



تحلیل هیدرودینامیکی و نویز پروانه مغروق برای شرایط عملکردی مختلف به شیوه تجربی و عددی

محمدرضا باقری^۱، حمید مهدیقلی^۲، محمد سعید سیف^{۳*}

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

*تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۴ دی ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۴ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:

روش حجم محدود

کاویتاسیون

هیدرودینامیک پروانه

نویز پروانه

پهنه یکسوم اکتاو

چکیده

در این مقاله هیدرودینامیک و نویز پروانه مغروق به شیوه عددی و تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به منظور دستیابی به شرایط شروع و توسعه کاویتاسیون تحلیل عددی جریان به شیوه حجم محدود در سرعت‌های چرخشی متنوع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تست هیدرودینامیکی مدل پروانه در تونل کاویتاسیون انجام و با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده است. در بخش بعدی نتایج گرفته شده در بخش اول به عنوان ورودی جهت استخراج سطوح فشار صوت با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز در میدان دور استفاده می‌شود. به طور مشابه نویز این مدل نیز در تونل کاویتاسیون توسط دو هیدروفون اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه گردیده است. شرایط شروع و توسعه کاویتاسیون از طریق افزایش دور پروانه در فشار ثابت و افت فشار در تونل در دور ثابت ایجاد و اثرات تغییر شرایط بر نویز پروانه مورد مطالعه قرار گرفته است. سیگنال‌های ثبت شده با استفاده از روابط پهنه باند یکسوم اکتاو برای دو هیدروفون و در شرایط عملکردی مختلف آنالیز و مقایسه شده است. مطالعات صورت گرفته در هر دو قسمت انطباق قابل قبولی میان نتایج عددی و تجربی هیدرودینامیک و نویز پروانه را نشان می‌دهد.

An analysis of hydrodynamics and noise behavior for submerged propeller in various conditions by experimental and numerical methods

Mohammad reza Bagheri¹, Hamid Mahdigholi², Mohammad Said Seif^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 11155-9567 Tehran, seif@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 20 April 2013

Accepted 25 December 2013

Available Online 14 June 2014

Keywords:

Finite Volume Method

Cavitation

Propeller Hydrodynamics

Propeller Noise

One-third Octave Band

ABSTRACT

In this study hydrodynamics and noise behavior of a marine propeller is analyzed through numerical and experimental methods. In order to find out the conditions of initiation and development of cavitation, numerical analysis is carried out through Finite Volume Method (FVM) for various rotational velocities. Moreover, hydrodynamics of the propeller is tested in the cavitation tunnel and the results are compared against numerical simulations. Second, the flow results obtained in the first step were used as the input to extract the Sound Pressure Levels (SPLs) in the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) formulation, to predict the far field noise. In addition, the behavior of the obtained SPL was studied and a good agreement was observed between our data and the previous works results. Similarly, experimental results collected from two hydrophones are compared with numerical simulations. In this case, cavitation is initiated and developed by either increasing the propeller's rotational velocity in fixed pressure or dropping pressure while keeping the velocity constant. The signals registered at the two hydrophones are then filtered within one-third octave bands. The outcomes demonstrate a negligible deviation between numerical and experimental results for both noise and hydrodynamics tests.

۱- مقدمه

شناورها، نویز پروانه آن‌هاست [۱].

نویز پروانه چهار منشا اصلی دارد. منابع اصلی نویز پروانه شامل موارد زیر است [۲]:

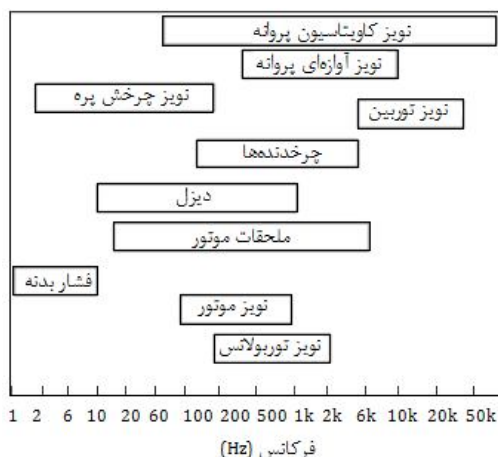
۱- جابه‌جایی آب توسط چرخش پره‌های پروانه.

اصولاً هرگونه ناهمگنی در محیط سیال و یا ارتعاش جسم در آن، منابع تولید نویز و امواج آکوستیکی در آب خواهد بود. برای شناور متحرک در دریا عوامل مختلفی موجب ایجاد نویز از آن خواهد شد. یکی از اصلی‌ترین منابع نویز

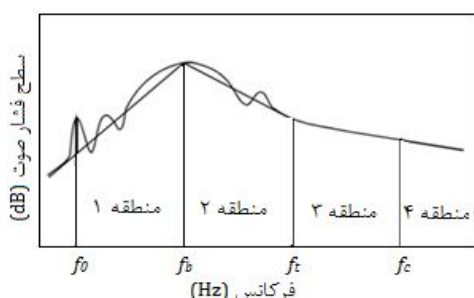
Please cite this article using:

