محاسبه نویز پروانه های دریایی در حالت غیر کاویتاسیونی با حل معادلات اکوستیکی FW-H

ابوذر ابراهیمی[۱] ، محمد سعید سیف[۲*] ، علی نوری بروجردی[۲]

[۱] دانشگاه صنعتی شریف؛ ab_ebrahimi@mech.sharif.edu
[۲] استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۲] استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ anouri@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳

کلمات کلیدی:
نویز
پروانه های دریایی
DTMB 4119
انتشار نویز
معادلات FW-H

چکیده

نویز ایجاد شده توسط کشتی ها یکی از مهمترین صداهای درون دریاها است و نویز پروانه یکی از اجزای اصلی و مهم نویز تولیدی کشتی است. اندازه گیری نویز پروانه ها در آزمایشگاه علیرغم دقت بالا و قابلیت اطمینان خوب، هزینه زیادی دارد، دارای پیچیدگی هایی است و بسیار وقت گیر است. به همین دلیل محاسبه و تخمین نویز پروانه با استفاده از روشهای حل عددی در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، نویز ایجاد شده توسط پروانه در شرایط غیرکاویتاسیونی با حل معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز (FW-H) محاسبه می شود. یک نرم افزار برای محاسبه عددی نویز پروانه با استفاده از معادلات FW-H توسعه داده شده است و نتایج آن با استفاده از چند مطالعه موردی صحت سنجی شده است. در انتها نتایج این نرم افزار برای پروانه DTMB 4119 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. این مطالعه نشان می دهد که نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد.

Noise Calculation of Non-cavitating Marine Propellers by Solving FW-H Acoustic Equations

Abouzar Ebrahimi[1], Mohammad Saeed Seif[2*], Ali Nouri-Borujerdi[3]

[1] Sharif University of technology, ab_ebrahimi@mech.sharif.edu
[2] Mechanical Engineering Department, Sharif University of technology, seif@sharif.edu
[3] Mechanical Engineering Department, Sharif University of technology, anouri@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 24 Jul. 2019
Accepted: 14 Aug. 2019

Keywords:
Noise
Marine Propellers
DTMB 4119
Noise Emission
FW-H Equations

ABSTRACT

The noise emitted by ships is one of the most important noises in ocean and the propeller noise is one of the major components of the ship noise. Measuring the propeller noise in laboratory despite the high accuracy and good reliability, costs a lot, has some complexities and is very time consuming. For this reason, the calculation of propeller noise using numerical methods has been considered in recent years. In this study, the noise of propeller in non-cavitating conditions is calculated by solving the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) equations. A software for numerical calculation of propeller noise, based on FW-H equations, is developed and results are validated by experimental results. This study show that the results of the FW-H noise code have also good agreement with experimental data.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

۱ - مقدمه

در علم اکوستیک، آنچه بعنوان صوت شناخته می‌شود عبارت است از تغییرات متناوب فشار که در اثر ارتعاش در یک محیط (جامد، مایع یا گاز) ایجاد می‌شود و ممکن است به گوش انسان برسد[۱]. در این فرایند هر مولکول به مولکول مجاور خود برخورد کرده، انرژی را انتقال داده و به مکان قبلی خود بر می‌گردد. در نتیجه هرچه مولکول ها به هم فشرده تر باشند، انرژی و صوت با سرعت بیشتری انتقال می یابد. به همین دلیل سرعت صوت در جامدات نسبت به مایعات و گازها بیشتر است. محدوده نویز تولیدی بستگی به دامنه و فرکانس موج فشاری دارد. آنچه در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، نویز تولیدی توسط پروانه کشتی است. حرکت پروانه کشتی در آب سبب تغییرات متناوب فشار و ایجاد صوت می‌شود. صوت ایجاد شده ممکن است در محدوده شنوایی انسان (۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) و قابل شنیدن باشد و یا در محدوده ای باشد که فقط توسط بعضی از جانوران دریایی و یا سونار دریافت شود. بطور معمول، صوتهای بالای ۲۰ کیلوهرتز را امواج فراصوت و زیر ۲۰ هرتز را فروصوت می نامند.

نویز ایجاد شده توسط پروانه یکی از مهمترین نویزهای کشتی ها است. نویز کشتی‌ها علاوه بر اثرات مخرب زیست محیطی، ممکن است سبب سلب آسایش خدمه کشتی گردد. همچنین در کشتی‌های نظامی، نویز ممکن است سبب شناسایی کشتی گردد. به همین دلیل کاهش نویز پروانه کشتی ها همواره مورد توجه محققان بوده است. عوامل مختلفی از قبیل هندسه پروانه، شرایط کاری و ... می‌تواند بر روی نویز پروانه تاثیرگذار باشد.

جهت اندازه گیری نویز پروانه ها از دو روش تجربی و عددی استفاده می‌شود. در روش عددی، پارامترهای هیدرودینامیکی پروانه و توزیع فشار اطراف پروانه توسط روشهای عددی از قبیل دینامیک سیالات محاسباتی یا روشهای المان مرزی محاسبه می شود و از این اطلاعات به عنوان ورودی معادلات نویز استفاده می شود. یکی از رایج ترین معادلات جهت محاسبه نویز پروانه ها، معادلات موسوم به FW-H می باشد. در این پژوهش، معادلات انتشار نویز تشریح می شود و سپس برای چند مسئله، مطالعه و صحت سنجی نتایج انجام می شود و در انتها نتایج این روش برای پروانه دریایی DTMB 4119 مورد بررسی قرار می گیرد.

۱-۱ پیشینه تحقیق

در زمینه مدلسازی و تحلیل نویز پروانه های دریایی به روش عددی تاکنون تحقیقات فراوانی انجام شده است. الگوریتم‌های عددی تحلیل نویز پروانه دارای ورودی هایی از قبیل توزیع سرعت، فشار و ... در میدان اطراف پروانه می باشند. بنابراین هرگونه مطالعه در زمینه تحلیل عددی نویز بدون دسترسی به حل عددی جریان اطراف پروانه ناممکن است. در بسیاری از تحقیقات عددی نویز، از کدهای عددی پتانسیل (جریان ایده آل) یا روش حجم محدود (جریان واقعی) جهت بدست آوردن پارامترهای جریان استفاده شده است که در این بخش فقط به چند مورد از این تحقیقات اشاره می‌شود. سئول[1] و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۲ تحقیقاتی را روی نویز غیرکاویتاسیونی یک پروانه در شرایط مختلف کارکردی بصورت عددی انجام دادند. در این مطالعه برای بدست آوردن توزیع سرعت و فشار اطراف پروانه از روش پتانسیل المان مرزی استفاده شده و این مقادیر بعنوان ورودی‌های فرمولاسیون FW-H مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج برای حالت تک پروانه و حالت پروانه دارای غلاف[2] و با فرض ویک غیر یکنواخت بدست آمده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که غلاف پروانه دارای تاثیر چندانی بر روی نویز میدان دور ندارد. سئول و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از روش پانل جریان اطراف یک مدل پروانه را مدلسازی کردند. سپس با استفاده از توزیع سرعت و فشار بدست آمده در مرحله قبل، معادلات نویز را بصورت عددی حل کردند و نویز را در دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی بدست آوردند.

