

# تحلیل عددی انتشار نوفه صوتی از پروانه دریایی مغروق

سامان کرمانی<sup>۱</sup>، پرویز قدیمی<sup>۱\*</sup>، رحیم زمانیان<sup>۲</sup>، محمد امین فیضی چکاب<sup>۱</sup>

۱. دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. واحد بین الملل دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

یکی از نقاط ضعف شناورهای سطحی و زیرسطحی از نظر شناسایی صوتی، نوفه‌ی (نویز) ساطع شده از پروانه آن‌ها است. در این راستا، گام اول در مسیر تلاش برای کاهش آن، دستیابی به فن‌آوری پیش‌بینی و محاسبه نوفه (نویز) تولیدشده توسط پروانه در شرایط کارکردی مختلف است. در این مقاله، پس از تبیین روش کیرشیف برای حل معادلات صوتی، به حل هیدرودینامیکی یک پروانه‌ی مغروق سری B پرداخته و با استفاده از فشار صوتی بدست آمده در میدان فشار اطراف پروانه، به بررسی میدان صوتی تولیدشده به وسیله پروانه، پرداخته شده است. تحلیل هیدرودینامیکی پروانه با استفاده از نرم‌افزار آنسیس-سی‌اف‌ایکس انجام گرفته و تحلیل صوتی توزیع فشار حاصل با نرم‌افزار نوشته شده آکوستیک پایتون تحقق پذیرفته است. نتایج تحلیل انتشار نوفه (نویز) در جهت‌ها و فاصله‌های مختلف نشان‌دهنده صحت عملکرد این نرم‌افزار است.

**کلید واژه‌ها:** هیدرودینامیک، آووتی (هیدروآکوستیک)، نوفه (نویز)، پروانه‌ی مغروق، روش کیرشیف، انتشار صدا

## ۱. مقدمه

را محدود‌بندی و چشمه‌های صوتی پروانه را از نظر میزان اثر در شناسایی شناور، طبقه‌بندی نمود. با مروری بر مطالعات مشابه، مشاهده می‌گردد که فعالیت‌های زیادی در زمینه‌ی آووتی (هیدروآکوستیک)<sup>۱</sup> پروانه انجام شده است، ولی فاقد نتایج دقیق و کامل است. در ادامه، چند نمونه از بهترین فعالیت‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است، ارائه می‌گردد.

نیلسون [۱] در سال ۱۹۸۰ به بررسی آزمایشگاهی ارتعاش القایی ناشی از پروانه روی بدنه‌ی شناور پرداخت.

شارما [۲] در سال ۱۹۹۰ به بررسی نوفه (نویز)<sup>۲</sup> کاواک‌زایی (کاویتاسیون)<sup>۳</sup> پروانه‌های دریایی پرداخته است. این مطالعه بر روی پنج نمونه پروانه شامل سه نمونه پایه و دو نمونه بهینه شده انجام شد. در این بررسی انواع گردابه‌هایی<sup>۴</sup> که می‌توانند مولد نوفه (نویز) باشند، پرداخته شده است.

شناسایی و ردگیری شناور به وسیله رادارهای صوتی از جمله چالش‌ها و مسائل عمده و جاری در دریانوردی است. یکی از عواملی که تأثیر بسزایی در شناسایی شناورهای سطحی و زیرسطحی توسط رادارهای صوتی دارد، صدای ناشی از تغییرات فشاری است که حرکت پروانه در آب به وجود می‌آورد. می‌توان اظهار کرد که بالاترین شدت صدای تولیدشده توسط شناورها، را سامانه‌ی رانش آن‌ها ایجاد می‌کند. در میان سامانه‌های رانش دریایی، پروانه بیش‌ترین صدا را تولید می‌نماید.