M.R. Bagheri, H. Mahdigholi, M.S. Seif, An analysis of hydrodynamics and noise behavior for submerged propeller in various conditions by experimental and numerical methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 15-25, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۱ محدوده فرکانسی مربوط به هر یک از منابع تولید نویز در شناور [۳]



شکل ۲ محدوده فرکانسی نویز پروانه در حالت کایتاسیونی [۴]

در بخش نتایج اندازه‌گیری نویز در این مقاله، اختلاف دامنه سطح طیف نویز در حالت قبل از کایتاسیون و بعد از توسعه در یک فرکانس مرکزی مشخص تقریباً در محدوده ۱۰ تا ۳۰ دسی بل قرار دارد. باقری و همکاران سطح طیف صوت پروانه سه پره و چهار پره را در دورهای مختلف و در حالت کایتاسیونی و غیرکایتاسیونی به شیوه عددی توسط روش حجم محدود مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند که از روش، مدل توربولانسی و حلگر ارائه شده در کار آن‌ها در بخش عددی این مقاله استفاده می‌شود [۹-۱۱].

۲- معادلات اساسی در تحلیل کایتاسیون و نویز

معادله اساسی جهت بررسی انتشار صوت معادله لایت هیل می‌باشد که از تلفیق معادلات پیوستگی و مومنوم حاصل می‌شود. معادله لایت هیل طبق رابطه (۱) معرفی می‌شود. جمله‌های سمت چپ در معادله لایت هیل مربوط به انتشار صوت و جمله‌های سمت راست منابع تولید صوت هستند. اولین جمله سمت راست مربوط به تزریق جرم یا حجم به داخل سیال است و تحت عنوان منبع تک قطبی نام برده می‌شود. بیشترین تأثیر این جمله مربوط به منبع کایتاسیون است. جمله دوم اعمال نیرو به داخل سیال است و بیشتر مرتبط با اختلاف فشار به وجود آمده در جلو و عقب پروانه است. جمله سوم تنش لایت هیل بوده که در سرعت‌های پایین پروانه قابل چشم پوشی است [۱۲].

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = \dot{q} + \nabla \cdot \mathbf{f} + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

در رابطه ۱، $\dot{q}$ بیان کننده تزریق جریان جرمی و یا حجمی غیرپایا به داخل سیال می‌باشد. $\nabla \cdot \mathbf{f}$ دیورژانس نیروی ناپایای اعمالی به سیال است که در بعضی از شرایط مرزی به سیال بر میگردد. جمله سوم دربردارنده تنش توربولانس در داخل خود سیال است که توسط لایت هیل به دست آمد.

یکی از حل‌های ساده تحلیلی ارائه شده برای رابطه لایت هیل رابطه انتگرالی برای حل آن می‌باشد. حالت کلی این روابط برای اولین بار توسط

۲- اختلاف فشار میان سطوح جلو و عقب پره‌های پروانه زمانی که در حال چرخش می‌باشد.

۳- نوسانات حجمی حفره به وجود آمده روی پره‌ها (کایتاسیون صفحه‌ای).

۴- فرآیند فروریزش حفره به وجود آمده.

دو مورد اولی هم در حالت شرایط جریان غیرکایتاسیون و هم در حالت جریان کایتاسیونی وجود دارد درحالی که مورد سوم و چهارم تنها در شرایط کایتاسیونی رخ خواهد داد. مورد اول از نوع منابع نویز تک قطبی است که به آن نویز ضخامت^۱ گفته می‌شود، که بیشترین مقادیر سطح طیف صوت آن در صفحه چرخش پروانه است و مورد دوم که منبع صوت دو قطبی است تحت عنوان نویز بارگذاری^۲ است و دارای بیشترین مقادیر سطح طیف صوت در جلوی هاب پروانه است.

بنابراین در حالت کلی نویز پروانه شامل دو حالت کایتاسیونی و غیر کایتاسیونی می‌باشد. نویز حالت کایتاسیونی دارای سطوح طیف بالاتری در یک فرکانس خاص نسبت به نویز غیرکایتاسیونی می‌باشد. محدوده مرتبط با فرکانس هر یک از منابع تولید نویز پروانه در شکل ۱ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نویزهای مربوط به کایتاسیون پروانه تا بیشتر از ۱۰ کیلوهرتز ارائه می‌شود [۳].

از آنجا که یکی از مهم‌ترین منابع تولید نویز پروانه نویز کایتاسیونی می‌باشد بنابراین فیزیک این پدیده به‌خصوص در تحلیل عددی باید به‌خوبی مدل‌سازی و ارائه شود. روش‌های محاسباتی تحلیل کایتاسیون به‌طور عمده به دو گروه مدل تک‌فازی با ردیابی فصل مشترک و مدل چندفازی تقسیم می‌شوند [۲]. در این مطالعه از روش چندفازی استفاده می‌شود.