یوکان[3] و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۰ تحقیقی را بر روی نویز پروانه DTMB ۴۱۱۸ انجام دادند. در این پژوهش میدان جریان اطراف پروانه به روش DES شبیه سازی شده و سپس با استفاده از نتایج این روش، معادلات FW-H حل شده است. در تحقیق دیگری که توسط کِلِت[4] و همکاران [۵] انجام شده است، نویز ایجاد شده توسط یک کشتی حمل گاز مایع به روش عددی و تجربی اندازه گیری شده است. در ابتدا جریان اطراف بدنه و پروانه کشتی توسط یک کد دینامیک سیالات محاسباتی حل شده است. سپس با استفاده از نتایج حل عددی جریان، معادلات نویز حل شده و در دو سرعت مشخص، نویز محاسبه شده است. در انتها با اندازه گیری تجربی نویز کشتی واقعی، مقایسه ای بین نتایج عددی و تجربی نویز انجام شده است.

باقری و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴ تحقیقاتی را بر روی یک پروانه سه پره سری Gawn انجام دادند. آنها در ابتدا با استفاده از کد تجاری فلوئنت که به روش حجم محدود معادلات جریان را حل می کند، مشخصات جریان اطراف پروانه را بدست آوردند. سپس معادلات نویز را حل کرده و سطح فشار صوت را در فرکانس های مختلف محاسبه کردند. کوالچیک[5] و همکاران [۷] نیز در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش عددی نویز یک پروانه را محاسبه کردند و با نتایج تجربی نویز که در تونل کاویتاسیون بدست آمده است، مقایسه کردند. گرجی و همکاران [۸] در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۹ منتشر شده است، اثرات تغییرات زاویه ریک و اسکیو را بر روی نویز پروانه بررسی کردند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

۲ – معادله لایتهیل

پارامترهای مختلف مشخص کرد. محققین همواره در تلاش بوده اند تا معادلات حاکم بر صوت و انتشار آن را استخراج نموده و با حل این معادلات، شدت صوت را در مکان و زمان مورد نظر محاسبه نمایند. از نخستین تحقیقاتی که در زمینه تولید و انتشار امواج اکوستیکی انجام شده است، تحقیقات رایلی- استوکس[۶] در قرن ۱۹ میلادی است. آنها در تحقیقات خود با فرض ایده آل بودن جریان و منابع نوسانی جرم و نیرو، روابط خطی اکوستیکی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیقات بعدها توسط لایتهیل[۷] در سال ۱۹۵۴ ادامه یافت و نخستین روابط کاربردی برای انتشار صوت استخراج شد. لایتهیل با استفاده از روابط اصلی حاکم بر جریان سیال یعنی روابط پیوستگی و مومنتوم، معادله کلی تولید صوت ناشی از تنش برشی سیال را استخراج کرد[۹]. او در این تحقیق تئوری تولید صوت آئرودینامیکی را برای نویز 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 بدست آورد. معادله لایتهیل بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \qquad (۱)$$
$$T_{ij} = \rho v_i v_j - \sigma_{ij} + (p - c^2 \rho)\delta_{ij}$$

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. در این معادله، δ_{ij} دلتای کرونکر است. هر یک از ترم های تنسور تنش لایتهیل نشان دهنده یکی از منابع تولید صوت است. $\rho v_i v_j$ نشان دهنده تنش رینولدز، σ_{ij} نشان دهنده صوت ایجاد شده توسط تنش برشی و $(p - c^2\rho)\delta_{ij}$ نشان دهنده تولید صوت غیر خطی است. با توجه به مشخصات جریان، بعضی از منابع صوت در معادله لایتهیل ممکن است ناچیز بوده و از آنها چشم پوشی شود. در عمل بسیار مرسوم است که از اثرات ویسکوزیته سیال چشم پوشی و $\sigma = 0$ در نظر گرفته شود. زیرا در اغلب موارد، تاثیرات ویسکوزیته بر تولید نویز بسیار کمتر از تاثیر عوامل دیگر می‌باشد.

۲-۱ حل معادله لایتهیل

معادله لایتهیل اگرچه مقدار فشار اکوستیکی را بطور دقیق برحسب مشخصه های جریان و سیال بیان می‌کند اما حل این معادله جز در موارد خاص قابل دسترس نیست. محققانی که در زمینه اکوستیک فعالیت می‌کرده اند همواره سعی در حل کامل این معادله داشته اند. یکی از حل های ساده تحلیلی که برای معادله لایتهیل ارائه شده است، حل انتگرالی آن است. این روش حل نخستین بار توسط فوکس ویلیامز[۸] و دیوید هاوکینگز[۹] [۱۰] پیشنهاد شد و برای بدست آوردن فشار اکوستیکی در میدان دور[۱۰] دور[۱۰] قابل استفاده است. در این روش، ابتدا با حل جریان اطراف جسم، منابع تولید نویز (سرعت، فشار، تنش برشی و ...) بدست می آید. سپس با تعریف یک سطح مرجع در اطراف جسم، اطلاعات جریان (که بعنوان منابع تولید صوت در معادله لایتهیل می باشند) بر روی این سطح جمع آوری شده و با استفاده از حل انتگرالی موجود، فشار اکوستیکی در میدان دور از جسم محاسبه می گردد. برای حل انتگرالی معادله لایتهیل، از تابع گرین استفاده می‌شود که توضیحات کامل آن در مراجع [۱۱] و [۱۲] بیان شده است. بر اساس این روش، حل انتگرالی معادله لایتهیل بصورت زیر نوشته می شود:

$$\rho(x,t) = \frac{1}{4\pi c^2}\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}\int_{\Omega} \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{|x-y|} dy \qquad (۲)$$

که در این رابطه، Ω دامنه انتگرال گیری روی حجمی است که آشفتگی در آن باعث ایجاد نویز می‌گردد. این دامنه باید به نحوی انتخاب شود که تمام منابع تولید نویز را شامل شود. همچنین x و y به ترتیب بردارهای مکان گیرنده نویز (ناظر) و منبع نویز می باشند. عبارت درون انتگرال معادله فوق باید در زمان چشمه[۱۱] محاسبه شود. با حل این انتگرال، تغییرات چگالی در مکان x و t زمان بدست می آید.