با توجه به آن چه ذکر شد، شناخت چگونگی انتشار و رفتار صدای تولیدشده به وسیله پروانه‌ها در محیط دریایی به همان میزان اهمیت دارد که شناسایی عوامل مؤثر در کاهش تولید صدای پروانه مهم است. در صورتی که نحوه‌ی انتشار صدای ناشی از پروانه به درستی شناخته شود، می‌توان ویژگی‌های مختلف صدا

<sup>1</sup> Hydroacoustic

<sup>2</sup> Noise

<sup>3</sup> Cavitation

<sup>4</sup> Vortex

\* نویسنده پاسخگو: pghadimi@aut.ac.ir

آن‌ها اطلاعات دقیق و کاربردی را فراهم نمی‌کنند. در ادامه، روش کیرششف که یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تحلیل صوتی میدان دور است، ارائه می‌شود. سپس به تحلیل آوصوتی (هیدروآکوستیکی) یک نمونه پروانه مغروق پرداخته می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### روش کیرششف برای حل مسایل صوتی

روش‌های مختلفی برای تحلیل انتشار صدای اجسام در میدان دور وجود دارد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، روش کیرششف است که در ادامه تشریح شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰-۱۳]. در این روش، ابتدا باید با استفاده از حل معادلات ناویر-استوکس، توزیع فشار اطراف جسم مورد نظر به دست‌آید. سپس یک سطح بسته و تقریباً به شکل جسم مورد مطالعه، پیرامون آن در نظر گرفته می‌شود. این سطح، سطح کیرششف نامیده می‌شود. در این روش فرض می‌شود، صدای جسم از روی این سطح منتشر می‌شود. معادله‌ی موج صدای همگن به قرار زیر است:

$$\nabla^2 p(x, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن  $p(x, t)$  فشار صوتی به صورت تابعی از مکان و زمان  $(x, t)$  و  $c$  سرعت صدا در سیال است. با در نظر گرفتن تابع گرین برای فضای سه بعدی  $(S)$ ، انتگرال معادله‌ی ۱ برای اجسام متحرک به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{aligned} \forall \pi p'(x, t) = & \iint_S \left[ \frac{E_1}{r(1-M_r)} \right]_{\tau} dS + \\ & \iint_S \left[ \frac{p'E_r}{r^2(1-M_r)} \right]_{\tau} dS \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن

$$r = |\vec{r}|, \quad \vec{r} = \vec{x} - \vec{y}(\tau), \quad M_r = M \frac{\vec{r}}{r}$$

$$E_1 = -\hat{n} \cdot \nabla p' + (\vec{M} \cdot \hat{n})(\vec{M} \cdot \nabla p') +$$

$$\left[ \frac{\cos\theta - \vec{M} \cdot \hat{n}}{c_{\infty}(1-M_r)} - \frac{\vec{M} \cdot \hat{n}}{c_{\infty}} \right] \frac{\partial p'}{\partial \tau}$$

کاستلینی و سانتولینی [۳] در سال ۱۹۹۸ ارتعاش پره‌های پروانه دریایی را با لرزه‌نگار لیزری، اندازه گرفتند.

سئولند و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۵ یک روش عددی را برای پیش‌بینی نوفه پروانه گسترش دادند. این روش عددی بر روی حالات بدون کاواک‌زایی (کاویتاسیون) و کاواک‌زایی صفحه‌ای، مطالعه شده است. این روش عددی مبتنی بر روش پانل<sup>۱</sup> است.

هم‌چنین در یک مطالعه‌ی پژوهشی روش نوفه‌ی تولیدشده در اطراف یک استوانه (سیلندر) با دو شیوه آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. در شیوه عددی مطالعه مذکور، معادلات ناویر-استوکس همراه با معادلات خطی موج حل شده‌اند.

تستا [۵] در رساله دکترای خود در سال ۲۰۰۸، روابط صوتی را برای پروانه‌های هوایی و دریایی براساس معادله‌های ویلیامز و هاوکینگز به دست آورده است.

دی‌فلیس و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۶ مطالعات عددی و آزمایشگاهی را بر روی رفتار یک پروانه عمومی زیردریایی انجام دادند.

کوانکون و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۹ با یک روش عددی رفتار و نوفه (نویز) حاصل از گردابه نوک<sup>۲</sup> را بررسی کردند. این روش ترکیبی از دیدگاه‌های اوبلری و لاگرانژی است که می‌تواند گردابه را شبیه‌سازی کند. میدان جریان نیز با روش ترکیبی ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده روی عدد رینولدز<sup>۳</sup> و الگوی گردابه تفرقی<sup>۴</sup> حل شده است.

کنولسو و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی را بر روی تونل کاواک‌زایی (کاویتاسیون) در چشمه‌های تولید نوفه پروانه، انجام دادند.

اندرسن و همکاران [۹] نیز در سال ۲۰۱۰ ویژگی‌های آوصوتی (هیدروآکوستیکی) پروانه زیردریایی را بهینه نمودند.

