

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1402.9.2.5.2

درصد همانندی: ۱۰٪

تأثیر سطح مقطع داکت بر کاهش نوفه صوتی تولیدشده به وسیله پروانه‌های دریایی با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی

ولی‌اله علی‌زاده^۱، مجید عباسپور^۲، افشین محسنی آراسته^۳، کامران لاری^۴، مسعود توایی آزاد^۵

valiollahalizadeh1400@gmail.com

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

abbpor@sharif.edu

^۲ نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

am.arasteh@gmail.com

^۳ دانشیار گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

k_lari@iau-tnb.ac.ir

^۴ دانشیار گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

m_azad@iau-tnb.ac.ir

^۵ استاد گروه فیزیک دریا، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷

چکیده

انتشار نوفه صوتی شناورها، آسیب‌های زیست‌محیطی بسیاری دارد و کاهش آن ممکن است سبب کاهش یا حذف برخی از این آثار زیان‌بار شود. از این رو شناخت منابع تولید نوفه صوتی و بررسی راه‌کارهای کاهش آن اولین قدم در حذف این آثار زیان‌بار است. مطالعات بیانگر آن است که پروانه کشتی‌ها، یکی از منابع اصلی تولیدکننده نوفه صوتی در شناورهای تجاری است. یکی از راه‌کارهای شناخته‌شده کاهش نوفه صوتی منتشره از پروانه، قراردادی داکت پیرامون پروانه است. در مقاله پیش‌رو، در ابتدا روابط ریاضی حاکم بر انتشار نوفه صوتی در میدان بررسی شده است و در ادامه ضمن معرفی یک هندسه ابتدایی برای پروانه داکت‌دار شتاب‌دهنده، کاهنده و ثابت، محاسبات عددی لازم برای برآورد سطح فشار صوت در فاصله مشخصی از پروانه، با استفاده از معادله‌های فاکس ویلیامز هاو کینگز انجام شده است. در نهایت با انجام آزمایش و فیلتر نمودن نوفه صوتی محیطی نتایج حل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است که در روش عددی سطح فشار صوت محاسبه شده در فرکانس‌های معین برای پروانه‌های داکت‌دار حدود ۲۸ درصد کمتر از پروانه بدون داکت و سطح فشار صوت محاسبه شده با استفاده از روش آزمایشگاهی با فیلتر نمودن نوفه صوتی محیطی در حدود ۳۷ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: نوفه صوتی، پروانه داکت‌دار، معادله‌های فاکس ویلیامز هاو کینگز، موجک دابیشز، حل عددی، تست آزمایشگاهی

۱. مقدمه

نوفه صوتی، سیگنال‌های امواج صوتی است که ممکن است آرامش انسان یا کارایی یک سیستم را مختل سازد. به‌عنوان مثال، صدای حرکت و بوق ماشین‌ها در خیابان، صدای ناشی از پرواز هواپیماها، صدای آژیر آمبولانس و... نوفه‌های صوتی هستند که به‌صورت روزمره شنیده می‌شود. شدت و ضعف این صداها به فاصله منبع و فرکانس صدای تولیدی بستگی دارد. در اقیانوس‌ها و دریاها به نوفه صوتی به گونه دیگری نگریسته می‌شود. تقریباً تمامی صداهای تولیدشده از منابع طبیعی و انسانی در زیر آب برای جانوران دریایی، صدایی آزاردهنده محسوب می‌شود و می‌تواند اثرات نامطلوبی به همراه داشته باشد [۱].

در حقیقت هر عاملی که سبب حرکت مولکول‌های سیال و نوسان فشار شود، باعث ایجاد موج آکوستیکی و نوفه صوتی در محیط سیال می‌شود. بنابراین حرکت یک جسم در سیال سبب تولید نوفه صوتی خواهد شد. از این رو حرکت کشتی‌ها به دلیل نوسانات فشاری که در اطراف بدنه آن‌ها ایجاد می‌شود و نیز ارتعاشات ناشی از ماشین‌آلات، سبب ایجاد نوفه صوتی در دریا می‌شود. منابع تولید نوفه صوتی در کشتی‌ها شامل سه دسته زیر است:

۱. نوفه صوتی ایجادشده توسط پروانه کشتی؛
۲. نوفه صوتی تولیدشده توسط موتورخانه و ماشین‌آلات؛
۳. نوفه صوتی ناشی از حرکت بدنه کشتی درون آب.

در این بین مهم‌ترین بخش نوفه صوتی کشتی‌ها، نوفه صوتی پروانه است. نوفه صوتی پروانه به وقوع یا عدم وقوع کاویتاسیون بستگی خواهد داشت. نوفه صوتی ناشی از کاویتاسیون آن‌قدر شدید است که بر سایر نوفه‌های صوتی پروانه و حتی تمام نوفه‌های صوتی هیدروآکوستیک کشتی غلبه می‌کند. در سرعت‌های پایین می‌توان از کاویتاسیون جلوگیری کرد اما در سرعت‌های بالا کاویتاسیون رخ می‌دهد. کاویتاسیون قابلیت تولید نوفه‌های صوتی دارد که ممکن است 10dB بزرگ‌تر از نوفه صوتی ماشین‌آلات و سایر نوفه‌های صوتی باشد [۲].

نوفه صوتی پروانه کشتی‌ها چهار منشأ اصلی دارد:

۱. جابه‌جایی آب پره‌های پروانه (نوفه صوتی ضخامتی)؛
۲. اختلاف فشار در سطح پشت و جلوی پروانه ناشی از مقطع ایرفویل شکل پره‌ها (نوفه صوتی بارگذاری)؛
۳. نوسانات پریودیک حجم حباب‌های ایجادشده روی پره‌ها در اثر کاویتاسیون صفحه‌ای؛
۴. متلاشی شدن حباب‌های کاویتاسیون.

در این بین موارد اول و دوم برای همه پروانه‌ها و در هر شرایطی (کاویتاسیونی یا غیر کاویتاسیونی) وجود خواهد داشت در صورتی که موارد سوم و چهارم فقط برای پروانه‌هایی که دچار کاویتاسیون می‌شوند، سبب تولید نوفه صوتی خواهد شد. در شکل ۱ محدوده فرکانسی مربوط به هر یک از عوامل مهم و عمده تولید نوفه صوتی در شناورها مشاهده می‌شود. شکل ۱ نشان می‌دهد که فرکانس مربوط به منابع مکانیکی از ۱۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز گسترده است؛ در حالی که فرکانس نویزهای مربوط به کاویتاسیون پروانه از ۱۰ کیلوهرتز هم بیشتر می‌شود [۳].

پیش‌نیاز تحلیل هیدروآکوستیک، بررسی‌های هیدرودینامیکی جریان حول داکت-پروانه است. پروانه داکت‌دار شامل یک پروانه است که با هیدروفویل حلقوی احاطه شده و به‌عنوان یکی از سیستم‌های رانش استفاده می‌شود. داکت اطراف پروانه سبب تقویت نیروی جلوبرنده می‌شود؛ بنابراین یک پروانه کوچک‌تر درون داکت می‌تواند به اندازه یک پروانه بزرگ‌تر در جریان آزاد نیرو تولید کند. ایده پوشیده کردن پروانه‌ها نه تنها از پروانه‌ها در برخورد با اشیاء در ارتفاع کم محافظت می‌کند، بلکه سبب افزایش امنیت محیط زیست می‌شود، نیروی تراست تولیدشده توسط داکت به شکل و شرایط عملکرد آن بستگی دارد. این نیرو می‌تواند هم جهت یا خلاف جهت تراست تولیدشده به وسیله پروانه باشد؛ بنابراین در اثر وجود داکت، سرعت در صفحه پروانه می‌تواند نسبت به یک پروانه متداول با قطر و سرعت پیشروی مشابه، افزایش یا کاهش یابد [۴].

میزان تأثیرگذاری داکت بر کاهش نوفه صوتی انتشاری از پروانه مبهم است. در این مقاله، تلاش شده تا قبل و پس از قرارگیری داکت، از طریق حل عددی معادله‌های حاکم بر نوفه صوتی انتشاری از پروانه و انجام آزمایش سطح فشار صوت مشخص شود.

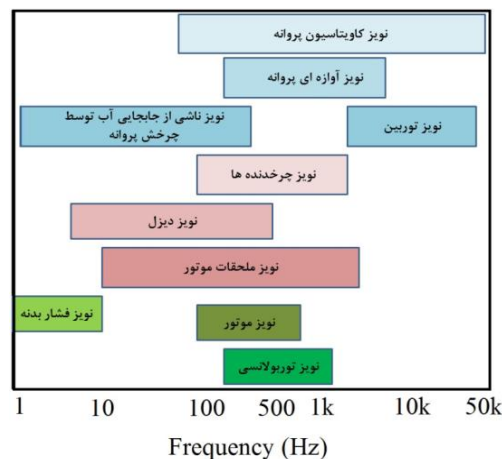
براین اساس، در دنیا دانشمندان و محققان بسیاری در راستای ثبت و تحلیل نوفه صوتی گام برداشته‌اند. در جدول ۱ مرور اجمالی پژوهش‌های صورت پذیرفته در دنیا ارائه شده است.