۲-۱ معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز (FW-H)

معادله انتگرالی که در بخش قبل برای معادله لایتهیل ارائه شد با این فرض بدست آمده است که هیچ گونه صفحه صلبی در مسیر جریان وجود ندارد و یا از اثرات آن چشم پوشی می‌شود. در اکثر مسائل اکوستیک، صفحات صلب واقع شده در مسیر جریان سیال اثرات بسیار مهمی بر روی نویز تولید شده دارند. با توجه به این موضوع، ویلیامز و هاوکینگز روابط ساده شده بخش قبل را برای حالت وجود صفحات صلب توسعه دادند. معادلات ارائه شده توسط این محققین در علم اکوستیک به مدل FW-H[۱۲] معروف شده است. برای حل معادله FW-H، فراست و همکاران [۱۳] روشی را ارائه کردند که می‌تواند نویز ناشی از حرکت یک جسم با هندسه دلخواه را پیش بینی کند. این فرمولاسیون به صورت زیر نوشته می شود:

$$p'(\vec{x},t) = p'_T(\vec{x},t) + p'_L(\vec{x},t) \qquad (۳)$$

در واقع، فشار اکوستیکی کل به دو مؤلفه فشار ضخامتی[۱۳] (p'_T) و فشار بارگذاری[۱۴] (p'_L) تقسیم می‌شود. نویز ضخامتی ناشی از جابجایی سیال در اثر حرکت جسم درون سیال است. با توجه به اینکه عامل اصلی ایجاد این نویز، ضخامت جسم است، این مولفه،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

نویز ضخامتی نامیده می شود. پدیده دیگری که در اثر حرکت جسم درون سیال ایجاد می شود، توزیع فشار مثبت و منفی بر سطوح پشت و روی جسم می باشد. در واقع این توزیع فشار منشا اصلی ایجاد تراست در پروانه ها می باشد. به دلیل این اختلاف فشار در دو طرف جسم، یک منبع نویز دو قطبی ایجاد می شود که به آن نویز بارگذاری گفته می شود. این حل معادله FW-H با این فرض بدست آمده است که عدد ماخ پایین است و در نتیجه نویز منابع چهار قطبی قابل چشم پوشی است. بنابراین نویز کل ناشی فقط ناشی از منابع تک قطبی (نویز ضخامتی) و منابع دو قطبی (نویز بارگذاری) است. این مؤلفه ها از روابط زیر محاسبه می شود:

$$4\pi p'_T(x,t)=\int_S\left[\frac{\rho(\dot{U}_n+U_{\dot{n}})}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret}dS+\int_S\left[\frac{\rho u_n(r\dot{M}_r+cM_r-cM^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]_{ret}dS \quad (۴)$$

$$4\pi p'_L(x,t)=\frac{1}{c}\int_S\left[\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret}dS+\frac{1}{c}\int_S\left[\frac{L_r-L_M}{r^2(1-M_r)^2}\right]_{ret}dS+\frac{1}{c}\int_S\left[\frac{L_r(r\dot{M}_r+c(M_r-M^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]_{ret}dS \quad (۵)$$

کمیتهای مورد استفاده در روابط (۴) و (۵) در جدول ۱ تعریف شده است.

جدول ۱- پارامترهای معادلات FW-H

c	سرعت صوت در سیال
ρ	چگالی سیال
r	فاصله منبع صوت و ناظر
M	عدد ماخ
M_r	تصویر بردار ماخ بر روی بردار r
$\vec{x}$ و t	مکان و زمان ناظر
$\vec{y}$ و τ	مکان و زمان منبع (زمان چشمه)
p	فشار هیدرودینامیکی
n	بردار نرمال یکه سطح
$\vec{u}$	سرعت منبع نویز واقع شده روی سطح صلب
$\vec{v}$	سرعت جریان (در صورت صلب بودن جسم، سرعت جریان و سرعت منبع برابر است)

پارامترهای معادلات (۴) و (۵) بصورت زیر تعریف می شود:

$$U_i=(1-\frac{\rho}{\rho_0})v_i+\frac{\rho u_i}{\rho_0}$$
$$L_i=P_{ij}\hat{n}_j+\rho u_i(u_n-v_n) \quad (۶)$$

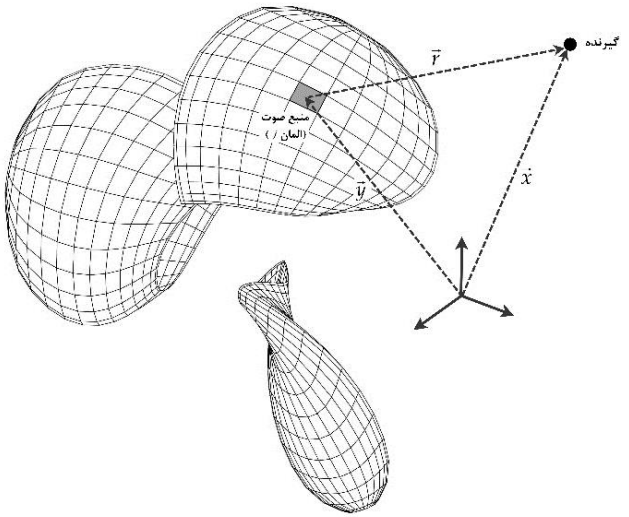
با توجه به تراکم ناپذیر بودن آب در اعداد ماخ پایین، ρ با ρ_0 برابر است. همچنین، با توجه به اینکه پروانه بصورت صلب در نظر گرفته می شود، مقدار سرعت برخورد جریان به پروانه (υ) و سرعت منبع صوت (u) با هم برابر است. بنابراین خواهیم داشت:

$$U_i=v_i$$
$$L_i=P_{ij}\hat{n}_j \quad (۶)$$

۳- الگوریتم نرم افزار عددی محاسبه نویز

در این بخش الگوریتم حل عددی توسط نرم افزار حل معادلات نویز بررسی می‌شود. مفهوم مهمی که در این قسمت باید تشریح شود، زمان چشمه[15] یا زمان انتشار[16] می باشد. اندیس ret در روابط (۴) و (۵) بدین معنی است که محاسبات باید با استفاده از مقادیر در زمان چشمه (τ) انجام شود. زیرا همواره یک تاخیر زمانی بین انتشار صوت از منبع تا رسیدن به گیرنده وجود دارد که این زمان بستگی به فاصله منبع صوت و گیرنده و سرعت صوت در سیال دارد. زمان چشمه مطابق شکل ۱ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\tau=t-\frac{|\vec{x}-\vec{y}|}{c}=t-\frac{|\vec{r}(\tau)|}{c} \quad (۶)$$