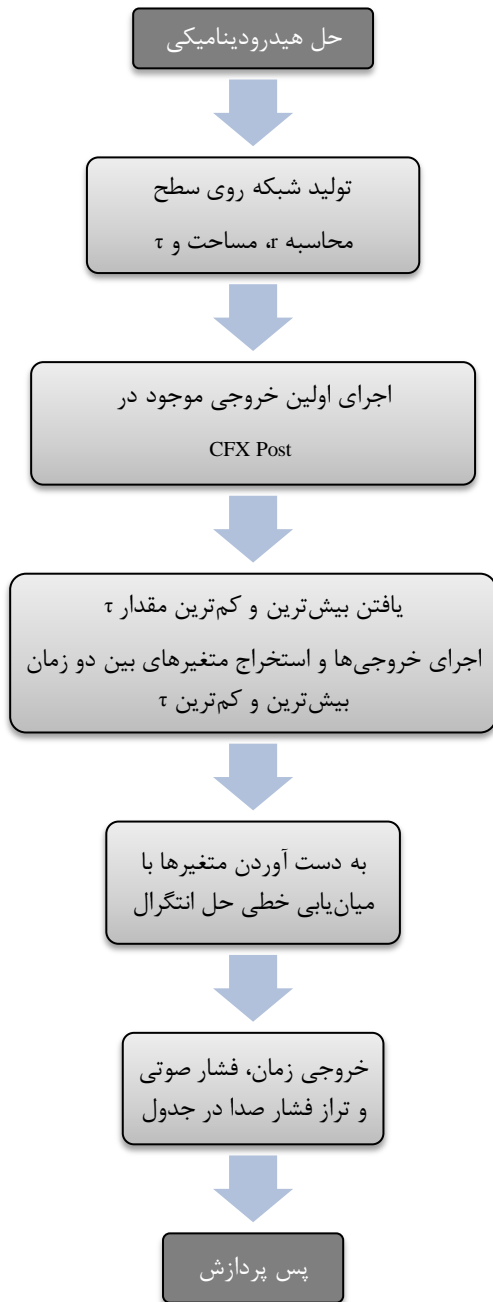
همان‌گونه که پیش از این ذکر شد، مطالعات متعددی درباره نوفه صوتی پروانه انجام شده، ولی هیچ یک از

<sup>1</sup> Panel Method

<sup>2</sup> Tip Vortex

<sup>3</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

<sup>4</sup> Dissipation Vortex Model



شکل ۱ روند برنامه انتشار صدا.

### ۳. نتایج

#### تحلیل هیدرودینامیکی پروانه

در این بخش تحلیل آووتی (هیدروآکوستیکی) یک نمونه پروانه‌ی سری B (پنج پره) انجام می‌شود. ابتدا می‌باید این پروانه در نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس الگوسازی

$$E_r = \frac{1 - M^r}{(1 - M_r)^r} (\cos\theta - \vec{M} \cdot \hat{n})$$

$$\tau = t - \frac{r(\tau)}{c_\infty}$$

در این فرمول‌ها  $\vec{M}$  بردار عدد ماخ است که از تقسیم مؤلفه‌های سرعت بر سرعت صدا در محیط به دست می‌آید،  $\tau$  زمان چشمه‌ی نوفه (نویز)،  $\tau$  مختصات صفحه‌ی چشمه‌ها (سطح کیرشهف)،  $\hat{n}$  بردار عمود عناصر (المان‌ها) صفحه چشمه‌ها،  $c_\infty$  سرعت صدا در سیال،  $\vec{r}$  بردار واصل هر چشمه تا ناظر و  $\theta$  زاویه بین  $\vec{r}$  و  $\hat{n}$  است.

در مقاله‌ی حاضر، تحلیل هیدرودینامیکی پروانه با نرم‌افزار آنسیس - سی‌اف‌ایکس<sup>۱</sup> انجام شد و برای اعمال روش کیرشهف، نرم‌افزاری تحت زبان پایتون با عنوان "آکوستیک پایتون"<sup>۲</sup> تهیه شده است که با پردازش موازی، توانایی حل سریع و دقیق معادلات را دارد. الگوریتم این نرم‌افزار در شکل ۱ ارایه شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، اطلاعات موجود در مقالات برای اعتبارسنجی برنامه کافی نیست. از این‌رو، برای اعتبارسنجی برنامه "آکوستیک پایتون"<sup>۳</sup>، نرم‌افزار کامسول<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار گرفت.