چلسو پارک و همکاران نویز یک مدل پروانه در تونل کایتاسیون را بررسی و اثرات افت فشار در نحوه تغییر صوت را مورد مطالعه قرار دادند [۴]. از مطالعات آن‌ها در بخش تغییرات پارامتریک در بخش اندازه‌گیری نویز در تونل کایتاسیون در این مقاله استفاده می‌شود. در کار تحقیقاتی مشابه آتار و همکاران کایتاسیون و نویز یک مدل توربین را به شیوه تجربی مورد بررسی قرار دادند [۵]. در تحقیقی که توسط کورکوت و همکاران انجام گرفت اثرات پوشش رنگ بر کایتاسیون و نویز یک مدل پروانه در تونل کایتاسیون بررسی شده است [۶]. در بخشی از تحقیقات آن‌ها الگوی استخراج نویز مطلق پروانه ارائه شده که در این مقاله در بخش تحلیل داده‌های اندازه‌گیری از فرمولاسیون موجود در تحقیق آن‌ها استفاده می‌شود. هانشین سول و همکاران یک روش عددی جهت مطالعه نویز غیرکایتاسیونی و نویز کایتاسیون صفحه‌ای پره پروانه ارائه داده‌اند [۷]. در نتایج آن‌ها نویز کایتاسیون صفحه‌ای ناشی از رشد و فروریزشی از یک لایه یا صفحه‌ای از حباب‌ها که حجم منحصر به فرد بر روی تیغه را دربر می‌گیرد مشاهده می‌شود. شکل ۲ نشان‌دهنده طیف نویز کلی از یک پروانه کایتاسیونی است. کایتاسیون صفحه‌ای صوت را از ۵ هرتز تا بیشتر از ۱۰ کیلوهرتز منتشر می‌نماید. نویز فرکانس پایین (منطقه ۱ و ۲ بر روی شکل ۲) ناشی از نوساناتی از حجم‌های کایتاسیون صفحه‌ای است. از طرفی دیگر نویز فرکانس بالا (منطقه ۳ و ۴) توسط فروریزش حفره صفحه‌ای یا توسعه موج شوک به وجود می‌آید [۷].

شارما و همکاران چند مدل پروانه را در تونل کایتاسیون مورد تست قرار داده و سطح طیف صوت آن‌ها را استخراج که بررسی نتایج نشان از آن است که اختلاف سطح طیف صوت کلی در حالت کایتاسیونی و غیرکایتاسیونی در حدود ۱۰ تا ۳۰ دسی بل می‌باشد [۸].

1- Thickness noise
2- loading noise

ویلیامز و هاوکنگز ارائه شد. کاربرد این روابط برای پیش‌بینی میدان آکوستیکی، برای مناطق دور از جسم می‌باشد که در روش حجم محدود از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکنگز^۱ جهت استخراج سطح طیف صوت پروانه در میدان دور استفاده می‌شود و میدان حل بینهایت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با استفاده از این معادلات انعکاس از دیواره وجود ندارد [۴]. ابتدا با حل جریان در اطراف جسم، منابع تولید نویز مشخص می‌گردد. با تعریف سطح مرجعی در اطراف جسم که در این مقاله صفحه چرخش پروانه و منطبق بر محور هاب در نظر گرفته شده است به عنوان منبع تولید صوت در رابطه لایت هیل استفاده می‌شود. شرایط مرزی مختص حل جریان سیال، تعریف که این شرایط در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که بیان شد معادلات ویلیامز و هاوکنگز برای فضای بینهایت و بدون انعکاس از محیط حل می‌شوند [۱۳، ۱۴].

پیش از حل معادله (۱) باید جریان حول پروانه حل شود تا منابع تولید صوت که مهم‌ترین آن کاویتاسیون پروانه است استخراج و صحت‌سنجی شود. جهت تحلیل کاویتاسیون به عنوان مهم‌ترین منبع تولید صوت دو روش تک-فازی و چندفازی وجود دارد، مبنای حل استفاده شده جهت تحلیل کاویتاسیونی در روش حجم محدود مورد استفاده در این مقاله استفاده از روش چندفازی است.

بخش اصلی مرتبط با مدل فیزیکی کاویتاسیون، استخراج کسر جرمی معادل بین فاز بخار و مایع می‌باشد که در مطالعه حاضر جمله چشمه در تحلیل عددی توسط رابطه (۲) به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial x} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{C}_m) = \Gamma_n = \dot{m}_l^v + \dot{m}_c^v \quad (2)$$

جهت حل معادله (۲) از روش حجم محدود برای استخراج جمله چشمه یعنی $\dot{m}_l^v$ و $\dot{m}_c^v$ براساس معادله رایلی- پلیست اصلاح شده استفاده می‌شود که نتیجه آن به شکل ارائه کسر جرمی بخار موجود بر روی سطح پره است [۱۵، ۱۶]. در رابطه (۲) α_l کسر حجمی مایع، ρ_l چگالی سیال و C_m بردار سرعت می‌باشد. کسر جرمی بخار جهت ارائه در معادله لایت هیل به عنوان جمله اول (جمله تک قطبی کاویتاسیونی) توسط روابط (۳) و (۴) ارائه می‌شود [۱۶].

$$\dot{m}_l^v = -F^v \frac{3\rho_v \alpha_{nuc} \alpha_l}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \text{Max} \left(\frac{P_v - P}{\rho_l}, 0 \right)} \quad (3)$$