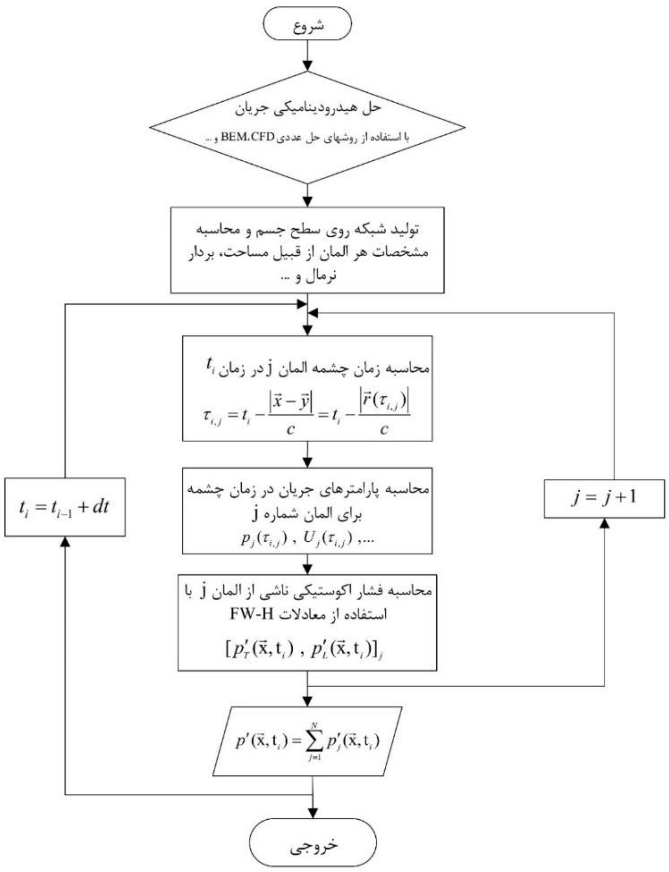


شکل ۱ - مفهوم بردار فاصله گیرنده و منبع صوت

در حالتی که منبع صدا و گیرنده هر دو ساکن هستند، محاسبه زمان چشمه بصورت دقیق و بدون سعی و خطا امکان پذیر است اما در حالتی که منبع صدا متحرک باشد، مانند محاسبه نویز پروانه که منابع صوت (پره های پروانه) در حال حرکت هستند، با توجه به اینکه بردار r نیز تابعی از زمان چشمه است، برای محاسبه زمان چشمه از روشهای سعی و خطا استفاده می شود. نکته مهم در محاسبه فشار اکوستیکی آن است که پارامترهای جریان از قبیل فشار و سرعت با توجه محدودیت های مدلسازی هیدرودینامیکی جریان، فقط در زمان های خاصی محاسبه می شود و برای هر زمان چشمه دلخواه این اطلاعات وجود ندارد. بنابراین برای محاسبه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

اطلاعات در زمانهای چشمه دلخواه، می‌توان از درونیابی استفاده کرد. الگوریتم محاسبه فشار اکوستیکی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- الگوریتم محاسبه نویز با استفاده از روش FW-H

در نخستین گام، جریان اطراف جسم با روشهای عددی از قبیل CFD و BEM مدلسازی می شود و کمیتهایی نظیر فشار، سرعت و ... بر روی سطح جسم استخراج و سپس با استفاده از این خروجی ها، برای یک گیرنده در مکان مشخص $(\vec{x})$ و در زمان مورد نظر (t_i) فشار اکوستیکی محاسبه می شود. با مشخص بودن فاصله هر المان از گیرنده، زمان چشمه (τ_j) برای المان مذکور محاسبه می شود. تمام کمیتهای مورد نیاز در روابط (۴) و (۵) باید برای هر المان در زمان چشمه محاسبه شود و انتگرال های عددی فوق برای هر المان حل شده و فشار اکوستیکی ناشی از آن المان بدست می آید. با جمع کردن فشارهای اکوستیکی تمام المان ها، فشار اکوستیکی کل بدست می‌آید.

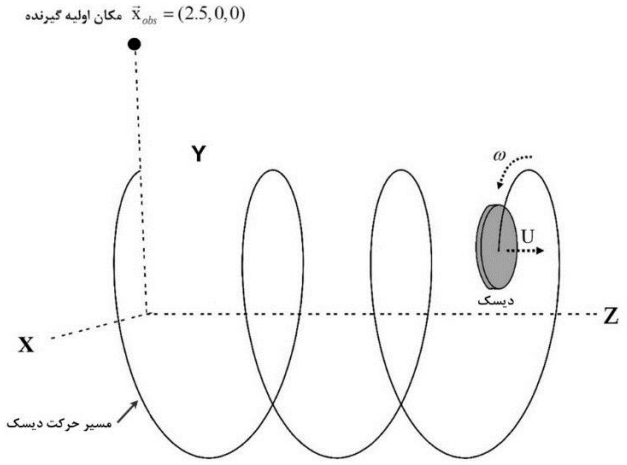
۴-صحت سنجی نتایج

در این بخش، برای اطمینان از صحت نتایج نرم افزار توسعه داده شده برای محاسبه نویز، نتایج آن با نتایج تحلیلی نویز یک دیسک چرخان و نتایج حل عددی یک ایرفویل که توسط فلوئنت انجام شده است، مقایسه می شود.

۴-۱ محاسبه نویز دیسک چرخان

در این بخش، با استفاده از نرم افزار توسعه داده شده، یک مسئله ساده مورد بررسی قرار می گیرد و نویز آن محاسبه می شود. مسئله مورد مطالعه، یک دیسک بعنوان ترکیبی ساده از منابع تک قطبی و دو قطبی می باشد که بعنوان مدل ساده شده یک پروانه می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. این دیسک دارای شعاع ۰/۱ متر می باشد که مطابق

شکل ۳ با سرعت دورانی $\omega = 34\pi$ rad/s و شعاع چرخش۱/۲۸ متر حول محور Z دوران می کند. همچنین این دیسک دارای حرکت انتقالی در امتداد محور Z با سرعت ۱۴۵ m/s می باشد. حل تحلیلی این مسئله در مرجع [۱۲] تشریح شده است.



شکل ۳ - مسیر حرکت دیسک دوار

موقعیت منابع صوت بصورت زیر تعریف می شود:

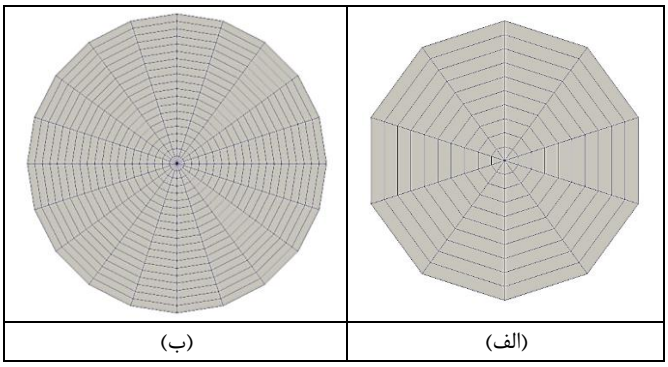
$$\vec{x}_s = (a\cos(\omega t), a\sin(\omega t), Ut) \qquad (۶)$$

گیرنده صوت در زمان صفر در نقطه $\vec{x}_{obs} = (2.5,0,0)$ قرار گرفته است و سپس به موازات حرکت انتقالی دیسک، در جهت محور Z با سرعت $U = 145$ m/s حرکت می کند.

جهت مدلسازی منبع دو قطبی بر روی دیسک، فرض شده است نیروی $f_0 = 700\ N$ در جهت محور Z به دیسک وارد می‌شود که معادل نیروی تراست پروانه می باشد. فرض می‌شود این نیرو ناشی از توزیع یکنواخت فشار بر روی سطح دیسک است. همچنین، منبع یک تک قطبی به اندازه $q_0 = 1.8\ \mathrm{m^3/s}$ در محل دیسک فرض می-شود که معادل جابجایی سیال توسط پروانه می‌باشد. چگالی سیال $\rho_0 = 1.2\ kg/m^3$ و سرعت صوت در سیال $c = 316$ m/s فرض می شود.