همچنین در صورت بروز مشکل برای پره‌ها یا جدا شدن آن‌ها، داکت می‌تواند به‌عنوان یک محافظ عمل کند. استفاده از داکت اطراف پروانه آلودگی‌های صوتی را نیز کاهش می‌دهد. هرچند تعداد زیاد پره‌ها، صدای زیادی با فرکانس بالا تولید می‌کند، اما میرایی این صدا در هوا با فاصله بسیار بیشتر است.

هرچند داکت‌ها با اصلاح جریان ورودی به پروانه، توزیع فشار مناسب را در جریان پیرامون پروانه ایجاد می‌کنند، اما

جدول ۱. مرور اجمالی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه اندازه‌گیری کاویتاسیون و نوفه صوتی

پژوهشگران	سال	خلاصه پژوهش
گاگر و همکاران [۵]	۲۰۱۴	یک پروانه را در دریا آزمایش کردند و نوفه صوتی آن را با نتایج به‌دست‌آمده از روابط تجربی مقایسه کردند.
کوب [۶]	۱۹۷۷	روند آزمایش هیدروآکوستیکی را برای تونل کاویتاسیون HSVA آلمان ارائه کرد.
لگات [۷]	۱۹۸۴	نوفه صوتی کاویتاسیونی یک پروانه را در یک دریاچه آکوستیکی اندازه‌گیری کرده‌اند.
آبوت و همکاران [۸]	۱۹۹۳	مشخصات آکوستیکی تونل کاویتاسیون بزرگ مرکز سطحی نظامی دریایی را بررسی کردند.
سئول و پارک [۹]	۲۰۰۷	نوفه صوتی یک مدل پروانه را در تونل کاویتاسیون اندازه‌گیری کردند و مقادیر آن را در فرکانس‌های عبوری پره با روش عددی مقایسه کردند.
تانی و همکاران [۱۰]	۲۰۱۵	نوفه صوتی دو مدل پروانه را در تونل کاویتاسیون و در مقیاس واقعی اندازه‌گیری کردند.
کوالچیک و همکاران [۱۱]	۲۰۱۶	نوفه صوتی یک پروانه را به دو روش تجربی و عددی (روش حجم محدود) اندازه‌گیری کردند.
ساتیاوارما و همکاران [۱۲]	۲۰۰۲	در مطالعه‌ای عددی، نویز غیر کاویتاسیونی یک مدل سه‌بعدی از پروانه دریایی را بررسی کردند.
موساد و همکاران [۱۳]	۲۰۱۱	متدلوژی و روشی محاسباتی بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی نویز حول پروانه ایجاد کردند.
جی سانگ ژانگ و همکاران [۱۴]	۲۰۱۴	نویز غیر کاویتاسیونی حول پروانه‌ای با سه پره با دو روش آزمایشگاهی و عددی را بررسی کرد.
فیلی و فلاچی و دایسو [۱۵]	۲۰۱۵	بررسی آزمایشگاهی برای تشخیص مشکلات نوفه صوتی در پروانه دریایی



شکل ۱. محدوده فرکانسی برای نوفه‌های صوتی انتشار یافته از شناور

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معادله‌های حاکم بر انتشار نوفه صوتی

انتشار صوت همانند سایر پدیده‌های فیزیکی معادله‌هایی دارد که به کمک آن می‌توان نحوه انتشار صوت را با توجه به عوامل مختلف مشخص کرد. لایتیل در سال ۱۹۵۴، معادله کلی تولید صوت ناشی از تنش برشی سیال را استخراج کرد. او در این تحقیق تئوری تولید صوت آئرو دینامیکی را برای نوفه صوتی حاصل از انتشار جت در هوا ارائه کرد و نشان داد که صوت تولیدی توسط آشفتگی سیال را می‌توان با توجه به نوسانات سرعت سیال به دست آورد [۱۶].

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \nabla \cdot [\nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot \sigma + \nabla P - C^2 \nabla P] \quad (1)$$

این رابطه در مباحث آئرو آکوستیک به نام معادله لایتیل شناخته می‌شود. این معادله یک معادله موج ناهمگن است که سمت چپ آن معادله موج بوده و رابطه خطی انتشار امواج در یک محیط همگن با سرعت C را بیان می‌کند و به صورت زیر نیز قابل بازنویسی است:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = (\nabla \otimes \nabla) : [\rho V \otimes V - \sigma + (P - c^2 \rho) I] \quad (2)$$

در سمت راست این معادله، علامت II نشان‌دهنده تانسور مشخصه^۱ است. همچنین، عبارت داخل کروشه به عنوان تانسور تنش آشفتگی لایتیل^۲ شناخته می‌شود و با T نمایش داده می‌شود. مطابق نوتاسیون اینشتین، معادله لایتیل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3)$$

$$T_{ij} = \rho V_i V_j - \sigma_{ij} + (P - c^2 \rho) \delta_{ij}$$

معادله لایتیل با این فرض به دست آمده است که هیچ نوع صفحه صلبی در مسیر جریان وجود ندارد یا از اثرات آن چشم‌پوشی می‌شود. در اکثر مسائل آکوستیک، صفحات صلب واقع شده در مسیر جریان سیال اثرات بسیار مهمی بر

نوفه صوتی تولید شده دارند. درک این واقعیت در تحلیل صحیح نوفه صوتی پروانه‌ها و فن‌ها بسیار مهم و حیاتی است. با توجه به این موضوع، ویلیامز و هاو کینگز روابط ساده شده بخش قبل را برای حالت وجود صفحات صلب توسعه دادند. معادله‌های ارائه شده توسط این پژوهشگران در علم آکوستیک به مدل FW-H^۳ معروف شده است. نخستین گام در رسیدن به این مدل، توسعه معادله لایتیل برای فضای نامحدودی است که با یک سری از صفحات ریاضی به بخش‌های مختلف تقسیم شده است. شکل ۲، میدان Ω که با صفحه Γ احاطه شده، توسط صفحه Γ_{12} به دو ناحیه ۱ و ۲ تقسیم شده است. فرض می‌شود صفحه Γ_{12} با سرعت V درون ناحیه ۲ حرکت می‌کند.

به دلیل ناپیوستگی که در محل صفحه Γ_{12} به وجود آمده است، معادله‌های پیوستگی و مومنتوم به ترتیب به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \rho v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j + \bar{P}_{ij})}{\partial x_i} = P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (5)$$

در رابطه بالا، v_i سرعت صفحه و f تابع نمایش‌دهنده وجود صفحه است. طبق قرارداد، ناحیه داخل صفحه با $f > 0$ مشخص می‌شود. همچنین، $\delta(f)$ تابع دلتای یک‌بعدی است که روی صفحه ($f = 0$) مقدار آن ۱ و خارج از صفحه مقدار آن صفر است.

با تغییر متغیر به نوسانات چگالی ρ' ، معادله FW-H به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \bar{T}_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}] \quad (6)$$

با کم کردن $\partial^2 \bar{p} / \partial x_i \partial x_i$ از دو طرف رابطه، شکل عمومی معادله FW-H حاصل می‌شود:

$$\nabla^2 \bar{p} = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_n \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [I_i \delta(f)] + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (7)$$

است. این ترم از حرکت غیرپایا توزیع نیرو روی سطح جسم ایجاد می‌شود. ترم سوم $p_Q(x, t)$ معادل نویز کوادپول است. معادله (۹) بیان‌کننده فشار نوسانی آکوستیک است که با منبع نویز مونوپل رابطه دارد. معادله (۱۰) رابطه با منبع دپول دارد و معادله (۱۱) بیان‌کننده فشار نوسانی آکوستیک در زمان t و مکان x است [۱۸].

که $H(f)$ تابع هیوساید است. سپس با استفاده از تابع گرین فضای آزاد، فشار صوت در محل محاسبه و شدت صوت به‌عنوان نسبت فشار سیال به فشار مینا تعریف می‌شود [۱۷].

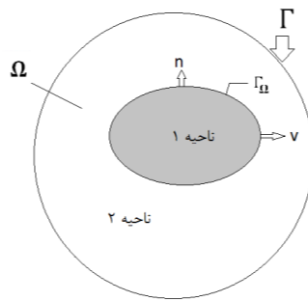
$$\dot{p}(x, t) = \dot{p}_T(x, t) + \dot{p}_L(x, t) + \dot{p}_Q(x, t) \quad (8)$$

$\dot{p}_T(x, t)$ بیان‌کننده ترم مونوپل^۴ است. این ترم جابه‌جایی سیال از روی بدنه جسم را بیان می‌کند. $\dot{p}_L(x, t)$ ترم دپول

$$4\pi\dot{p}_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0(\dot{v}_n + v_n)}{r|1 - M_r|^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 v_n (r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2|1 - M_r|^3} \right] dS \quad (9)$$

$$4\pi\dot{p}_L(x, t) = \frac{1}{c} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{l}_r}{r|1 - M_r|^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{l_r - l_M}{r|1 - M_r|^2} \right] dS + \frac{1}{c} \int_{f=0} \left[\frac{l_r (r\dot{M}_r + cM_r - cM^2)}{r^2|1 - M_r|^3} \right] dS \quad (10)$$

$$4\pi\dot{p}_Q(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*)}{r|1 - M_r|^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*) \dot{M}_i \hat{r}_i}{r|1 - M_r|^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*) c_0 (M_r - M^2)}{r^2|1 - M_r|^3} \right] dS \quad (11)$$



شکل ۲. تقسیم ناحیه Ω به دو ناحیه ۱ و ۲

همچنین برای مدل‌سازی داکت، از داکت 19A واگنینگن استفاده شده است [۱۹]. این داکت نسبت به داکت‌های دیگر سری واگنینگن از نظر طراحی و ساخت ساده شده است، به همین دلیل این داکت اغلب مورد استفاده طراحان قرار می‌گیرد. برای تعیین طول داکت و فاصله نوک پروانه از سطح داخلی داکت، نسبتی از قطر پروانه در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مختصات پروفیل داکت (سطح مقطع جانبی نسبت به طول داکت) ذکر شده است [۲۰].