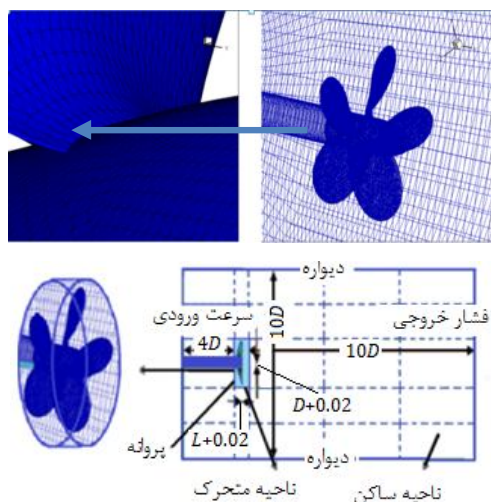
$$\dot{m}_c^v = -F^c \frac{3\rho_v (1 - \alpha_l)}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \text{Max} \left(\frac{P_v - P}{\rho_l}, 0 \right)} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، P فشار استاتیکی در سیال، P_v فشار بخار اشباع، α_{nuc} کسر حجمی گازهای چگال ناپذیر، R_0 شعاع اولیه حباب که معادل با 10^{-6} متر است. F^v و F^c ضرایب تجربی که به ترتیب معادل با ۵۰ و ۰/۱ می‌باشند.

۳- مدل سازی و تحلیل عددی

در این مقاله از یک مدل پروانه پنج پره با قطر ۰/۱۵ متر، نسبت گام ۱ که پروانه‌ای با کاربرد زیاد در شناورهای تجاری است استفاده می‌شود. مدل این پروانه جهت انجام کارهای تحقیقاتی در آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف موجود می‌باشد که این مدل پروانه پر کاربرد، به منظور اندازه‌گیری نویز انتخاب شده است.

نکته قابل توجه در بخش عددی این مقاله شبکه‌بندی بسیار ریز جهت گرفتن دقت و صحت جواب‌ها به خصوص در حالت کاویتاسیونی است. تعداد شبکه در این مدل پروانه به منظور گرفتن جواب‌های صحیح و به منظور مطالعه پیرامون تعداد شبکه متغیر بوده که در بخش نتایج، مقایسه میان تعداد



شکل ۳ شبکه‌بندی پروانه، ناحیه محاسباتی حل و اعمال شرایط مرزی

مقدار فشار استاتیک در فشار معمول کاری (یک اتمسفر) برای تحلیل‌های غیر کاویتاسیونی ثابت نگه‌داشته می‌شود، البته برای ایجاد شرایط کاویتاسیونی با کمک تحلیل عددی در شرایط عملکردی مختلف شرایط شروع و توسعه کاویتاسیون حاصل شده است که از شرایط به‌دست آمده در تحلیل عددی جهت رخداد این پدیده در تونل کاویتاسیون استفاده می‌شود.

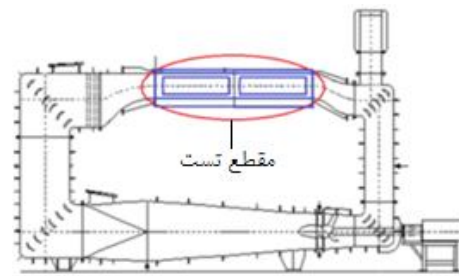
به‌منظور ایجاد پدیده کاویتاسیون با ثابت نگه‌داشتن سرعت محوری و تغییر دور پروانه در فشار ثابت و همچنین ثابت نگه‌داشتن سرعت محوری و دور با ایجاد افت فشار پدیده کاویتاسیون ایجاد می‌شود. دلیل اصلی انجام تست در بخش هیدرودینامیکی تعیین ضرایب بدون بعد در نمودار مشخصات کارکردی می‌باشد. همچنین در بخش هیدرودینامیک نحوه شروع و توسعه کاویتاسیون بر روی پروانه مد نظر می‌باشد.

در تحلیل عددی صورت گرفته در این مقاله شروع کاویتاسیون و شکل‌گیری کسر حجمی بخار برای این مدل پروانه دقیقاً در $J=0.12$ که معادل با $V=0.17\text{m/s}$, $N=1400\text{rpm}$ است به‌وجود می‌آید. در تست موجود در تونل کاویتاسیون شروع پدیده کاویتاسیون دقیقاً در این محدوده می‌باشد که از لحاظ کیفی شروع و توسعه کاویتاسیون در بخش نتایج مشاهده می‌شود.

