز انتشار یافته در زیر آب نشان داد، اما دستاورد اصلی این پژوهش بررسی و بیان الگوهای انتشار و جهت‌مندی نویز است. وابستگی جهت‌مندی نویز تونال به مرتبه هارمونیک یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش است. هارمونیک‌های پایین‌تر مانند (BPF دوم) رفتار شبه ایزوتروپیک با واگرایی زاویه‌ای حداقل از خود نشان دادند در مقابل هارمونیک‌های بالاتر (BPF سوم و چهارم) الگوهای جهت‌دار مشخص و وابستگی آزیموتال قوی‌تری را به نمایش گذاشتند. با گذار از میدان نزدیک به میدان دور، هیدروفون‌های میدان نزدیک سطوح فشار صوتی بالایی را ثبت کردند که تحت تسلط برهمکنش‌های گردابه نوک پره و تلاطم شدید بود، با افزایش فاصله از پروانه به یک الگوی تابش همگن‌تر در میدان دور مشاهده شد که ناشی از پخش هندسی و استهلاک ساختارهای آشفتگی است. جانمایی هدفمند ۱۴۴ هیدروفون نقشه‌ای با وضوح مطلوب از میدان آکوستیکی فراهم کرد و نشان داد که طیف‌های میانگین-گیری شده زاویه‌ای برای فرکانس‌های پایین قابل اعتماد است اما برای مولفه‌های تونال مرتبه بالا نیاز به تحلیل آزیموتال دارند. تحلیل طیفی بر اساس ۱۲ زاویه متفاوت نشان داد که اختلافات در هارمونیک دوم فرکانس عبور تیغه ($k=2$) نسبتاً اندک است. با این حال، در هارمونیک‌های سوم و چهارم، واگرایی زاویه‌ای افزایش می‌یابد و برخی زوایا مقادیر بالاتر یا پایین‌تر از مقدار میانگین با مقدار حداکثر ۶ دسی‌بل را نشان می‌دهند. لازم‌بذکر است که این مطالعه تحت شرایط بدون کاویتاسیون و با استفاده از فرضیات

منابع

- [9] F. Porcacchia, G. Dubbioso, R. Muscari, and C. Testa, "Effects of flow incidence on propeller underwater radiated noise," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 1, 2025. doi:10.1063/5.0214760.
- [10] S. Sezen and M. Atlar, "Marine propeller underwater radiated noise prediction with the FWH acoustic analogy Part 1: Assessment of model-scale propeller hydroacoustic performance under uniform and inclined flow conditions," *Ocean Engineering*, vol. 279, p. 114552, 2023. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.114552.
- [11] Ianniello, S. "The hydroacoustic FWH- based analysis of the E779A propeller in open water and in wake field". Marine Technology Society Journal, 50(4), 56-70, 2016.
- [12] Gaggero, S., Rizzuto, E., & Villa, D "Numerical prediction of the underwater noise of a marine propeller in wake field". Ocean Engineering, 108, 770-784, 2015.
- [13] Wei, Y., Wang, Y., & Zhu, X. "Numerical simulation of the underwater noise of a marine propeller." Journal of Hydrodynamics, 24(3), 371-377, 2012.
- [14] STAR-CCM+, "Siemens PLM Software official documentation," 2017. [Online]. Available: <https://mdx.plm.automation.siemens.com/star-ccm-plus>.
- [15] M. S. Howe, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1998. doi: 10.1017/CBO9780511551624.
- [16] F. Farassat and M. K. Myers, "Extension of Kirchhoff's formula to radiation from moving surfaces," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 123, no. 3, pp. 451-460, 1988. doi: 10.1016/S0022-460X(88)80236-8.
- [17] M. R. Bagheri, M. S. Seif, H. Mehdigholi, and O. Yaakob, "Analysis of noise behaviour for marine propellers under cavitating and noncavitating conditions," *Ships and Offshore Structures*, vol. 12, no. 6, pp. 1-8, 2017. doi: 10.1080/17445302.2017.1369334.
- [1] T. A. Smith and J. Rigby, "Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology," *Ocean Engineering*, vol. 266, p. 112863, 2022. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.112863.
- [2] J.-m. Ye, Y. Xiong, F. Li, and Z.-z. Wang, "Numerical prediction of blade frequency noise of cavitating propeller," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 24, no. 3, pp. 371-377, 2012. doi:10.1016/S1001-6058(11)60264-7.
- [3] S. Sezen and Ö. K. Kinaci, "Incompressible flow assumption in hydroacoustic predictions of marine propellers," *Ocean Engineering*, vol. 186, p. 106138, 2019. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106138.
- [4] C. Testa, F. Porcacchia, R. Muscari, and L. Greco, "Noise field properties of marine propellers in open water," *Ocean Engineering*, vol. 288, p. 116194, 2023. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.116194.
- [5] A. Nazeer, N. B. Khan, E. Uddin, M. Jameel, O. Al-Abbasi, Q. Wu, A. Munir, and H. Shahid, "Hydrodynamic and hydro acoustic analysis of marine propeller in off design flow conditions," *PLOS ONE*, vol. 20, no. 3, p. e0320435, 2025. doi:10.1371/journal.pone.0320435.
- [6] C. Testa, S. Ianniello, and F. Salvatore, "A Ffowcs Williams and Hawkins formulation for hydroacoustic analysis of propeller sheet cavitation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 413, pp. 421-441, 2018. doi:10.1016/j.jsv.2017.11.028.
- [7] M. Felli and M. Falchi, "Propeller wake evolution mechanisms in oblique flow conditions," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 845, pp. 520-559, 2018. doi:10.1017/jfm.2018.204.
- [8] F. Salvatore, F. J. Alves Pereira, M. Felli, D. Calcagni, and F. Di Felice, "Description of the INSEAN E779A propeller experimental dataset," *Zenodo*, 2006. doi:10.5281/zenodo.51444.