برای ایجاد هندسه داکت، قطر پروانه ۱۲۵/۰ متر و طول داکت ۶۲۵/۰ متر لحاظ شد.

۲-۲. مدل‌سازی و روش حل مسئله

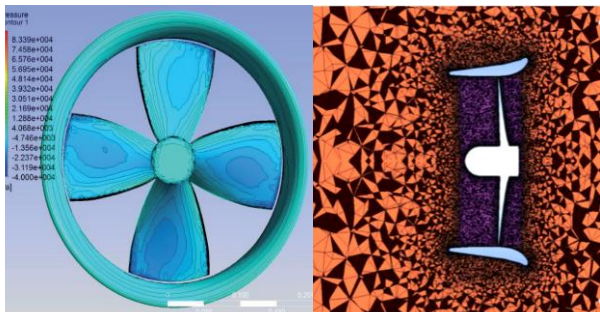
به‌منظور تسریع در روند انجام مطالعات و امکان تکرار آزمایش توسط سایر آزمایشگاه‌های مرجع، پروانه مورد مطالعه از سری کاپلان (Ka4-70) مطابق با مشخصات گفته شده در جدول ۲ انتخاب شد.

جدول ۲. مشخصات هندسه پروانه برای تحلیل عددی و تست آزمایشگاهی

Parameter	Value
Propeller Diameter	$D_p = 0.125(\text{mm})$
Pitch-diameter ratio	$P/D = 0.8$
Expanded Area Ratio (EAR)	$P/D = 0.7$
Propeller type	Kaplan (Ka)

جدول ۳. مختصات هندسی پروفیل داکت 19A واگینگن جهت تحلیل عددی و تست آزمایشگاهی

X/L	۰	۰.۱۲۵	۰.۲۵	۰.۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۹۵	۱
Yg/L	۰.۲۰۲	۰.۲۲۶	۰.۲۳	۰.۲۲۸	۰.۲۲۰	۰.۲۰۵	۰.۱۹	۰.۱۷۴	۰.۱۵۹	۰.۱۴۴	۰.۱۲۹	۰.۱۱	۰.۰۹۸	۰.۰۹۱	۰.۰۸۳
Yd/L	۰.۲۰۲	۰.۱۶۶	۰.۱۴۸	۰.۱۲۲	۰.۰۸۳	۰.۰۴۱	۰.۰۲۴	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲۲	۰.۰۲۸	۰.۰۳۴	۰.۰۳۸	۰.۰۴۳

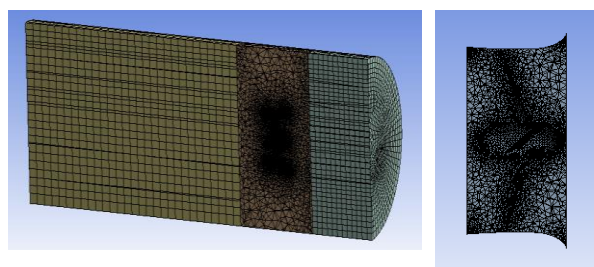
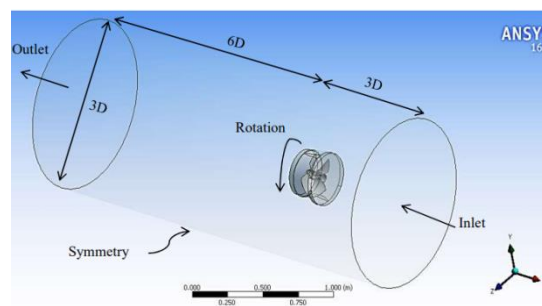


شکل ۴. مدل‌سازی و شبیه‌سازی از هندسه سه‌بعدی داکت و پروانه سری کاپلان

از سرعت ثابت یکنواخت و فشار نسبی به ترتیب به‌عنوان شرایط مرزی ورودی و خروجی، سرعت زاویه‌ای متغیر با ضریب پیشروی برای دامنه محاسباتی چرخشی حول مرکز پروانه و شرط مرزی تقارن برای دیواره جانبی لحاظ شد. همچنین، برای شبکه محاسباتی میدان چرخشی و ثابت، شبکه‌بندی غیرهم‌ساختار انتخاب شد [۲۱].

به‌منظور استقلال از شبکه طبق جدول ۴، ضرایب هیدرودینامیکی (تراست، گشتاور و راندمان) به ازای افزایش تعداد شبکه محاسبه و آزمایش شده است. در ابتدا تعداد شبکه ۱/۷ میلیون سلول در نظر گرفته شده با این تعداد مش، خطای نتایج عددی ضرایب تراست و گشتاور با نتایج سلول‌ها از ۱/۷ به ۲/۳ میلیون افزایش یافت. در این شرایط، مقادیر ضرایب تراست و گشتاور به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شد. به‌منظور در نظر گرفتن استقلال شبکه، ضرایب تراست و گشتاور برای سه مجموعه شبکه در نظر گرفته شد. شبکه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب شامل ۱/۷، ۲/۴ و ۳/۲ میلیون مش است. در این مجموعه از شبکه‌ها، مقادیر ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی ۱، $J=$ و ضرایب پیشروی ۰.۳، $J=$ طبق جدول زیر بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده میزان خطای زیاد شبکه‌بندی ۱ نسبت به شبکه‌بندی ۲ و ۳ است و در ادامه به دلیل کاهش زمان حل مسئله و عدم تغییرات ضرایب

دامنه محاسباتی، مطابق شکل‌های ۳ و ۴، به دو قسمت دامنه چرخشی و ثابت حول پروانه داکت‌دار تقسیم شده است. انتخاب دامنه چرخشی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه محاسباتی و همگرایی مسئله داشته باشد. در این پژوهش دامنه ثابت و چرخشی حول پروانه به شکل استوانه در جهت محور مختصات x انتخاب شده است. همچنین دامنه چرخشی حول پروانه، مماس بر سطح داخلی داکت رسم شده است. با توجه به مختصات کارترین انتخاب شده، مرکز چرخش سیستم مختصات $(0,0,0)$ روی محور مرکزی پروانه کاپلان واقع شده است. قطر و طول دامنه استوانه‌ای شکل ثابت، معادل سه برابر قطر پروانه و در جهت مثبت محور x و $6D$ در جهت منفی محور x نسبت به مرکز سیستم مختصات رسم شده است.



شکل ۳. دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی مورد استفاده

تراست و گشتاور در شبکه‌بندی ۲ نسبت به ۳ ادامه محاسبات مطابق با شبکه‌بندی ۲ صورت پذیرفت. تعداد کل شبکه محاسباتی ۲/۳ میلیون شبکه که از این تعداد ۶۰ درصد شبکه

به میدان چرخشی و ۴۰ درصد شبکه به میدان ثابت اختصاص داده شده است.

جدول ۴. شبکه‌بندی مورد نیاز برای استقلال شبکه

ضریب پیشروی ۱. J=					
ردیف	شماره گذاری شبکه	ضریب تراست	ضریب گشتاور	خطای ضریب تراست	خطای ضریب گشتاور
۱	نتایج آزمایشگاهی	۰/۳۲۱	۰/۲۷۷	--	--
۲	شبکه‌بندی ۱	۰/۲۹۳	۰/۳۱۵	۸/۷۲	۱۳/۰۷
۳	شبکه‌بندی ۲	۰/۳۱۰	۰/۲۹۵	۳/۴۳	۶/۴۹
۴	شبکه‌بندی ۳	۰/۳۱۰	۰/۲۹۵	۳/۴۳	۶/۴۹
ضریب پیشروی ۳. J=					
۱	نتایج آزمایشگاهی	۰/۲۳۱	۰/۲۵۱	--	--
۲	شبکه‌بندی ۱	۰/۲۰۵	۰/۲۷۲	۱۱/۲۵	۸/۳۶
۳	شبکه‌بندی ۲	۰/۲۲۰	۰/۲۶۵	۴/۷۶	۵/۵۷
۴	شبکه‌بندی ۳	۰/۲۲۹	۰/۲۲۶۸	۴/۷۶	۵/۵۷

توسط mesh cutoff frequency indicator بررسی می‌شود و در صورتی که شبکه‌بندی محدوده فرکانسی مورد نظر را پوشش دهد به ادامه حل مسئله با مدل گذرا و مدل توربولانسی LES می‌پردازیم که این مدل توربولانسی تا حد بسیار خوبی، جریان مغشوش اطراف پروانه را که نویز در آنجا در حال وقوع و شکل‌گیری است را مدل می‌کند. در پایان نیز با در نظر گرفتن مدل آکوستیکی FW-H برای دیدن انتشار صوت در میدان دور دست و قرار دادن هیدروفون‌های مورد نظر، سطح فشار صوت را ثبت می‌کنیم.