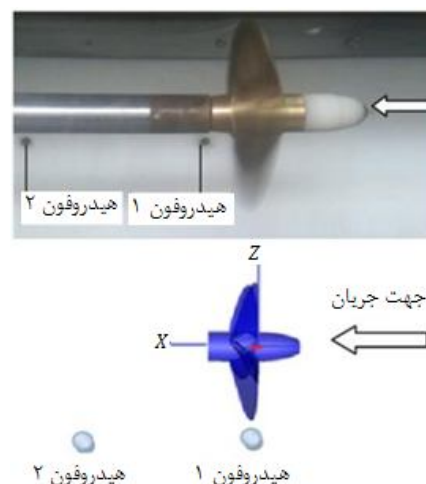
همچنین از دیگر مطالعات موجود در این مقاله اندازه‌گیری نویز این مدل پروانه در تونل کاویتاسیون می‌باشد. مقطع تست تونل کاویتاسیون دانشگاه صنعتی شریف در شکل ۴ مشاهده می‌شود. ابعاد مقطع اندازه‌گیری تونل کاویتاسیون آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف مخزنی مستطیلی شکل به ابعاد $630 \times 350 \times 320$ (عرض) $\times$ (عمق) $\times$ (طول) (mm) می‌باشد. در بخش اندازه‌گیری نویز از دو هیدروفون مدل B&K8103 به‌همراه ملحقات آن شامل شارژ آمپلی فایر دو کاناله مدل ۲۶۱۰ استفاده می‌شود. این هیدروفون‌ها محدوده فرکانسی 0.1Hz-180kHz و با یک حساسیت گیرنده حدود $1\text{V}/\mu\text{Pa}$ re 211dB را دارد. این نوع هیدروفون پاسخ فرکانسی بالایی دارد و جهت اندازه‌گیری‌های نویز کاویتاسیونی مفید است. جهت تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال از یک کارت A/D هشت بیتی استفاده می‌شود. کالیبره هیدروفون‌ها با استفاده از کالیبراتور هیدروفون ۴۲۲۹ مربوط به شرکت B&K صورت گرفته است. به‌طوری که این هیدروفون‌ها داخل کالیبراتور هیدروفون قرار گرفته و سیگنال دریافتی به دستگاه خروجی (ملحقات اندازه‌گیری) انتقال و میزان انحراف آن مشخص می‌شود.

محل قرارگیری هیدروفون‌ها بر روی مقطع جانبی در تونل کاویتاسیون می‌باشد. با توجه به امکانات موجود، برآورد نیازها در پدیده‌شناسی نویز پروانه و همچنین مطالعات آماری موجود در شانزدهمین و هفدهمین گزارش منتشر شده توسط کمیته تست مخزن آب^۱ موقعیت هیدروفون‌های ۱ و ۲ در این مقاله مطابق جدول ۱ و شکل ۵ نسبت به پروانه لحاظ می‌شود [۱۷]. یکی از اهداف موجود در این مقاله پدیده‌شناسی نویز پروانه و ارائه نتایج در دو موقعیت یکی نزدیک پروانه و دیگری در فاصله دورتری از پروانه در شرایط عملکردی مختلف را بیان می‌کند. ارائه نتایج خصوصاً در هیدروفون ۲ حائز اهمیت است، زیرا از نظر مکانی این هیدروفون در میدان دور واقع شده است (میدان دور برای پروانه فاصله $6R$ تا $10R$ از منبع که در صفحه چرخش پروانه قرار دارد لحاظ می‌شود [۱۷]).

هدف از انجام تست در بخش اندازه‌گیری نویز، استخراج و آنالیز نویز مطلق پروانه در تونل کاویتاسیون براساس شرایط عملکردی مختلف می‌باشد. از آنجا که تولید و توسعه کاویتاسیون و به دنبال آن نویز ناشی از آن هدف



شکل ۴ تونل کاویتاسیون K23 و قسمت‌های مختلف بدنه آن



شکل ۵ محل قرارگیری هیدروفون‌ها نسبت به پروانه

جدول ۱ مختصه قرارگیری هیدروفون‌ها در تونل کاویتاسیون

شماره هیدروفون	Z(m)	Y(m)	X(m)
۱	۰/۲۲۵	۰	۰
۲	۰/۲۲۵	۰	۰/۵

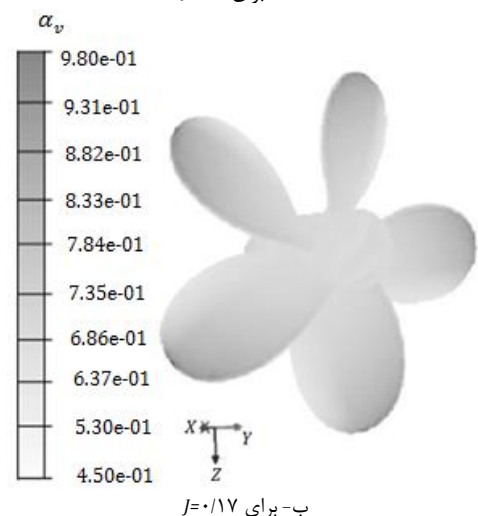
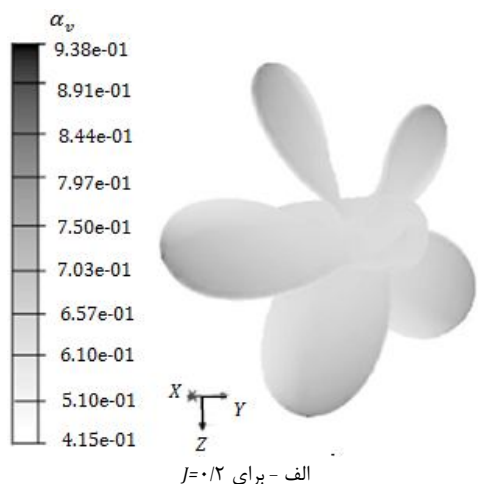
جدول ۲ شرایط عملکردی پروانه مدل جهت انجام تست نویز در تونل کاویتاسیون