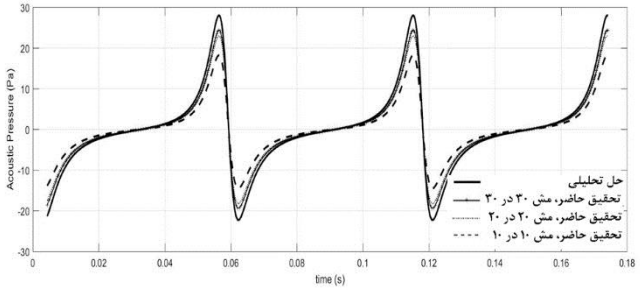
جهت محاسبه فشار اکوستیکی ناشی از حرکت این دیسک، سطح دیسک توسط المان های قطبی شبکه بندی می‌شود. دو شبکه بندی مورد استفاده در شکل ۴ نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

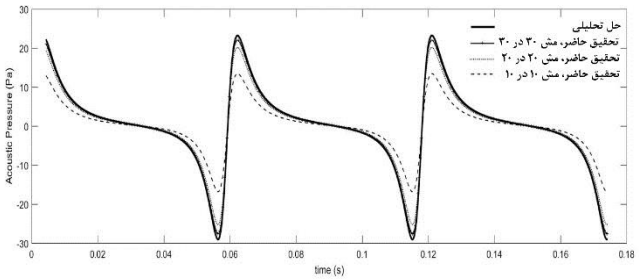


شکل ۴ - شبکه بندی مورد استفاده در مدلسازی دیسک دوار (الف) شبکه ۱۰ در ۱۰ (ب) شبکه ۲۰ در ۲۰

اطلاعات هندسی هر المان شامل مساحت المان، بردار نرمال و ... توسط نرم افزار توسعه داده شده محاسبه می شود. در مرحله بعد، اطلاعات جریان شامل فشار و سرعت روی هر المان و برای هر گام زمانی استخراج می شود. با استفاده از اطلاعات فوق، فشار اکوستیکی ناشی از چرخش این دیسک با استفاده از معادلات FW-H محاسبه می‌شود. در شکل ۵ و ۶ فشار اکوستیکی ناشی از منبع تک قطبی و دو قطبی حاصل از نرم افزار حل عددی با حل تحلیلی [۱۲] مقایسه شده است.



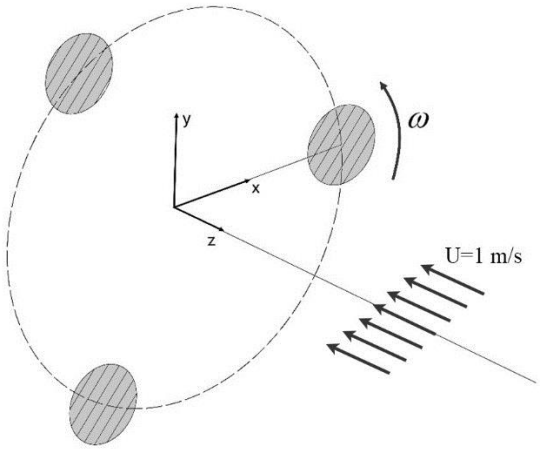
شکل ۵ - فشار اکوستیکی ناشی از منبع تک قطبی



شکل ۶ - فشار اکوستیکی ناشی از منبع دو قطبی

با مقایسه نتایج حل حاضر و حل تحلیلی، مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین نتایج فشار اکوستیکی وجود دارد. بررسی های انجام شده بین شبکه بندی های مختلف نشان می دهد با شبکه بندی ۱۰ در ۱۰، خطای زیادی در نتایج بوجود می آید ولی نتایج شبکه بندی ۲۰ در ۲۰ و ۳۰ در ۳۰ دقت خوبی دارند و حداکثر خطا در مقایسه با نتایج تحلیلی ۵ درصد می باشد.

در صورتی که بجای یک دیسک، چند دیسک با فاصله مساوی حول محور دوران بچرخند، مدل ساده شده یک پروانه بدست می آید. در این بخش، نویز ناشی از چرخش یک پروانه ۳ پره با هندسه کاملاً ساده مورد بررسی قرار می گیرد. این پروانه از ۳ پره به شکل دیسک ساده (مشابه حالت قبل) تشکیل شده است که با فواصل منظم از هم قرار گرفته اند. دیسک های این پروانه دارای شعاع ۰/۱ متر می باشند که مطابق شکل ۷ با سرعت دورانی مشخص حول محور Z دوران می کنند. این دیسک در امتداد محور Z دارای حرکت انتقالی نیست و مشابه یک پروانه واقعی، فرض می شود جریان با سرعت ۱ متر بر ثانیه (U) به دیسک پروانه برخورد می کند.



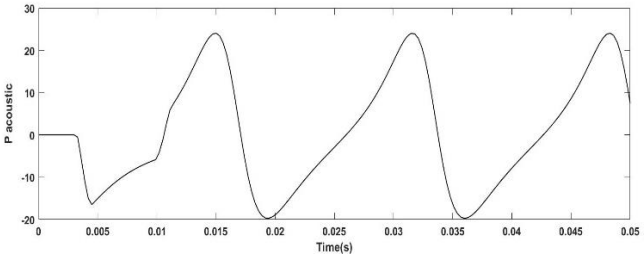
شکل ۷ - هندسه یک پروانه ساده

سرعت دورانی پروانه برابر با ۱۲۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شده است که معادل معادل فرکانس ۲۰ هرتز می باشد. بطور معمول، نویز پروانه برای گیرنده ای که در صفحه چرخش پروانه واقع شده است، در فرکانس عبوری پره [۱۷] و هارمونیک های بالاتر آن دارای پیک می باشد. این فرکانس ها از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$BPF = Z \times rps \times h \qquad (۷)$$

که در این رابطه، Z تعداد پره های پروانه، rps فرکانس چرخش پروانه و h شماره هارمونیک می باشد. با توجه به اینکه تعداد پره ها در این مورد برابر با ۳ می باشد، سه هارمونیک اول فرکانس عبوری پره برابر است با ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ هرتز. با توجه به اینکه در این مسئله، گیرنده در صفحه چرخش پروانه واقع شده است، انتظار می‌رود بر روی نمودار تراز شدت صوت بر حسب فرکانس، در این فرکانس ها نمودار دارای پیک باشد. فشار اکوستیکی کل ناشی از یک دور چرخش پروانه در شکل ۸ نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]