۲-۳. ساخت مدل پروانه

با توجه به نقش مهم پروانه در رفتار شناورهای دریایی از نظر راندمان هیدرودینامیکی، سرعت، قابلیت مانور و سایر پارامترها، دستیابی به دانش فنی فناوری ساخت پروانه‌ها را می‌توان به‌عنوان یکی از مباحث کلیدی و تأثیرگذار در فرایند طراحی شناورهای دریایی محسوب نمود.

فولاد و بعضی دیگر از آلیاژهای فلزی همچون آلایاژهای آلومینیوم و مس سال‌هاست در ساخت سازه‌های دریایی و پروانه‌های شناور استفاده می‌شوند. از طرف دیگر دریا شرایط

در این تحلیل از یک رایانه ۱۶ هسته‌ای محاسباتی استفاده شده است. گسسته‌سازی معادل‌ها در روش حجم محدود از مرتبه دوم و با به‌کارگیری الگوریتم آپ ویند مرتبه دوم صورت گرفته است. برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. مدل‌سازی مورد استفاده در این مقاله $k-\omega$ SST است. زیرا در نزدیکی دیواره با استفاده از مدل $k-\omega$ و در دور از دیواره‌ها با استفاده از مدل $k-\epsilon$ می‌توان مناسب‌ترین پاسخ را به دست آورد. یکی از مشکلات این روش زمان حل بالاست. نکته قابل توجه در حل انتخاب گام زمانی مناسب و تعداد تکرارهای مناسب برای حل دقیق جواب‌هاست. این گام زمانی معادل 10^{-6} برای حل معادله‌هاست [۲۲].

به‌منظور تحلیل هر چه دقیق‌تر نویز غیر کاویتاسیونی پروانه باید روند مشخصی را طی کرد و شناخت کافی نسبت به صورت مسئله داشت. نویز غیر کاویتاسیونی پروانه‌های مغروق در محدوده نویزهای فرکانس پایین قرار می‌گیرد. در این مسئله ابتدا با انجام یک تحلیل پایه منابع ایجاد نویز با مدل‌های Proudman و Curl را که از مدل‌های نویز پهن باند هستند، بررسی می‌کنیم و سپس این دو مدل فرکانس صوتی

کاویتاسیون و تجهیزات آزمایش را نشان می‌دهد. در این تونل، برای ثبت نوفه صوتی، جریان آب با سرعت مشخص از پروانه عبور نموده و در آن سرعت، پروانه در دورهای مختلف به چرخش در آمد [۲۴].



شکل ۶. تونل کاویتاسیون و تجهیزات مورد آزمایش

مطابق شکل ۷، هیدروفون‌ها در هنگام انجام آزمایش در فاصله ۳۳ سانتی متری از پروانه نصب می‌شود که نتایج سطح فشار صوت پس از استفاده از معادلات انتقال مطابق با روش عددی به فاصله ۱ متری برای مقایسه این دو روش تبدیل می‌شود.



شکل ۷. موقعیت هیدروفون در تونل کاویتاسیون

خاصی دارد. وجود رطوبت بالا، درجه حرارت متغیر و گاهی بالا، وجود شوری و یون‌های خورنده و سرعت و تلاطم آب زمینه بسیار مناسبی برای افزایش شدت حملات خوردگی بر انواع سازه‌های دریایی و به‌ویژه سازه‌های فلزی را فراهم می‌نماید.

از سوی دیگر، جنس یک پروانه بر نوفه صوتی منتشره از آن مؤثر است. نوفه صوتی ناشی از دو پروانه با خواص فیزیکی متفاوت، در شرایطی که هندسه دو پروانه یکسان باشند، متفاوت از یکدیگر خواهد بود. شرایط ارتعاشی متفاوت پره‌ها و ضریب نفوذ متفاوت نوفه صوتی برای دو ماده از جمله علل این موضوع خواهد بود.

بر این اساس ابتدا یک میلگرد ریختگی از آلیاژ نیکل آلومینیوم برنز با استفاده از روش ریخته‌گری ماسه‌ای تهیه شد، سپس مطابق نقشه عملیات ماشین‌کاری توسط دستگاه CNC پنج محور روی آن اجرا شد. خروجی نهایی مدل پروانه با قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر مطابق با پروانه اصلی بود. این مدل عاری از هرگونه خلل فرج ناشی از انحلال اکسیژن در زمان ریخته‌گری یا ضربه هنگام ساخت بود. شکل ۵ نمایی از مدل پروانه ساخته شده را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۵. مدل پروانه منطبق با پروانه اصلی

۲-۴. ثبت نوفه صوتی در تونل کاویتاسیون

فرایند ثبت نوفه صوتی، در تونل کاویتاسیون با طول کلی ۸/۷ و ارتفاع ۳/۲۵ متر و بخش آزمون با مقطع به طول و عرض ۳۰ سانتی‌متر انجام گرفت. هیدروفون Reson Tc 4042 با دریافت امواج صوتی و تبدیل آن به جریان الکتریسته، امکان تجزیه و تحلیل آن‌ها را فراهم می‌سازد. شکل ۶، نمایی از تونل

بسط لاگرانژ را می نویسیم:

$$\begin{matrix} 1 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ -0.625 & 0 & 0.526 & 1 & 0.526 & 0 & -0.625 \\ \vdots \end{matrix} \quad (12)$$

ماتریس P را به صورت زیر تعریف می کنیم:

P ماتریس ضرایب خط N+1 ام بسط لاگرانژ خواهد بود.

$$P(N) = [C_{[4*(N-1)+3]} \quad C_{[4*(N-1)+2]} \quad \dots \quad C_1] \quad (13)$$

ماتریس R را به صورت زیر تعریف می کنیم:

R ریشه های معادله چند جمله ای است که ضرایب آن P باشد.

$$C_{[4*(N-1)+3]}X^{[4*(N-1)+2]} + C_{[4*(N-1)+2]}X^{[4*(N-1)+1]} + \dots + C_1 = 0$$

$$R = [x_0 \quad x_1 \quad \dots \quad x_m] \quad (14)$$

ماتریس r را با شرط زیر تعریف می نمایم:

$$C = \{x \in R, x \leq 1\} \Rightarrow r = |C| \quad (15)$$

ماتریس ضرایب D را به صورت زیر تعریف می نمایم:

$$D = [r \quad \overbrace{-1 \quad -1 \quad \dots \quad -1}^N] \quad (16)$$

ماتریس w برابر بخش حقیقی ریشه های چند جمله ای است که ضرایب آن اعضاء ماتریس D هستند. حال ماتریس Co را به صورت زیر تعریف می نمایم:

$$Co = \frac{w}{\text{sum}(w)} \quad (17)$$

حال فیلتر پایین گذر و بالا گذر را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$F_{Low} = wrev\left(\frac{Co}{RMS(Co)}\right),$$

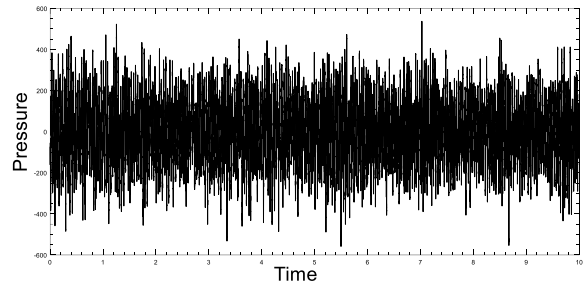
$$RMS(Co) = \sqrt{\sum_i (Co_i)^2} \quad (18)$$

$$F_{High} = wrev(H),$$

$$H = [H_j \quad H_{j-1} \quad \dots \quad H_1]$$

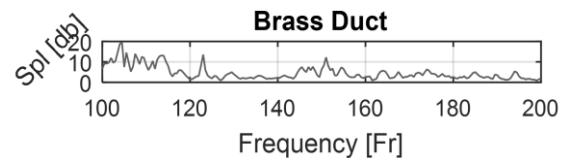
$$H_k = \frac{(-1)^{k+1} Co_{2*N-k+1}}{RMS(Co)}$$

مطابق شکل ۸، در هنگام انجام آزمایش، به صورت پیش فرض، نوفه صوتی، توسط هیدروفون ها در بستر زمان ثبت شد.



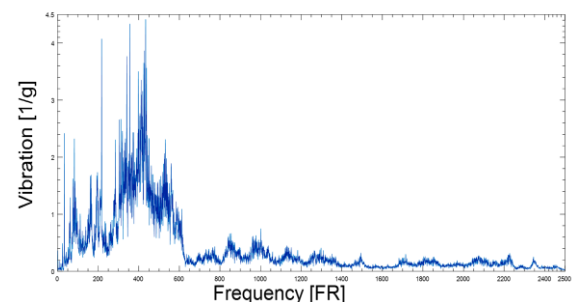
شکل ۸. سیگنال فشار-زمان

همچنین مدار پردازنده دستگاه، با اعمال تبدیل فوریه بر سیگنال خروجی، نوفه صوتی در فرکانس های مختلف را ارائه می نماید. شکل ۹، سیگنال نوفه صوتی را در فرکانس های مختلف نشان می دهد.