سرعت دورانی rpm	سرعت جریان m/s	فشار تونل kPa
۹۰۰	۰/۵	۹۰
۱۱۰۰	۰/۶	۹۰
۱۴۰۰	۰/۷	۹۰
۱۴۰۰	۰/۷	۶۰
۱۴۰۰	۰/۷	۷۰
۱۴۰۰	۰/۷	۸۰
۱۶۰۰	۰/۸	۹۰
۱۶۰۰	۰/۷	۹۰

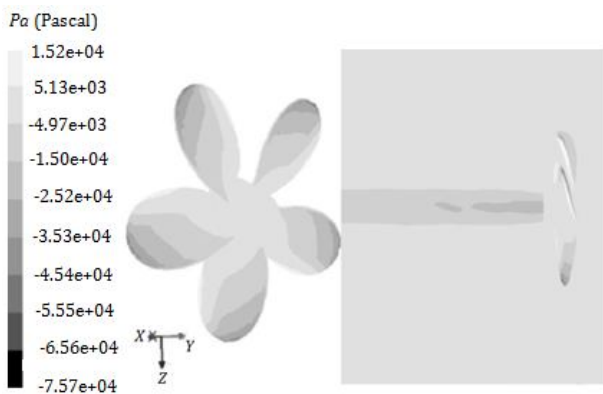
جدول ۳ شرایط عملکردی مختلف پروانه در فشار اتمسفر

سرعت دورانی rpm	سرعت جریان m/s	فشار تونل kPa
۳۰۰	۰/۵	۳۰۰
۴۰۰	۰/۵	۴۰۰
۵۰۰	۰/۵	۵۰۰
۷۰۰	۰/۵	۷۰۰
۹۰۰	۰/۵	۹۰۰
۱۱۰۰	۰/۶	۱۱۰۰
۱۲۰۰	۰/۶	۱۲۰۰
۱۳۰۰	۰/۷	۱۳۰۰
۱۴۰۰	۰/۷	۱۴۰۰
۱۶۰۰	۰/۷	۱۶۰۰

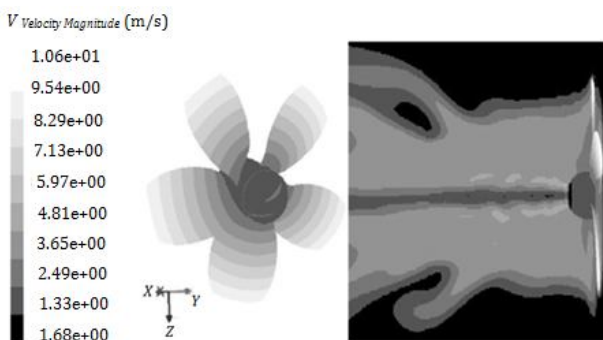
1- ITTC (Institute Towing Test Committee)



شکل ۶ نتایج مربوط به کانتورهای کسر حجمی بخار در فشار اتمسفر



شکل ۷- الف کانتور فشار استاتیک جهت محاسبه عدد کایتاسیون در $J=0.17$



شکل ۷- ب کانتور میدان سرعت جهت محاسبه عدد کایتاسیون در $J=0.17$

می‌باشد، بنابراین مدل موجود در این مقاله در شرایط عملکردی مختلفی تست و مورد بررسی قرار گرفته است. برای این مدل پروانه، دور از ۲۰۰۰ - ۲۰۰ rpm، سرعت جریان از ۰/۵ - ۲ m/s و فشار داخل تونل کایتاسیون از ۹۰ - ۴۰ kPa تغییر داده می‌شود. هدف از ایجاد این تغییرات و اعمال شرایط عملکردی مختلف در تونل کایتاسیون شرایط شروع و توسعه پدیده کایتاسیون و در نهایت اندازه‌گیری و مقایسه نویز مطلق پروانه، در شرایط مختلف می‌باشد. چون حجم داده‌ها، آنالیز و محاسبه آن‌ها زمان‌بر است بنابراین در این مقاله شرایط عملکردی مهم برای این مدل پروانه ارائه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

۵- نتایج

۵-۱- نتایج عددی و تجربی در بخش هیدرودینامیکی پروانه

در این بخش نتایج هیدرودینامیک پروانه استخراج و مورد بحث قرار گرفته است. جهت مقایسه میان نتایج، شرایط عملکردی مناسب جهت مشاهده پدیده کایتاسیون و تشکیل کسر حجمی بخار استخراج شده است. شروع کایتاسیون و کسر حجمی بخار برای این مدل پروانه در دور ۱۴۰۰ rpm و سرعت جریان ۰/۷ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. شرایط عملکردی مختلف پروانه جهت تحلیل عددی در جدول ۳ مشاهده می‌شود. از موارد قابل توجه در این تحقیق اهمیت وقوع کایتاسیون در اثر افزایش دور پروانه نسبت به سرعت ورودی جریان است.