برای تحقق این امر، همانند شکل ۲ ابتدا یک تپ (پالس)<sup>۴</sup> گاوسی از یک چشمه انتشار داده شد و سپس اثر آن روی ناظری واقع در شعاع ۲۰ سانتی‌متری ثبت گردید.

تپ (پالس) فشاری تولیدشده در نرم‌افزار کامسول، وارد کد تحلیل‌گر نوفه گردید و برای یک ناظر واقع در ۲۰ سانتی‌متری اجرا شد. نتیجه‌ی حاصل شده از کد و نرم‌افزار نشان می‌دهد که اعداد تنها در حدود ۰/۹ درصد اختلاف دارند (جدول ۱). بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که می‌توان به اعداد و نمودارهای حاصل از تحلیل‌گر نوفه‌ی (نویز) پروانه کاملاً اعتماد نمود. در ادامه، به تحلیل پروانه پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> ANSYS-CFX

<sup>2</sup> Acoustic Python

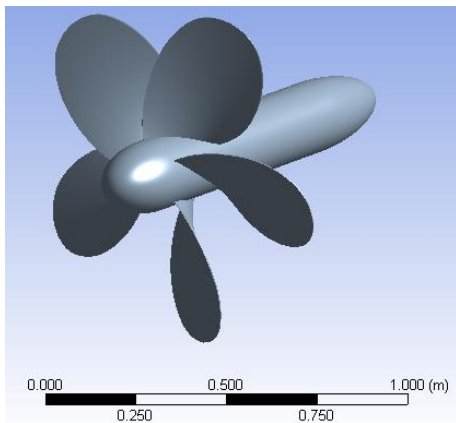
<sup>3</sup> Comsol software

<sup>4</sup> Pulse

در جدول ۲ ایی‌ای آر ضریب سطح گسترش یافته پروانه می‌باشد.

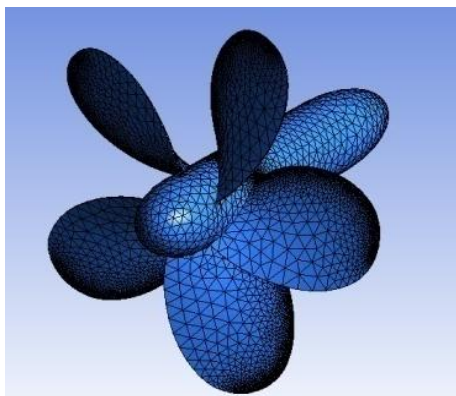
این پروانه در ضریب پیشروی ۰٫۷ مورد تحلیل قرار گرفت. به این صورت که ورودی جریان یک متر بر ثانیه و دور پروانه ۱۵ دور بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

در شکل ۵، توزیع فشار روی پروانه پس از حل، ملاحظه می‌شود.



شکل ۳ الگوسازی هندسی پروانه.

با توجه به ضریب پیشروی پروانه، پیش‌رانش (تراست)<sup>۱</sup> آن باید برابر با ۹۹۵۸۹٫۱۸ نیوتن شود. پیش‌رانش (تراست) بدست آمده در این تحلیل ۹۲۰۰۲٫۴۸ نیوتن است که دارای ۷٫۶۱۸ درصد خطای هیدرودینامیکی است. این مقدار خطا برای تحلیل هیدرودینامیکی قابل قبول است.

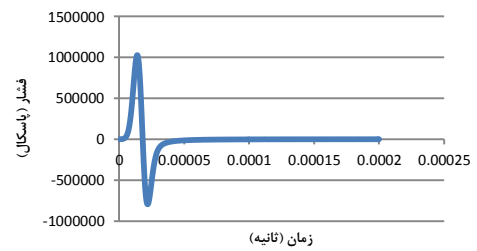


شکل ۴ شبکه‌بندی سطح پروانه.

شود. مشخصات پروانه‌ی مورد نظر در جدول ۲ ارائه شده است.

این پروانه با مشخصات فوق الگوسازی شده و در نرم‌افزار آنسیس شبکه‌بندی آن انجام گرفت. الگوسازی هندسی این پروانه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود.

هم‌چنین، شبکه‌بندی هندسه مورد نظر در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۲ تپ (پالس) گاوسی منتشر شده از چشمه.