شکل ۹. سیگنال سطح فشار صوت-فرکانس

در زمان فعالیت هریک از دستگاه ها به صورت مجزا (شامل روتور پروانه و پمپ سیرکولاسیون تونل کاویتاسیون) و در هنگام انجام آزمایش، از ارتعاش سنج برای ثبت ارتعاشات اجرام متحرک استفاده شد. شکل ۱۰، سیگنال ارتعاش روتور در هنگام عملکرد مجزا در مدار را نشان می دهد.



شکل ۱۰. سیگنال ارتعاش روتور

با استفاده از معادله های Wavelet می توان موجک را (بر حسب فرمول بندی های مختلف) روی سیگنال تا سطح دلخواه پیاده نمود. [۲۵، ۲۶]

بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} \text{Approximate} &= F_{\text{Low}} \otimes F(t \text{ Or } Fr) \quad (2:2:m+M-1) \\ \text{Detail} &= F_{\text{High}} \otimes F(t \text{ Or } Fr) \quad (2:2:m+M-1) \end{aligned} \quad (21)$$

در فرکانس‌های مشخصه شناسایی شده برای هر دستگاه، سطح صوت به صورت ترکیبی از سطح صوت پروانه و سطح صوت سایر تجهیزات شناسایی شد. بنابراین با استفاده از فیلتر دایبچز (با مراتب مختلف)، سطح صوت تجهیزات حذف شد. شکل ۱۱، سیگنال نوفه صوتی به همراه مجموعه‌ای از سیگنال‌های سازنده آن را که با فیلتر دایبچز تفکیک شده‌اند؛ نشان می‌دهد [۲۷].

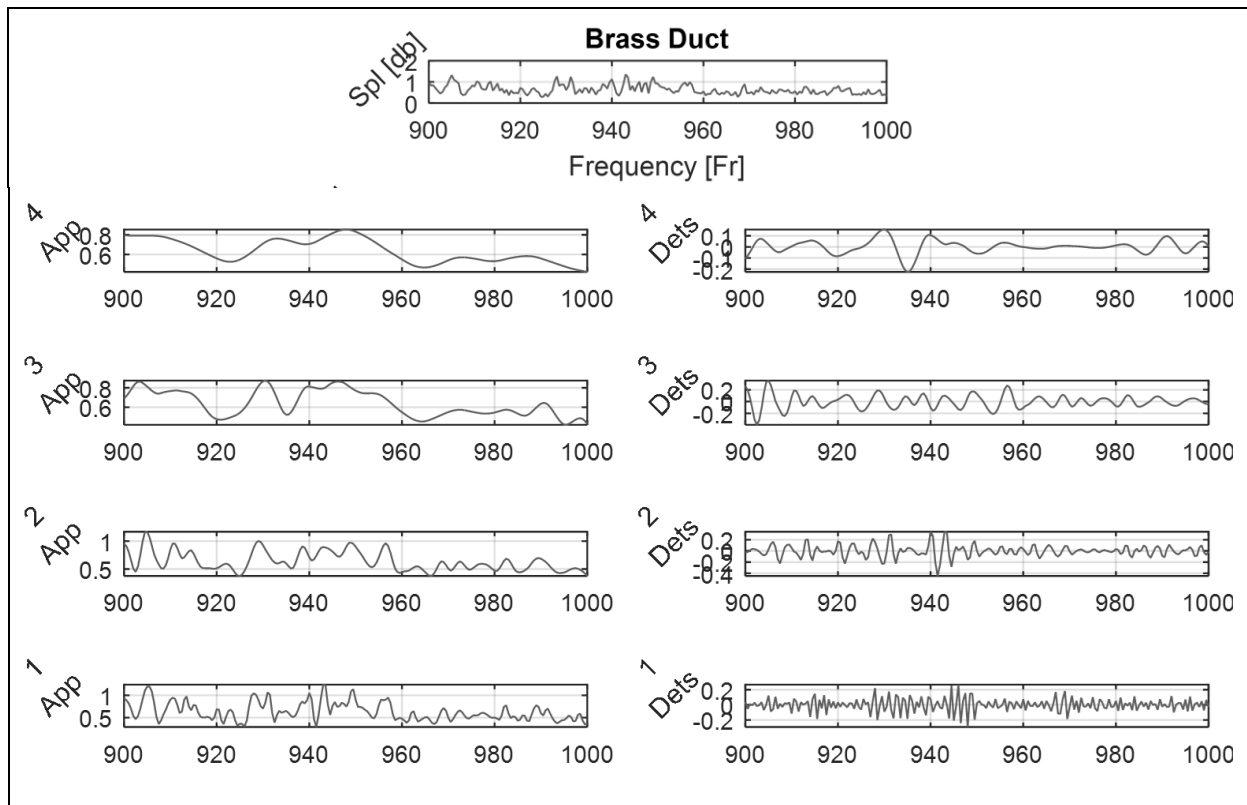
اگر تعداد اعضاء ماتریس F_{Low} را M و تعداد اعضاء تابع $F(Fr \text{ Or } t)$ را m بنامیم، آنگاه ماتریس Y را به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$Y = \begin{bmatrix} \text{wrev}(F) \text{ عضو انتهای } M-1 & & \text{wrev}(F) \text{ عضو ابتدایی } M-1 \\ & \ddots & \\ & & F(Fr \text{ Or } t) & \ddots \\ & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad m \geq M \quad (19)$$

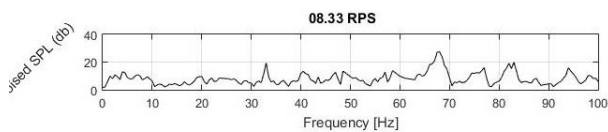
مقادیر تابع $F(Fr \text{ Or } t)$ را از فیلتر پایین‌گذر عبور داده و مقادیر Approximate را به دست می‌آوریم؛ سپس مقادیر $F(Fr \text{ Or } t)$ را از فیلتر بالاگذر عبور داده و مقادیر Detail را به دست می‌آوریم. برای عبور یک تابع از یک فیلتر مقدار آن تابع را در آن فیلتر ضرب کانولوشن می‌نماییم.

$$\begin{aligned} \text{Filter} \otimes F \\ = [\text{Filter}_1 * F_1 \quad \text{Filter}_1 * F_2 + \text{Filter}_2 * F_2 \quad \dots] \end{aligned}$$

(۲۰)



شکل ۱۱. شکست یک سیگنال به سیگنال‌های تشکیل‌دهنده آن توسط الگویم دایبچز



شکل ۱۲. سیگنال نوفه صوتی پروانه

مطابق شکل ۱۲، پس از حذف نوفه محیطی، سیگنال باقی‌مانده، به عنوان نوفه صوتی منتشر شده از پروانه در فرکانس‌های مختلف قلمداد شد.

۲-۵. روش اعتبارسنجی

با توجه به کمبود منابع مطالعاتی در حوزه نوفه صوتی و عدم انتشار نتایج آزمایش‌های انجام‌شده درباره مدل‌های شناخته‌شده، اعتبار فعالیت‌های صورت گرفته در دو مرحله و با روش زیر ارزیابی شد:

۱. مقایسه پارامترهای هیدرودینامیک پروانه داکت‌دار مدل شده از قبیل بازدهی، ضریب تراست و ضریب گشتاور با نتایج آزمایشگاهی؛
۲. تحلیل عددی نوفه صوتی پروانه داکت‌دار، انجام آزمایش، مقایسه نتایج هیدرودینامیک آزمایش مدل ساخته‌شده با نتایج بند ۱ (به منظور اطمینان از صحت عملکرد پروانه) و مقایسه نتایج تحلیل عددی نوفه صوتی پروانه و آزمایش (پس از فیلتر نمودن نوفه صوتی محیطی).