این مدل پروانه در بخش عددی در شرایط عملکردی بسیاری مورد تحلیل قرار گرفته است تا اثر تغییر دور و سرعت جریان به‌ازای ضریب پیشروی یکسان مورد مقایسه قرار گیرد، با ملاحظه کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در تحلیل عددی این موضوع حائز اهمیت است که تغییر دور در مقدار عدد کایتاسیون نسبت به تغییر سرعت جریان، تاثیر بیشتری در شروع کایتاسیون دارد. بنابراین پروانه با ثابت نگه‌داشتن سرعت جریان در ۰/۷ m/s و تغییر دور در محدوده ۱۶۰۰ - ۱۳۰۰ rpm تحلیل جریانی به شیوه حجم محدود می‌شود. نتایج مربوط به کانتورهای کسر حجمی بخار برای $J=0.17$ و $J=0.17$ در شکل ۶ به‌ازای افزایش دور پروانه قابل ملاحظه است. همان‌طور که از شکل ۶ برای کسر حجمی بخار مشاهده می‌شود با افزایش دور پروانه کسر حجمی بخار به‌شدت افزایش یافته به‌طوری که در دور ۱۶۰۰ rpm مقدار وسیعی از سطح پره را فاز بخار تشکیل می‌دهد. برای $J=0.17$ ماکزیمم کسر حجمی بخار ۰/۹۸ و مینیمم آن ۰/۴۵ و برای $J=0.17$ ماکزیمم کسر حجمی بخار ۰/۹۳ و مینیمم آن ۰/۴۱ می‌باشد.

نتایج عددی کانتور فشار استاتیکی و سرعت به‌ازای سرعت ثابت ۰/۷ m/s و برای دورهای ۱۶۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. زمان اجرای هر یک از شرایط عملکردی تحلیل جریان در یک سوپر کامپیوتر و با احتساب ۸ هسته برای هر حل حدود ۱۵ روز به طول انجامیده است.

در شکل ۶ کسر حجمی بخار شکل گرفته بر روی پروانه مشاهده می‌شود و با دقت در این شکل می‌توان دید زمانی که دور از ۱۴۰۰ rpm به ۱۶۰۰ rpm افزایش می‌یابد کسر حجمی بخار شکل گرفته بر روی پره‌ها حجم زیادی را به خود اختصاص خواهد داد. هرگاه پروانه دارای دور کم باشد، کایتاسیون در $r=0$ یعنی در ریشه بررسی (به‌علت وجود هاب و رتکس) و اگر دور پروانه زیاد باشد کایتاسیون در $r=0.17$ (نزدیکی نوک پره) بررسی می‌شود. اعداد کایتاسیون در این دو حالت طبق روابط (۵) و (۶) به‌دست می‌آید [۲].

مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود انطباق خوبی میان نتایج عددی و تجربی برای ضریب تراست، گشتاور و بازده برای شبکه‌بندی ۳ و ۴ با نتایج تجربی برقرار می‌باشد.

همان‌طور که بیان شد این پروانه در شرایط عملکردی مختلفی تست که در نهایت در دور ۱۴۰۰ rpm کاویتاسیون رخ داده و کسر حجمی بخار در شکل ۶ و ۹ در دو شرایط عددی و تجربی مشاهده می‌شود. با افت فشار در تونل کاویتاسیون میزان کسر حجمی بخار و به دنبال آن پدیده کاویتاسیون تشدید می‌شود. از نکات قابل توجه در این مقاله شکل‌گیری کاویتاسیون دقیقاً بر روی نوک پره در دو حالت عددی و تجربی پروانه می‌باشد. مراحل شروع و توسعه کاویتاسیون برای دور ثابت ۱۴۰۰ rpm و سرعت جریان ۰/۷ m/s به - ازای افت فشار از ۹۰-۶۰ kPa در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افت فشار میزان کاویتاسیون و شکل‌گیری کسر حجمی بخار بر روی پروانه افزایش می‌یابد که این موضوع به‌خوبی در فشار ۶۰ kPa مشاهده می‌شود. میزان افت فشار تاثیر زیادی بر روی میزان افزایش سطح طیف صوت دارد که در بخش نتایج مربوط به نویز ارائه می‌شود.

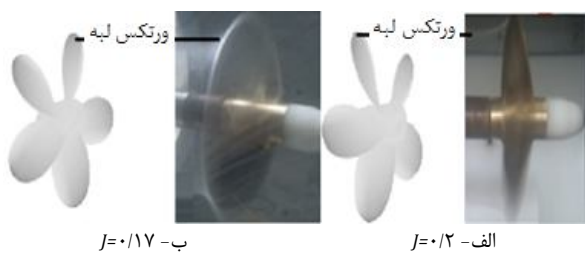
۵-۲- نتایج عددی، اندازه‌گیری و آنالیز داده‌های نویز