دامنه‌ای استوانه‌ای شکل (سیلندری) حول پروانه در نظر گرفته شده است که طول آن ۲۰ برابر قطر می‌باشد.

جدول ۱ نتایج حاصل از کد تحلیل گر نوفه و نرم‌افزار کامسول.

فشار بیشینه در ناظر کد تحلیل گر نوفه	۶۶۸۱۵ پاسکال
فشار بیشینه در ناظر نرم‌افزار کامسول	۶۷۴۲۶ پاسکال

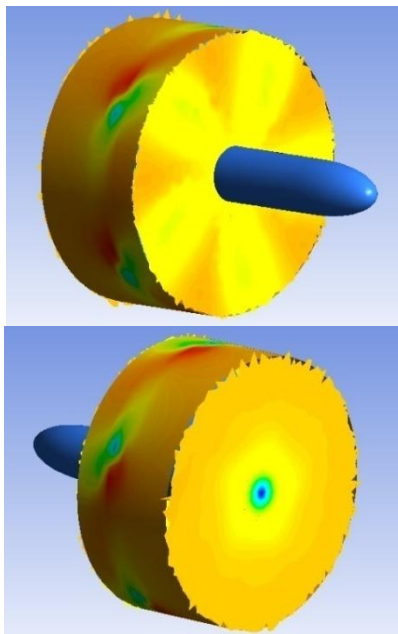
هم‌چنین قطر دامنه، هشت برابر قطر پروانه و فاصله‌ی پروانه از ورودی جریان پنج برابر قطر پروانه است.

جدول ۲ مشخصات پروانه مورد نظر.

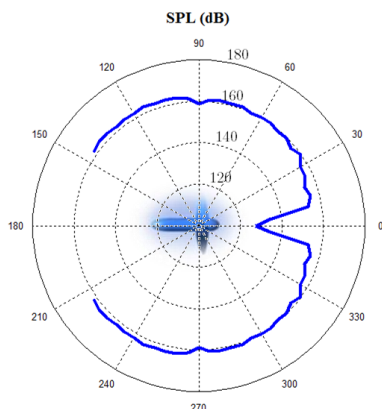
اسکیو	استاندارد سری B
ریک	۰
قطر هاب (متر)	۰٫۲
ایی‌ای آر	۰٫۷
گام	۱
تعداد پره	۵
قطر (متر)	۱

<sup>1</sup> Thrust

همان گونه که ملاحظه می‌شود، کم‌ترین نوفه (نویز)، مربوط به محور پروانه است. بیش‌ترین نوفه نیز در راستای عمود بر محور پروانه و در جهت شعاعی ایجاد می‌شود. لکن، برای تحلیل بهتری از رفتار آووتی (هیدروآکوستیکی) پروانه، می‌بایست این تحلیل در فواصل مختلف نیز انجام شود تا مشخص گردد که در جهت‌های مختلف و در بینهایت، چه صدایی شنیده می‌شود. برای تحقق چنین امری، در سه زاویه‌ی صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، در فواصل ۵، ۲۰، ۵۰۰ متری و هم‌چنین ۲۰ کیلومتری نیز نوفه‌ی شنیده شده محاسبه گردید و نتایج در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۶ توزیع فشار روی سطح کیرشرف حول پروانه.

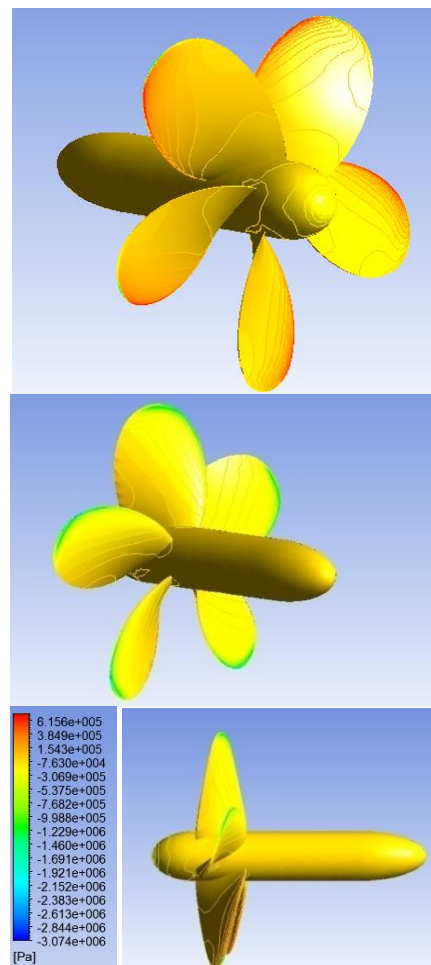


شکل ۷ تراز فشار صدای بدست آمده در زوایای مختلف اطراف پروانه در مختصات قطبی.