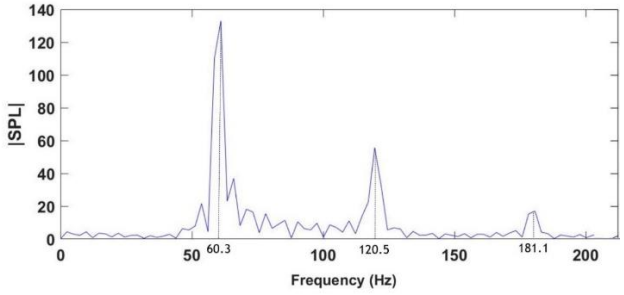
شکل ۸ - فشار اکوستیکی ناشی از چرخش پروانه

با توجه به سرعت چرخش پروانه، هر یک دور چرخش پروانه ۰/۰۵ ثانیه طول می‌کشد. از سوی دیگر، چون تعداد پره های پروانه ۳ عدد است، در هر ۰/۰۱۶۷ ثانیه یکی از پره ها در نزدیک ترین فاصله نسبت به گیرنده قرار می‌گیرد. بنابراین همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، در زمانهای ۰/۰۱۶۷ ، ۰/۰۳۳۷ و ۰/۰۵ ثانیه نمودار فشار اکوستیکی دارای پیک است.

جهت تبدیل فشار اکوستیکی در حوزه زمان به تراز شدت صوت در حوزه فرکانس از تبدیل سریع فوریه و رابطه زیر استفاده می شود:

$$SPL = 20\log(p_{acoustic} / p_{ref}) \qquad (۸)$$

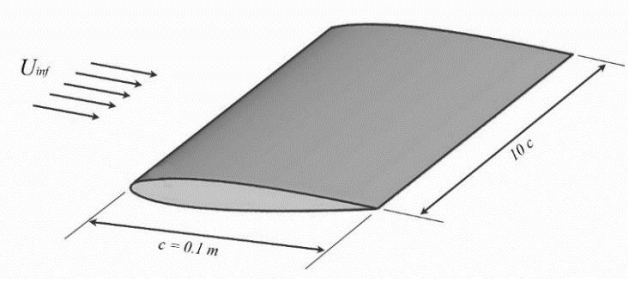
در رابطه (۸) ، p_{ref} فشار مرجع می باشد که مقدار آن برای سیال آب برابر μPa ۱ است.پس از تبدیل سریع فوریه، تراز شدت صوت پروانه بر حسب فرکانس در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، نویز تولیدی پروانه در هارمونیک های فرکانس عبوری پره دارای پیک می باشد که این مطلب نشان دهنده صحت نتایج کد می باشد.



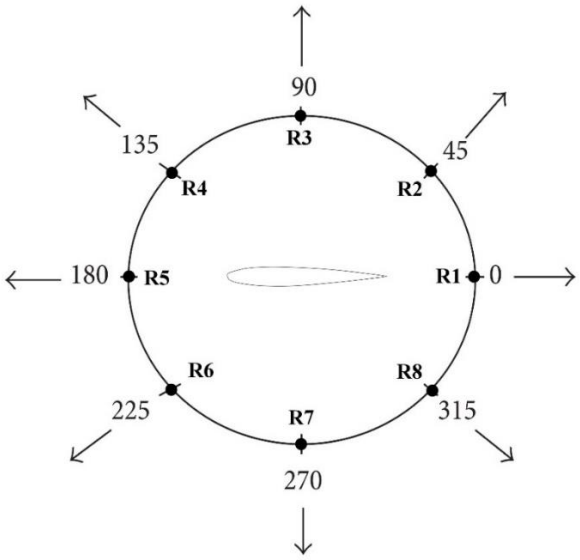
شکل ۹ - تراز شدت صوت بر حسب فرکانس برای مدل ساده پروانه

۴-۲ محاسبه نویز ایرفویل

دومین مسئله مورد بررسی در این بخش، نویز ایجاد شده ناشی از جریان روی ایرفویل NACA0012 می باشد. این مسئله برای زاویه حمله صفر درجه حل می شود. طول کورد ایرفویل ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. محاسبات نویز برای ۸ گیرنده با فواصل منظم بر روی یک دایره به شعاع ۰/۱۸ متر اطراف ایرفویل انجام می شود. هندسه مسئله در شکل ۱۰ و موقعیت گیرنده‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

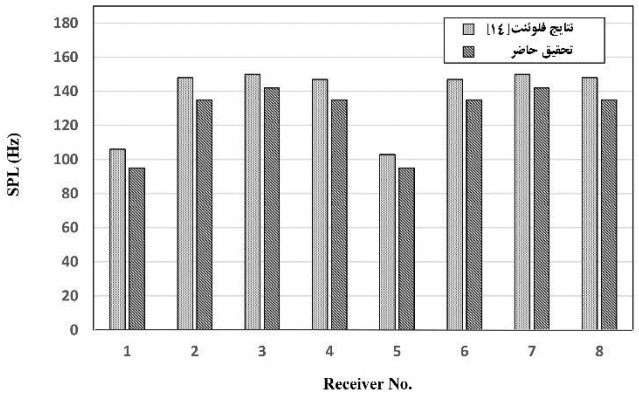


شکل ۱۰ - هندسه ایرفویل NACA0012



شکل ۱۱ - موقعیت گیرنده های اطراف ایرفویل

نویز محاسبه شده برای این گیرنده ها در شکل ۱۲ با نتایج حل عددی بدست آمده از نرم افزار فلوئنت [۱۴] مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد تطابق خوبی بین نتایج نرم افزار توسعه داده شده و نتایج فلوئنت وجود دارد.



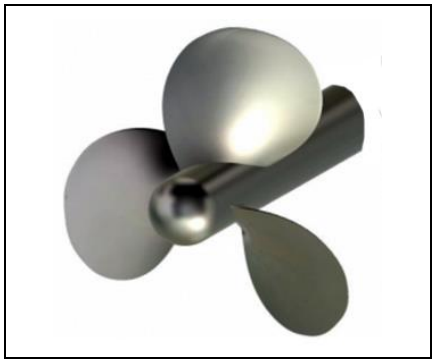
شکل ۱۲ - مقایسه نتایج نرم افزار محاسبه نویز با نتایج فلوئنت

همانگونه که در شکل فوق مشاهده می شود، حداکثر خطای نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج فلوئنت حدود ۸ دسی بل است. یکی از منابع این خطا، صرفنظر کردن از منابع چهارقطبی نویز است که به دلیل ماهیت روش پانل، امکان استخراج داده های لازم جهت محاسبه این منابع وجود ندارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

۵- نتایج محاسبه نویز پروانه DTMB 4119

هندسه پروانه DTMB 4119 در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. جزئیات مشخصات هندسی این پروانه نیز در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱۳- پروانه DTMB 4119