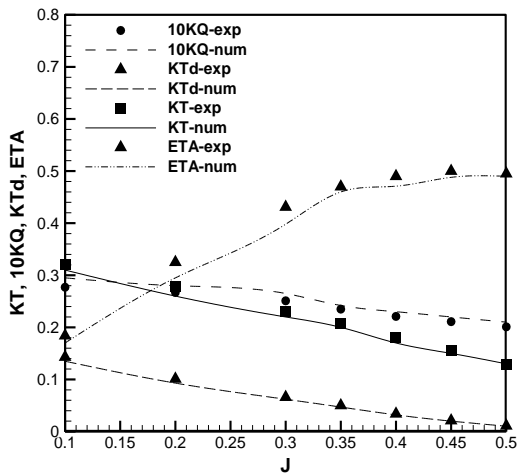
پس از انجام فرایند اعتبارسنجی هیدرودینامیک، سطح نوفه صوتی پروانه قبل و بعد از نصب داکت مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳. ارائه نتایج

۳-۱. نتایج تحلیل هیدرودینامیکی و هیدرواکوستیکی پروانه با / بدون داکت با استفاده از روش عددی

در نمودار شکل ۱۳، نتایج تحلیل عددی مشخصه‌های هیدرودینامیک پروانه داکت‌دار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج بیانگر اختلاف ناچیز مشخصه‌های هیدرودینامیک پروانه و نتایج آزمایشگاهی است. بنابراین حل عددی جریان پیرامون پروانه از منظر هیدرودینامیک معتبر تشخیص داده شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب پیشروی پروانه، مقدار دور پروانه کاهش یافته و به سبب آن مومنتوم گشتاور و نیروی تراست کاهش می‌یابد. پس از استخراج نیروی تراست و گشتاور، ضرایب تراست، گشتاور و ضریب بازدهی محاسبه شد که نتایج نشان می‌دهد با کاهش تعداد دور پروانه ضرایب محاسباتی بی‌بعد نیز کاهش یافته است. درحالی‌که ضریب بازدهی پروانه ابتدا فرایندی روبه

افزایش و با کاهش تعداد دور کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ماکزیمم ضریب بازدهی با توجه به محاسبه در سرعت‌های پیشروی مختلف در سرعت پیشروی ۰/۴ اتفاق افتاده است.



شکل ۱۳. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای پارامترهای هیدرودینامیکی پروانه با داکت

در این پژوهش نویز غیرکاویتاسیونی به منظور یافتن محدوده تراز صوتی فشار مورد مطالعه قرار گرفته است، به عبارت دیگر قرار است تأثیر نویز غیرکاویتاسیونی روی تراز صوتی با جایگذاری هیدروفون‌های مختلف به صورت عددی بررسی شود. برای بررسی نویز غیرکاویتاسیونی تولیدی از پروانه و داکت، چهار هیدروفون به صورت جدول ۵ جایگذاری شده است. سعی شده است هیدروفون‌های مختلف در جهت‌های شعاعی و محوری قرار گیرد. چگالی آب، سرعت صوت و فشار مرجع برای آب مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده است.

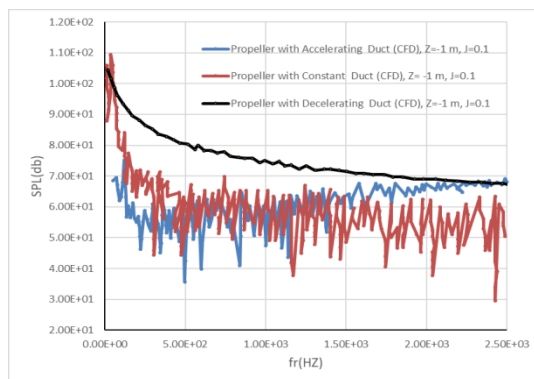
جدول ۵. موقعیت مکانی قرارگیری هیدروفون‌ها

Name		X-Cord (m)	Y-Cord (m)	Z-Cord (m)
Experimental	Hydrophone-1	۱	۰	۰
	Hydrophone-2	۰	۰	۰/۲۵۰
	Hydrophone-1	۱	۰	۰
	Hydrophone-2	۰	۰	-۱
	Hydrophone-3	۰	۱	۰
	Hydrophone-4	-۱	۰	۰

جدول ۶. پارامترهای مختلف جریان و شرایط آکوستیکی

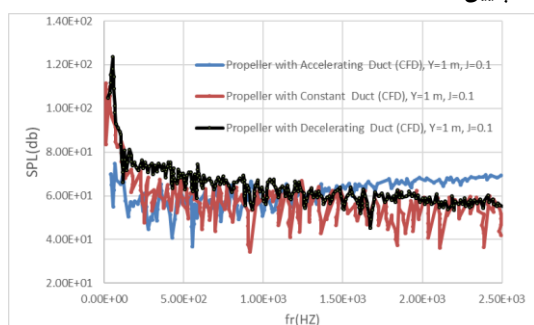
Num	Vel (m/s)	N (rpm)	Turbul model	ρ (kg/m ³)	V_0 (m/s)	P_{ref} (Pa)
۱	۰/۶۲۵	۵۰	LES	۹۹۸/۲	۱۵۳۱	۱۰ ^{-۶}
۲	۰/۶۲۵	۲۵	LES	۹۹۸/۲	۱۵۳۱	۱۰ ^{-۶}

دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ هرتز بیشینه ۷۰ دسی‌بل است. نتایج نشان می‌دهد در هیدروفن ۲ در فرکانس‌های بالاتری تراز صوتی فشار کمتری دارد، به عبارت دیگر داکت توانسته در فرکانس‌های بالا تأثیر خود را بر نویز نشان دهد.



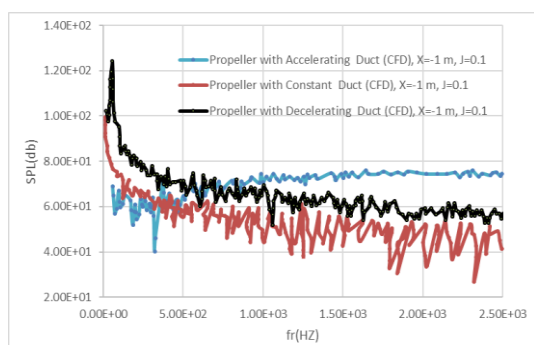
شکل ۱۵. سطح تراز صوتی فشار هیدروفن ۲ در سرعت پیشروی ۰/۱

شکل ۱۶ نیز مطابق نمودار ۱۵ قابل تحلیل است. هیدروفن ۳ نیز در فاصله ۱ متر از سطوح جانبی داکت‌های شتاب‌دهنده، ثابت و کاهنده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، همچنان در فرکانس‌های بالا به سبب تأثیر داکت سطح تراز صوتی فشار پایین است.



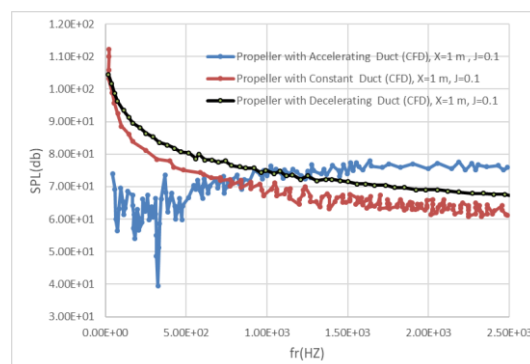
شکل ۱۶. سطح تراز صوتی فشار هیدروفن ۳ در سرعت پیشروی ۰/۱

در شکل ۱۷ برای هیدروفون ۴، سطح نویز در پایین دست (پشت پروانه) همچنان بالاتر از سطح نویز در بالادست هندسه محاسباتی (جلو پروانه) است.



شکل ۱۷. سطح تراز صوتی فشار هیدروفن ۴ در سرعت پیشروی ۰/۱

شکل ۱۴ نتایج هیدروآکوستیکی پروانه داکت‌دار شتاب‌دهنده، ثابت و کاهنده را برای سرعت پیشروی $M=0.1$ نشان می‌دهد. برای پروانه داکت‌دار شتاب‌دهنده مقدار تراز صوتی در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز، مقدار مینیمم ۴۰ دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۵۰۰ هرتز ماکزیمم ۷۵ دسی‌بل، پروانه داکت‌دار ثابت مقدار تراز صوتی در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز، مقدار مینیمم ۱۱۰ دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۵۰۰ هرتز بیشینه ۶۰ دسی‌بل و برای پروانه داکت‌دار کاهنده مقدار تراز صوتی در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز، مقدار کمینه ۱۱۰ دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۵۰۰ هرتز بیشینه ۷۵ دسی‌بل است.



شکل ۱۴. سطح تراز صوتی فشار هیدروفن ۱ در سرعت پیشروی ۰/۱

شکل ۱۵ نشان می‌دهد با تغییر محل هیدروفن از پایین دست، به ۱ متر فاصله از سطح جانبی داکت‌های شتاب‌دهنده، ثابت و کاهنده نشان می‌دهد، تراز صوتی کاهش محسوسی داشته و این مهم تأثیر داکت روی پروانه جهت کاهش نویز را نشان می‌دهد. برای پروانه داکت‌دار شتاب‌دهنده مقدار تراز صوتی برای هیدروفون ۲ در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز مقدار مینیمم ۳۳ دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ هرتز ماکزیمم ۶۹ دسی‌بل، پروانه داکت‌دار ثابت مقدار تراز صوتی در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز مقدار مینیمم ۱۰۱ دسی‌بل و برای مقادیر بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ هرتز ماکزیمم ۵۰ دسی‌بل و برای پروانه داکت‌دار کاهنده مقدار تراز صوتی در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز مقدار کمینه ۱۰۵

می گیرد. سیگنال دوم شامل موارد عمده سیگنال اصلی است، این سیگنال شامل تغییرات عمده در بازه های فرکانسی بزرگ تر است. این سیگنال به اصطلاح Approximate یا تخمین نامیده می شود.