تحلیل آووتی (هیدروآکوستیکی) پروانه اکنون، با استفاده از توزیع فشار بدست آمده روی سطح کیرشرف تعریف شده حول پروانه (شکل ۶) به تحلیل صوتی توسط نرم‌افزار (ماکروی) تهیه شده پرداخته می‌شود.

برای انجام تحلیل آووتی (هیدروآکوستیکی) این پروانه، ابتدا ۳۰ ناظر در فاصله‌ی پنج متری پروانه با فواصل زاویه‌ای پنج درجه در نظر گرفته شد. سپس تحلیل صوتی برای ناظرها انجام شده و نتایج برای دو دور پروانه ارائه می‌شود.

حالا، با استفاده از فشار صوتی حاصله، می‌توان مقدار شدت صدا را در هر زاویه‌ای به دست آورد. مقادیر شدت صدای بدست آمده در شکل ۷ ارائه شده است. البته همان ترازهای فشار صدا نیز به صورت دکارتی در شکل ۸ ارائه می‌شوند.



شکل ۸ توزیع فشار روی پروانه از سه نمای روبرو، پشت و جانب.

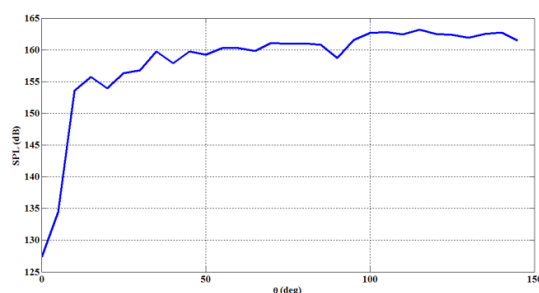
صحت‌سنجی شدند. میدان فشار پروانه در نرم‌افزار "آکوستیک پایتون" مورد تحلیل قرار گرفت و میدان صوتی حول پروانه‌ی مورد نظر، استخراج گردید. همان‌گونه که از رفتار چنین پدیده‌ای انتظار می‌رفت، با افزایش فاصله، نوفه‌ی پروانه کاهش می‌یابد و روند آن نیز قابل قبول است. از طرف دیگر، همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، نوفه در جهت شعاعی پروانه دارای بیش‌ترین مقدار است و کم‌ترین مقدار نوفه نیز مربوط به زاویه‌ی صفر درجه یا همان محور پروانه است.

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که به راحتی می‌توان با استفاده از ترکیب نرم‌افزار آنسیس-سی‌اف‌ایکس و نرم‌افزار تهیه شده‌ی "آکوستیک پایتون" در این پژوهش، نوفه‌ی حاصل از هر پروانه‌ای را در هر نقطه دلخواه مورد تحلیل و بررسی قرار داد.