جدول ۲- مشخصات هندسی پروانه DTMB 4119

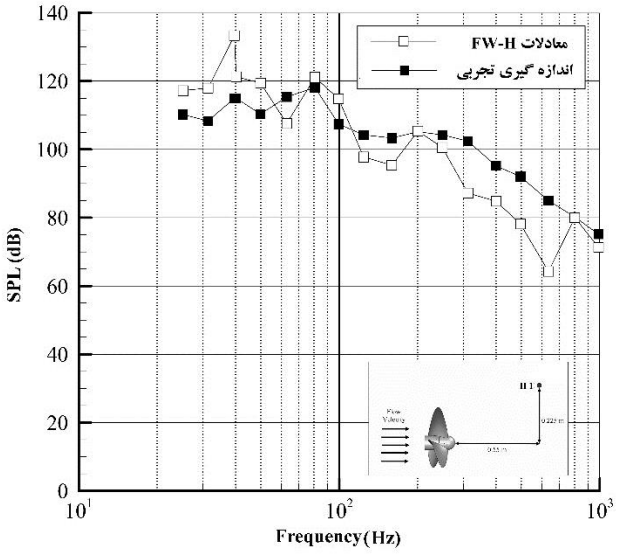
r/R	c/D	Skew	Rake	P/D	t_{max}/c	f_{mac}/c
۰/۲	۰/۳۲۰	۰	۰	۱/۱۰۵۰	۰/۲۰۵۵	۰/۰۱۴۳
۰/۲۵	۰/۳۴۲	۰	۰	۱/۱۰۳۷	۰/۱۷۰۷	۰/۰۱۹۹
۰/۳	۰/۳۶۳	۰	۰	۱/۱۰۲۲	۰/۱۵۵۳	۰/۰۲۳۲
۰/۴	۰/۴۰۴	۰	۰	۱/۰۸۹۳	۰/۱۱۸۰	۰/۰۲۳۰
۰/۵	۰/۴۳۹	۰	۰	۱/۰۹۳۲	۰/۰۹۰۲	۰/۰۲۱۸
۰/۶	۰/۴۶۱	۰	۰	۱/۰۸۷۹	۰/۰۶۹۶	۰/۰۲۰۷
۰/۷	۰/۴۶۲	۰	۰	۱/۰۸۳۹	۰/۰۵۴۲	۰/۰۲۰۰
۰/۸	۰/۴۳۴	۰	۰	۱/۰۸۱۱	۰/۰۴۲۱	۰/۰۱۹۷
۰/۹	۰/۳۶۱	۰	۰	۱/۰۷۸۵	۰/۰۳۳۲	۰/۰۱۸۲
۰/۹۵	۰/۲۷۷	۰	۰	۱/۰۷۷۰	۰/۰۳۲۳	۰/۰۱۶۳
۰/۹۹	۰/۱۳۲	۰	۰	۱/۰۷۵۵	۰/۰۳۱۹	۰/۰۱۳۰

برای اندازه گیری نویز پروانه DTMB 4119، ابتدا مدلسازی هیدرودینامیکی آن توسط کد عددی پانل انجام و مشخصات هیدرودینامیکی پروانه برای زمان های مختلف استخراج می‌شود. مقادیر فشار و سرعت جریان روی هر المان سطح پره های پروانه در هر گام زمانی در یک آرایه ذخیره می شود و بعنوان ورودی نرم افزار محاسبه نویز مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت بررسی دقت نتایج حل عددی، مدل پروانه در تونل کاویتاسیون آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه شریف مورد آزمایش قرار گرفته است و نویز آن اندازه گیری شده است. جهت صحت سنجی نرم افزار محاسبه عددی نویز پروانه از یک هیدروفون بعنوان گیرنده استفاده می شود. این هیدروفون در موقعیتی مشابه هیدروفون استفاده شده در تست آزمایشگاهی قرار گرفته است و از نتایج تجربی برای صحت سنجی نتایج نرم افزار استفاده خواهد شد. هیدروفون مورد استفاده در آزمایشگاه و جانمایی تجهیزات تست در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴ – هیدروفون TC4042 و جانمایی تجهیزات تست

در شکل ۱۵ نتایج محاسبه نویز با نتایج تجربی مقایسه شده است. این مدلسازی مربوط به سرعت دورانی ۷۹۲ دور بر دقیقه و سرعت محوری ۲/۲ متر بر ثانیه (ضریب پیشروی ۰/۸۳۳) می‌باشد.



شکل ۱۵ – مقایسه نتایج نرم افزار توسعه داده شده با نتایج تجربی

همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، در محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۲۵۰ هرتز نتایج نرم افزار محاسبه نویز دارای مطابقت خوبی با نتایج تجربی است و حداکثر دارای ۱۰ دسی بل خطا می‌باشد. این خطا می تواند ناشی از دو عامل باشد:

- خطای محاسبه مقادیر فشار و سرعت جریان توسط روش پانل
- خطای محاسبه نویز توسط معادلات FW-H
- صرفنظر کردن از منابع چهار قطبی نویز

یکی از مواردی که در اندازه گیری نویز در تونل کاویتاسیون باید مدنظر قرار گیرد، اثرات انعکاس صوت از دیواره های تونل است. انعکاس صوت باعث می شود مقدار اندازه گیری شده توسط هیدرفون دارای خطا باشد و غالباً نویز پروانه را بیش از حد واقعی ثبت کند. این موضوع نیز یکی دیگر از عوامل اختلاف بین نتایج عددی و تجربی است. در فرکانس های کمتر از ۵۰ و بیشتر از ۲۵۰ هرتز، نتایج نرم افزار دارای خطای نسبتاً زیادی می باشد. این نتایج

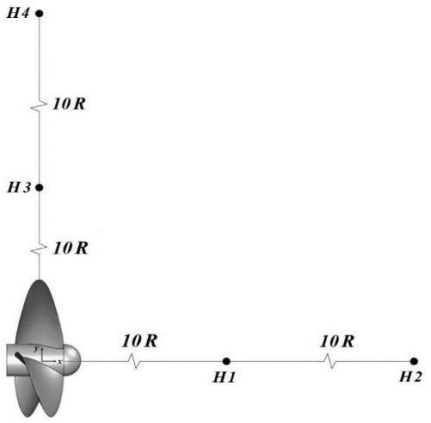
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

نشان می دهد از این نرم افزار عددی محاسبه نویز می توان برای تخمین تراز شدت صوت پروانه های دریایی استفاده کرد.

در مرحله بعد از چهار هیدروفون برای اندازه گیری عددی نویز پروانه استفاده می‌شود. دو هیدروفون در صفحه چرخش پروانه و دو هیدروفون در جلوی هاب پروانه قرار گرفته است. مختصات مکان هیدروفون‌ها در جدول ۳ و شکل ۱۶ نشان داده شده است.