جدول ۷. نرخ چرخش، سرعت جریان و ضریب پیشروی هر آزمایش

ردیف	سرعت حرکت جریان آب [m/s]	نرخ چرخش پروانه [RPS]	ضریب پیشروی
۱	۰/۶۲۵	۸/۳۳	۰/۰۰۹۰
۲		۱۰/۰۰	۰/۰۰۷۵
۳		۱۲/۵۰	۰/۰۰۶۰
۴		۱۶/۶۰	۰/۰۰۴۵
۵		۲۵/۰۰	۰/۰۰۳۰

فرکانس های نوفه صوتی محیطی (شامل نوفه صوتی تجهیزات آزمایشگاه، محیط پیرامون آزمایشگاه و ...) پس از ثبت ارتعاشات و تحلیل نتایج، مطابق جدول ۸ استخراج شد.

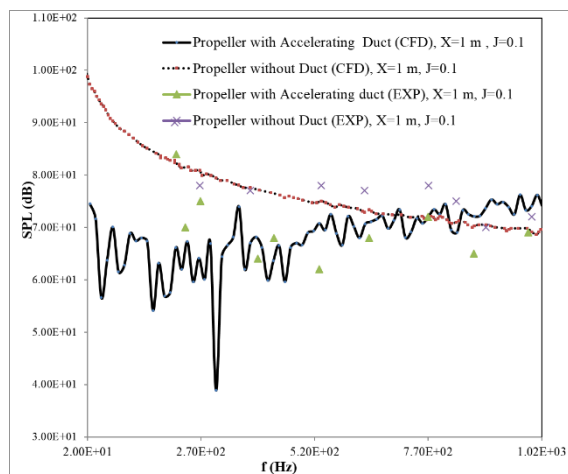
در نمودارهای شکل ۱۴ تا ۱۷ نویز گسسته در فرکانس پایین ناشی از نوسانات نیروهایی است که در اثر یکنواخت شدن جریان در بالادست جریان به وجود می آیند و فرکانس های این طیف متناظر با فرکانس های گذر پره است. نویز پیوسته در فرکانس های بالا ناشی از مغشوش شدن جریان بالادست یا توربولانسی شدن جریان روی سطح پره است و فرکانس های پایین طیف پیوسته ناشی از لایه مرزی جریان بالادست در ورود به پره و فرکانس های بالای طیف پیوسته ناشی از لایه مرزی شکل گرفته روی سطح پره است.

۲-۳. نتایج آزمایش در تونل کاویتاسیون

با استفاده از معادلات Wavelet سیگنال ثبت شده در حوزه فرکانس (Spl-Fr) به دو سیگنال مجزا تقسیم می شود. هر سیگنال شامل نیمی از داده های سیگنال اصلی است. یکی از این دو سیگنال که اصطلاحاً Detail نامیده می شود، سیگنالی است که جزئیات سیگنال اصلی (تغییرات سریع و اغلب کوچک سطح صوت در بازه های فرکانسی کوچک) را دربر

جدول ۸. فرکانس های نوفه صوتی محیطی

ردیف	بازه فرکانسی	فرکانس نوفه صوتی محیطی
۱	[۰-۱۰۰]	۱۷؛۲۵؛۲۴؛۴۹؛۵۰؛۶۳؛۵۸-۶۹؛۶۶؛۷۵؛۷۷؛ ۷۹-۷۸؛۸۳؛۹۹
۲	[۱۰۰-۲۰۰]	۱۱۰-۱۱۰؛۱۰۲-۱۱۵؛۱۱۲-۱۱۷؛۱۲۳؛۱۲۵؛۱۳۳؛ ۱۵۱-۱۴۶؛۱۴۹؛۱۵۹؛۱۷۵؛۱۸۳؛۱۸۵؛۱۸۶؛۱۸۸؛۱۹۰؛ ۱۹۳؛۱۹۵؛۱۹۷-۱۹۹
۳	[۲۰۰-۳۰۰]	۲۰۱-۲۰۰؛۲۱۲؛۲۰۳-۲۱۷؛۲۲۳؛۲۲۵؛۲۴۴؛ ۲۵۰-۲۴۶؛۲۶۰؛۲۶۷؛۲۷۵؛۲۸۳؛۲۸۵
۴	[۳۰۰-۴۰۰]	۳۰۴-۳۰۱؛۳۱۰؛۳۱۷؛۳۲۵؛۳۳۰؛۳۳۱؛۳۳۳؛۳۴۶؛۳۴۷؛ ۳۵۰؛۳۶۳؛۳۷۲؛۳۷۵؛۳۸۳
۵	[۴۰۰-۵۰۰]	۴۱۱-۴۰۰؛۴۱۳؛۴۱۷؛۴۲۵؛۴۲۹؛۴۳۰؛۴۳۳؛۴۳۸؛۴۴۶؛ ۴۵۰؛۴۶۶؛۴۷۵
۶	[۵۰۰-۶۰۰]	۵۰۳-۵۰۷؛۵۰۸؛۵۱۲؛۵۱۳؛۵۱۷-۵۱۶؛۵۲۵؛۵۵۰؛۵۶۶؛ ۵۷۵؛۵۸۳؛۵۹۴؛۵۹۵
۷	[۶۰۰-۷۰۰]	۶۱۶-۶۲۵؛۶۴۱؛۶۵۰؛۶۵۵؛۶۵۸؛۶۶۹؛۶۷۵؛۶۸۳؛ ۶۹۴؛۶۹۵
۸	[۷۰۰-۸۰۰]	۷۰۸-۷۱۳؛۷۲۵؛۷۸۸؛۷۳۳؛۷۵۰؛۷۷۵؛۷۸۳
۹	[۸۰۰-۹۰۰]	۸۱۶-۸۲۵؛۸۳۳؛۸۴۱؛۸۵۰؛۸۶۶؛۸۷۵؛۸۹۰؛۸۹۱؛ ۸۹۲؛۸۹۹
۱۰	[۹۰۰-۱۰۰۰]	۹۰۲-۹۰۵؛۹۰۷؛۹۰۸؛۹۱۶؛۹۴۱؛۹۵۰؛۹۷۵؛۹۸۳؛ ۹۶۳



شکل ۱۹. نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی سطح فشار صوت پروانه داکت دار شتاب‌دهنده با پروانه بدون داکت برای هیدروفون شماره ۱ در سرعت پیشروی ۰/۱

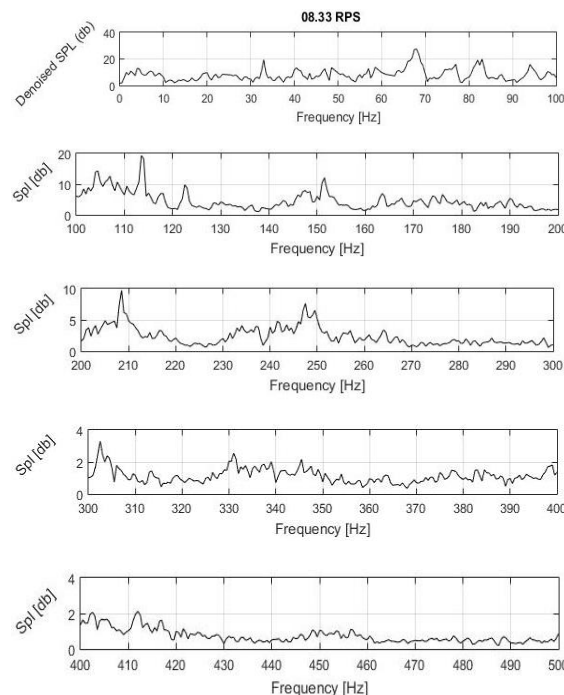
۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله استخراج ضرایب هیدرودینامیکی و محاسبه سطح فشار صوت پروانه داکت‌دار با سطح مقطع مختلف (شتاب‌دهنده، ثابت و کاهنده) و بدون داکت با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است که نتایج عددی ضرایب هیدرودینامیکی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مقایسه نتایج سطح فشار صوت با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی نویز پروانه به‌ویژه در فرکانس‌های ۲۷۰ تا ۸۰۰ هرتز وجود دارد. به نظر می‌رسد که منابع اصلی خطای نتایج عددی خطای محاسبه نویز توسط معادلات FW-H، صرف نظر کردن از منابع چهار قطبی نویز و اثرات انعکاس صوت از دیواره‌های تونل است که انعکاس صوت باعث می‌شود مقدار اندازه‌گیری شده توسط هیدروفون خطا داشته باشد و غالباً نویز پروانه را بیش از حد واقعی ثبت کند.

با توجه به نتایج عددی و تست آزمایشگاهی موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود.

- تغییر محل هیدروفون از پایین‌دست (با فاصله ۱ متر از میدان چرخشی)، به ۱ متر فاصله از سطح جانبی داکت نشان می‌دهد، تراز صوتی کاهش محسوسی داشته است و این مهم تأثیر داکت روی پروانه برای کاهش نویز را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۸، نوفه صوتی منتشر شده از پروانه طی آزمایش در تونل کاویتاسیون و پس از حذف نوفه‌های صوتی محیطی، در بازه فرکانسی ۱ تا ۵۰۰ هرتز با نرخ چرخش ۸/۳۳ دور بر ثانیه و به تفکیک بازه‌های فرکانسی با پهنای باند ۱۰۰ هرتز به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱۸ سیگنال نوفه صوتی پروانه

در شکل ۱۹ نتایج سطح فشار صوت برای یک پروانه داکت‌دار شتاب‌دهنده با پروانه بدون داکت با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. در مقایسه نتایج سطح فشار صوت با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی نویز پروانه به‌ویژه در فرکانس‌های ۲۷۰ تا ۸۰۰ هرتز وجود دارد. محاسبات تحلیل عددی نشان می‌دهد، بیشینه تراز صوتی از ۷۴ دسی‌بل (همراه با داکت) به ۱۰۳ دسی‌بل (بدون داکت) افزایش یافته است، همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد تغییرات سطح تراز صوتی در فرکانس‌های مختلف در صورتی که پروانه همراه با داکت است کمتر از حالتی است که پروانه بدون داکت است.