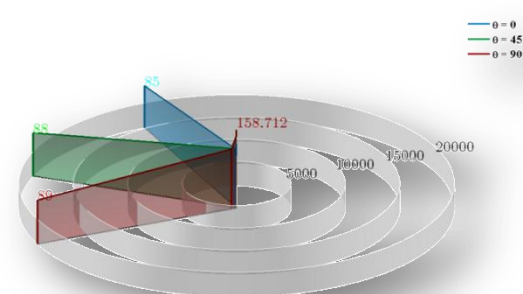
## ۵. مراجع

- [1] A.C. Nilsson, "Propeller induced hull vibration," Journal of Sound and Vibration, vol. 69, p. 539-557, 1980.
- [2] S.D. Sharma, K. Mani, V.H. Arakeri, "Cavitation noise studies on marine propellers," Journal of Sound and Vibration, vol. 138, p. 255-283, 1990.
- [3] P. Castellini, C. Santolini, "Vibration measurements on blades of a naval propeller rotating in water with tracking laser vibrometer," Measurement, vol. 24, p. 43-54, 1998.
- [4] H. Seoland, P. Kwangkun, C. Wooyoung, L. Soogab, "Numerical prediction of tip vortex cavitation behavior and noise considering nuclei size and distribution," Applied Acoustics, vol. 70, p. 674-680, 2009.
- [5] C. Testa, "Acoustic formulations for aeronautical and naval rotorcraft noise prediction based on the Ffowcs Williams and Hawkings equation," PhD thesis, Delft University of Technology, 2008.
- [6] F. Di Felice, L. Greco, F. Salvatore, "Validation of a quasi-potential flow model for the analysis of marine propellers wake," 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, Canada, Newfoundland, 2004.
- [7] P. Kwangkun, S. Hanshin, C. Wooyoung, L. Soogab, "Numerical prediction of tip vortex cavitation behavior and noise considering nuclei size and distribution," Applied Acoustics, vol. 70, p. 674-680, 2009.
- [8] P. Cheolsoo, S. Hanshin, K. Kwangsoo, S. Woojae, "A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel," Ocean Engineering, vol. 36, p. 754-762, 2009.
- [9] P. Andersen, J.P. Blasques, C. Berggreen, "Hydro-elastic analysis and optimization of a composite marine propeller," marine structures, vol. 23, p. 22-38, 2010.
- [10] J. Chung, "Computational fluid dynamics," 2<sup>th</sup> Edition, Cambridge University Press, 2010.

شکل ۹ از جمله نمودارهای منحصر به فرد و مفهومی مربوط به نرم‌افزار "آکوستیک پایتون" است. در این نمودار دایره‌ها نمایانگر محور فاصله بوده و با گام پنج کیلومتری، فاصله از پروانه را مشخص می‌نماید. همچنین مقادیر تراز فشار صدا برحسب دسی‌بل در حالت‌های بیشینه و کمینه‌ی آن روی نمودارها معین شده‌اند.



شکل ۸ تراز فشار صدای بدست آمده در زوایای مختلف اطراف پروانه در مختصات دکارتی.



شکل ۹ تراز فشار صدای بدست آمده در فواصل مختلف.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از بررسی تاریخچه‌ی تحلیل آو‌صوتی (هیدروآکوستیکی) پروانه‌های دریایی، روش کیرشهف تشریح و تحت زبان پایتون، به صورت موازی برنامه‌نویسی شد. الگوریتم نرم‌افزار تهیه شده نیز با عنوان "آکوستیک پایتون"، توصیف گردید و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

پس از آن، یک نمونه پروانه‌ی مغروق در نرم‌افزار آنسیس-سی‌اف‌ایکس مورد تحلیل هیدرودینامیکی واقع شد. سپس نتایج هیدرودینامیکی بدست آمده

- [11] J. Nahas, "Simulation of array-based field synthesis method," *Matr. Nr.* 277063.
- [12] X. Gloerfelt, "Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 266, p. 119-146, 2003.
- [13] Y. Ozyoruk, "Sound radiation from ducted fans using computational aeroacoustics on parallel computers," Thesis in Aerospace Engineering, The Pennsylvania State University, 1995.

## Numerical analysis of acoustic noise propagation from a submerged marine propeller

S. Kermani<sup>1</sup>, P. Ghadimi<sup>\*1</sup>, R. Zamanian<sup>2</sup>, M.A. Feizi Chekab<sup>1</sup>

1. Faculty of Ocean Eng, Amirkabir Univ. of Tech.

2. International Branch Amirkabir Univ. of Tech.

### Abstract

From the view point of noise recognition, one of the weaknesses of surface and underwater vessels is the generated noise from its propeller. The first effort in order to reduce this noise is to attain the technology to predict and compute the generated noise by the propeller in different operational conditions. In this paper, by introducing the Kichohf's method for solving the acoustic equations, hydrodynamic analysis of a semi-submerged Series-B propeller is performed and, subsequently, using the obtained acoustic pressure in the pressure field around the propeller, the noise field generated by the propeller is examined and analyzed. The hydrodynamic analysis of the propeller is accomplished by the Ansys-CFX software, while the acoustic analysis of the resulting pressure distribution is performed by the developed code "Acoustic Python". The validated results of noise propagation in different directions at various distances indicate accurate performance of this software.

**Keywords:** Hydrodynamics, Hydroacoustics, Noise, Submerged propeller, Kirchhoff's method, Sound propagation

pp. 1-7 (In Persian)

---

\* Corresponding author E-mail: pghadimi@aut.ac.ir