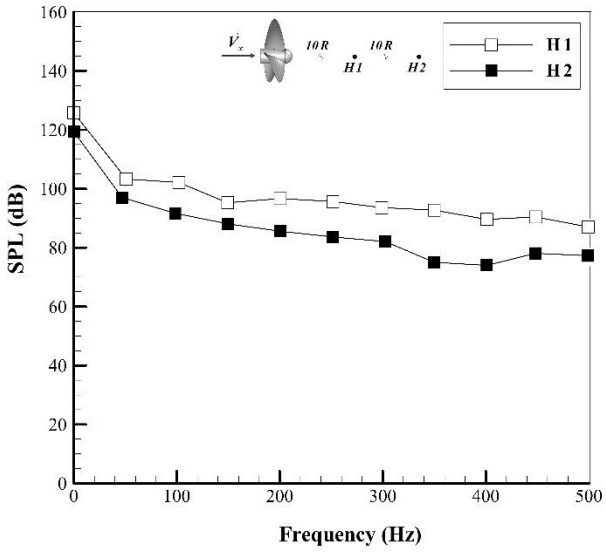
جدول ۳- موقعیت هیدروفون ها

	X(m)	*Y(m)*	*Z(m)*
H1	۱	۰	۰
H2	۲	۰	۰
H3	۰	۱	۰
H4	۰	۲	۰



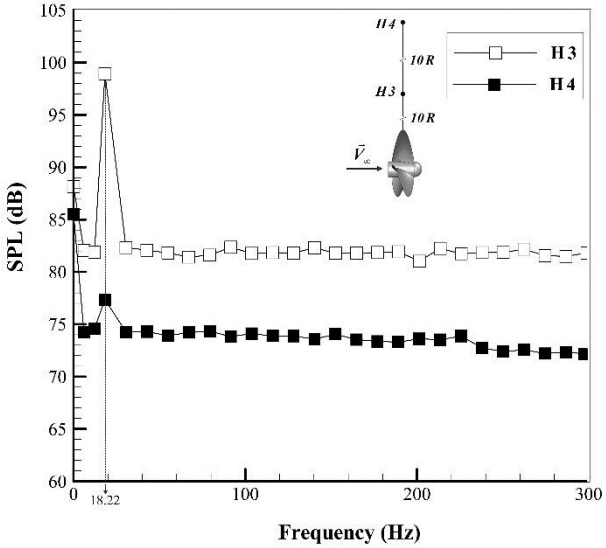
شکل ۱۶- موقعیت هیدروفون ها

نویز محاسبه شده در هیدروفونهای H1 و H2 در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه نویز پروانه در هیدروفونهای H1 و H2

مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از پروانه، نویز دریافتی توسط H2 نسبت به H1 کاهش چشمگیری داشته است. این کاهش در فرکانس های بالا محسوس تر است. در شکل ۱۸، نویز پروانه در صفحه چرخش آن در دو فاصله مختلف (هیدروفونهای H3 و H4) با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۸ - مقایسه نویز پروانه در هیدروفونهای H3 و H4

همانگونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله هیدروفون از پروانه، نویز کاهش چشمگیری داشته است. همچنین، در هر دو نمودار، در فرکانس هرتز، نویز دارای یک مقدار بیشینه می باشد. این فرکانس به فرکانس عبوری پره معروف است که حاصلضرب تعداد پره های پروانه در فرکانس چرخش پروانه می باشد. برای پروانه فوق، تعداد پره ها برابر ۳ و فرکانس چرخش پره برابر ۶/۰۷۵ هرتز می باشد. بنابراین فرکانس عبوری پره برابر ۱۸/۲۲ هرتز می باشد که در نمودارها نیز مشخص شده است.

۶ - نتیجه گیری

در این مقاله، نرم افزار توسعه داده شده جهت محاسبه نویز غیر کاویتاسیونی پروانه های دریایی با استفاده از معادلات FW-H مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت.

جهت صحت سنجی نتایج در ابتدا نویز یک دیسک چرخان با این نرم افزار محاسبه شد و نتایج با حل تحلیلی مقایسه شد. همچنین، نویز یک ایرفویل با این نرم افزار محاسبه شد و نتایج با نتایج بدست آمده از نرم افزار فلوئنت مقایسه شد. این بررسی ها نشان می دهد نتایج نرم افزار توسعه داده شده دارای دقت مناسبی در محاسبه نویز می باشد. جهت صحت سنجی نتایج برای محاسبه نویز پروانه، در ابتدا مدل پروانه DTMB 4119 در تونل کاویتاسیون مورد آزمایش قرار گرفت و نویز آن اندازه گیری شد. مقایسه نتایج تجربی و نتایج نرم افزار توسعه داده شده نشان می دهد در محدوده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]

فرکانس ۵۰ تا ۲۵۰ هرتز، دقت نتایج نرم افزار مطلوب بوده و نتایج نرم افزار محاسبه عددی نویز مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. در فرکانس های دیگر، مقدار خطا اندکی بیشتر است اما می توان گفت دقت این نرم افزار جهت محاسبه نویز پروانه قابل قبول است.

کلید واژگان

۱- Seol
۲- Ducted Propeller
۳- Yo cun
۴- Kellett
۵- Kowalczyk
۶- Rayleigh-Stokes
۷- Lighthill
۸- Ffowcs Williams
۹- David Hawkings
۱۰- Far Fields
۱۱- Retarded Time
۱۲- Ffowcs Williams- Hawkings (FW-H)
۱۳- Thickness Pressure
۱۴- Loading Pressure
۱۵- Retarded time
۱۶- Emission time
۱۷- Blade Passing Frequency

۷ – مراجع

1- Kinsler, L. A., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V., (2000), *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons.

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

3- Seol, H., Suh, J. C., & Lee, S., (2005), *Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise*. Journal of Sound and Vibration, 288(1-2), p.345-360

4- Pan, Y. c., & Zhang, H. x., (2013), *Numerical prediction of marine propeller noise in non-uniform inflow*. China Ocean Engineering, 27(1), p.33-42.

5- Kellett, P., Turan, O., & Incecik, A., (2013), *A study of numerical ship underwater noise prediction*. Ocean Engineering, 66, p. 113-120.

6- Bagheri, M., Seif, M., & Mehdigholi, H., (2014), *Numerical Simulation of underwater propeller noise*. Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace, 4, p. 4-9

7- Kowalczyk, S., & Felicjancik, J., (2015), *Numerical and experimental propeller noise investigations*. Ocean Engineering, 120, p.108-115.

8- Gorji, M., Ghassemi, H., & Mohamadi, J., (2019), *Effect of rake and skew on the hydrodynamic characteristics and noise level of the marine propeller*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 43(1), p. 75-85 .

9- Lighthill, M., (1954), *On Sound Generated Aerodynamically*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 211, p. 564-587.

10- Ffowcs Williams, T. E., & Hawkings, D. L., (1969), *Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 264(1151), p.321-342.

11- Lighthill, M. J., (1954), *On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound.* Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 222(1148), p.1-32.

12- Rienstra, S. W., & Hirschberg, A. *An introduction to acoustics*. Report IWDE, pp.92-06.

13- Farassat, F. (2007), *Derivation of Formulations 1 and 1A.* 214853(March), p.1-25 .

14- Ghadimi, P., Kermani, S., & Feizi Chekab, M. A., (2013), *Numerical hydro-acoustic analysis of NACA foils in marine applications and comparison of their acoustic behavior*. ISRN Mechanical Engineering, 2013.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.4.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.13]