- پیشنهادها برای مطالعه آینده
- مطالعه نویز کاویتاسیونی برای پروانه با / بدون داکت
- تأثیر پروانه با تعداد پره های مختلف روی نویز حاصل از عبور جریان از پروانه
- استفاده از فرمول متخلخل FWH

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از زحمتهای آقایان دکتر مسلم اکبری، شفقت، عالمیان و باباخانی در پیشبرد اهداف، راهنمایی و هدایت اعضاء در طول فرایند آزمایش و همکاری آقای مهندس محمود علی احمدی کمال تشکر و سپاس را داشته باشند.

فهرست علائم

ρ	دانسیته
T	زمان
C	فشار
v	سرعت خطی در راستای محور طول
u	سرعت خطی در راستای محور عرض
P	فشار
T	تنش آشفستگی لایتهیل
H	تابع هیوساید
f	تابع نمایش دهنده وجود صفحه
D	قطر پروانه
F_{Low}	فیلتر پایین گذر
F_{High}	فیلتر بالا گذر

مراجع

- [1] Alizadeh V, Abbaspour M, Arasteh AM, Lari K, Azad MT. Numerical solution and experimental investigation for hydro-acoustic analysis and noise reduction assessment of ship ducted propeller. Heliyon. 2024;10(8).
- [2] Mousavi B, Rahrovi Aa, Kheradmand S. Numerical simulation of tonal and broadband hydrodynamic noises of non-cavitating underwater propeller. Polish Maritime Research. 2014;21(3):46-53.
- [3] Carlton J. Marine propellers and propulsion: Butterworth-Heinemann; 2018.

- مقدار تراز صوتی تولیدشده به وسیله پروانه داکت دار شتاب دهنده نشان می دهد در فرکانس های بالا حدود ۳۵ درصد سطح نویز سطوح جانبی داکت نسبت به پایین دست کاهش می یابد.
- با افزایش سرعت پیشروی از ۰/۱ به ۰/۲ سطح تراز صوتی فشار کاهش یافته است، زیرا مقدار گشتاور و نیروی تراست برای پروانه داکت دار کمتر شده است. همچنین در سرعت پیشروی ۰/۲ نشان می دهد، داکت به خوبی توانسته سطح تراز صوتی فشار را کاهش دهد و از طرفی همچنان سطح نویز در پشت داکت (پایین دست) بیشتر از ورودی (بالادست) هندسه محاسباتی است.
- از نتایج به دست آمده از نمودارهای ضریب تراست، ضریب گشتاور و راندمان در دو حالت بدون داکت و با داکت مشاهده شد که ضرایب تراست و راندمان پروانه در حالت با داکت فیزی بیشتر از حالت بدون داکت است. مقایسه بازدهی پروانه به همراه داکت در تحلیل عددی و مرجع آزمایشگاهی نشان می دهد که میزان خطا زیر ۱۰ درصد است.
- سطح صوت ثبت شده از پروانه طی آزمایش در تونل کاویتاسیون و پس از حذف نوفه های صوتی محیطی، پس از انجام فرایند فیلتراسیون، قبل و بعد از نصب داکت فیزی و در فرکانس های مشخصه شناسایی شده، بیانگر کاهش تا ۳۷ درصدی سطح نوفه صوتی در فرکانس های مختلف برای حالت پروانه با داکت است. [۱]
- نویز تولیدشده توسط پروانه داکت دار نشان می دهد، داکت مقطع ثابت همراه با پروانه کاپلان سبب شده تا در فرکانس های بالا حدود سطح نویز سطوح جانبی داکت نسبت به پایین دست و بالادست هندسه محاسباتی کاهش یابد.
- نویز تولیدشده توسط پروانه داکت دار نشان می دهد، داکت کاهنده همراه با پروانه کاپلان سبب شده است تا در فرکانس های بالا سطح نویز سطوح جانبی داکت نسبت به پایین دست و بالادست هندسه محاسباتی کاهش یابد.

- Philosophical Transactions for the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1969:321-42.
- [18] Ebrahimi A, Seif MS, Nouri-Borujerdi A. Hydrodynamic and acoustic performance analysis of marine propellers by combination of panel method and FW-H equations. *Mathematical and Computational Applications*. 2019;24(3):81.
- [19] Majdfar S, Ghassemi H, Forouzan H, Ashrafi A. Hydrodynamic prediction of the ducted propeller by CFD solver. *Journal of Marine Science and Technology*. 2017;25(3):3.
- [20] Ghassemi H, Majdfar S, Forouzan H. Calculations of the hydrodynamic characteristics of a ducted propeller operating in oblique flow. *Ship Science and Technology*. 2016;10(20):31-40.
- [21] Fluent A. *Ansys fluent theory guide*. Ansys Inc, USA. 2011;15317:724-46.
- [22] Mehdipour R. *Simulating propeller and propeller-hull interaction in openfoam*. 2014.
- [23] Culpan E, Rose G. Microstructural characterization of cast nickel aluminium bronze. *Journal of materials science*. 1978;13:1647-57.
- [24] Shafaghat R. Design algorithm of a free surface water tunnel to test the surface-piercing propellers (SPP); case study water tunnel of babol noshirvani university of technology. *International Journal of Maritime Technology*. 2016;6:19-30.
- [25] Hess-Nielsen N, Wickerhauser MV. Wavelets and time-frequency analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1996;84(4):523-40.
- [26] Shen J, Strang G. Asymptotics of daubechies filters, scaling functions, and wavelets. *Applied and Computational Harmonic Analysis*. 1998;5(3):312-31.
- [27] Majdfar S, Ghassemi H, Forouzan H, Ashrafi A. HYDRODYNAMIC PREDICTION OF THE DUCTED PROPELLER BY CFD SOLVER. *Journal of Marine Science and Technology*. 2017;25(3):268-75.
- [4] Saari A. Hydrodynamic study on a ducted propeller in a large vessel by time-accurate self-propulsion simulation with Reynolds-Averaged Navier-Stokes-equations. 2014.
- [5] Gaggero T, Rizzuto E, Traverso F, Trucco A, editors. Comparing ship underwater noise measured at sea with predictions by empirical models. *proc of 21st International Congress on Sound and Vibration*; 2014.
- [6] Koop B. *Test Procedures for Hydro-Acoustic Investigations in the HSV A with Some Test Results*; HSV A Report No. Ac.3:77.
- [7] Leggat LJ, editor *Propeller Cavitation Noise Investigations in a Free-Field Environment. Seminar on Advanced Hydrodynamic Testing Facilities*, 22nd; 1982.
- [8] Abbot PA, Celuzza SA, Etter RJ. Acoustic characteristics of the naval surface warfare center's large cavitation channel(LCC). *ASME NOISE CONTROL ACOUST DIV PUBL NCA, ASME, NEW YORK, NY,(USA)*, 1993. 1993;15:137-56.
- [9] Seol H, Cheolsoo P, editors. Numerical and experimental study on the marine propeller noise. *19th International Congress on Acoustics*; 2007.
- [10] Tani G, Viviani M, Gaggero T, Rizzuto E, editors. Single screw ships radiated noise measurements in model and full scale. *Fourth International Symposium on Marine Propulsors*'15; 2015.
- [11] Kowalczyk S, Felicjancik J. Numerical and experimental propeller noise investigations. *Ocean Engineering*. 2016;120:108-15.
- [12] Seol H, Jung B, Suh J-C, Lee S. Prediction of non-cavitating underwater propeller noise. *Journal of sound and Vibration*. 2002;257(1):131-56.
- [13] Yehia W. Guidelines for Numerical Flow Simulation around Marine Propeller. *momentum*.10:2.
- [14] Jang J-S, Kim H-T, Joo W-H, editors. Numerical study on non-cavitating noise of marine propeller. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; 2014: Institute of Noise Control Engineering.
- [15] Felli M, Falchi M, Dubbioso G. Experimental approaches for the diagnostics of hydroacoustic problems in naval propulsion. *Ocean engineering*. 2015;106:1-19.
- [16] Layton W, Novotný A. On Lighthill's acoustic analogy for low Mach number flows. *New Directions in Mathematical Fluid Mechanics: The Alexander V Kazhikhov Memorial Volume*: Springer; 2009. p. 247-79.
- [17] Williams JF, Hawkins DL. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion.

پی‌نوشت‌ها

1. Identity Tensor
2. Lighthill Turbulence Stress Tensor
3. Fowcs Williams Hawkins (FW-H)
4. Monopol
5. Steady State Analysis