در این مقاله از معادله اساسی ویلیامز و هاوکنگز و به روش حجم محدود جهت استخراج سطح طیف صوت پروانه استفاده می‌شود. دامنه و نحوه رفتار نتایج سطح طیف صوت در محدوده مناسب نسبت به سایر کارهای عددی و تجربی قرار دارد [۴-۸]. به‌طور طبیعی هر چه از پروانه فاصله گرفته شود دامنه سطح طیف صوت کمتر می‌شود که علت آن جذب صوت در سیال می‌باشد. یکی از مهم‌ترین دلایل انجام تست در دورهای مختلف دستیابی به دور لازم جهت شروع پدیده کاویتاسیون می‌باشد زیرا هدف استخراج سطح طیف صوت در دو حالت کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی است. یکی از نکات مهم و قابل اهمیت در آنالیز داده‌ها این موضوع است که انجام تست را برای حالتی که فاقد پروانه در تونل کاویتاسیون جهت ثبت نویز محیطی و با همان شرایط عملکرد وجود پروانه در تونل است انجام شود. برای آنکه بتوان به نویز مطلق پروانه در حالات مختلف دسترسی پیدا کرد باید ابتدا در شرایط مختلف نویز محیطی داخل تونل را اندازه‌گیری کرد که جهت استخراج جواب‌های صحیح و با توجه به مطالعات انجام شده روش اندازه‌گیری نویز در تونل مطابق سناریو زیر اجرا می‌شود [۱۷]:

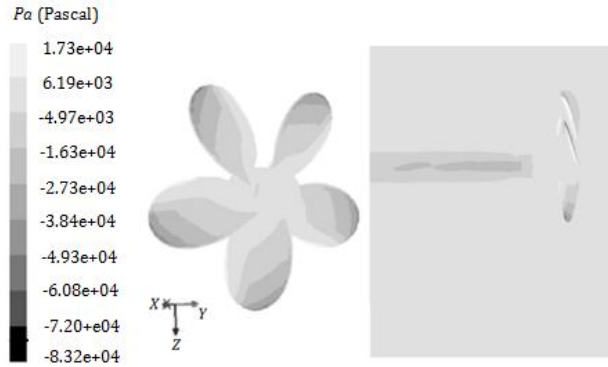
۱- اندازه‌گیری نویز داخل تونل با احتساب شرایط گردش جریان آب بدون روشن بودن دینامومتر در تونل.

جدول ۴ شماره گذاری تعداد شبکه‌ها

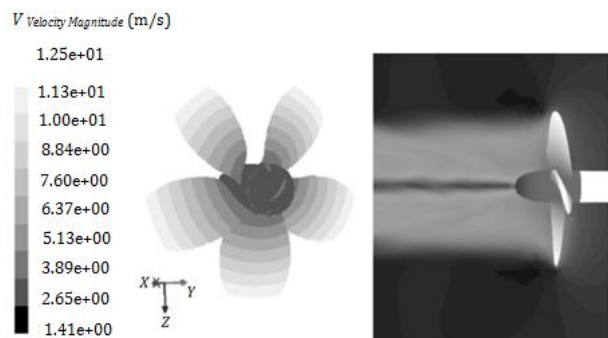
ردیف	شماره گذاری شبکه	تعداد المان
۱	شبکه‌بندی ۱	۱/۵۰۰/۰۰۰
۲	شبکه‌بندی ۲	۲/۵۰۰/۰۰۰
۳	شبکه‌بندی ۳	۳/۵۰۰/۰۰۰
۴	شبکه‌بندی ۴	۵/۰۰۰/۰۰۰



شکل ۹ مقایسه کیفی شروع و توسعه کاویتاسیون در دو حالت عددی و تجربی



شکل ۸- الف کانتور فشار استاتیک جهت محاسبه عدد کاویتاسیون در ۰/۱۷ J



شکل ۸- ب کانتور میدان سرعت جهت محاسبه عدد کاویتاسیون در ۰/۱۷ J

$$\sigma_{r=0} = \frac{P_0 - P_v}{0.5\rho V_a^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{r=0.7R} = \frac{P_0 - P_v}{0.5\rho V_R^2} \quad (6)$$

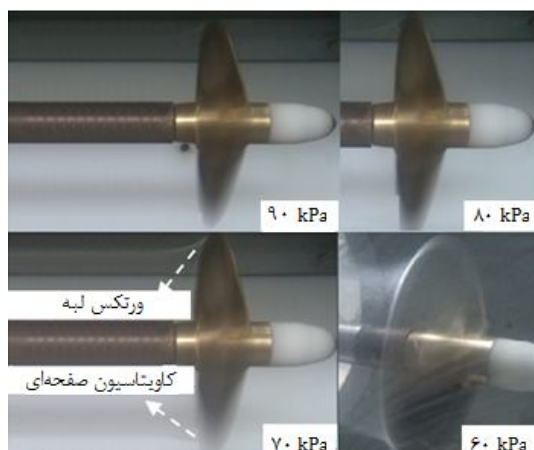
در روابط فوق σ عدد کاویتاسیون در فواصل مختلف بر روی پره‌های پروانه، P_0 فشار استاتیکی، P_v فشار بخار اشباع، V_a سرعت محوری بر روی ریشه و V_R سرعت لبه تیغه در ۰/۷ شعاع پروانه می‌باشد. بنابراین عدد کاویتاسیون در لبه فرار پره و در دور ۱۶۰۰ rpm در شعاع $r = 0.7R$ و با توجه به کانتورهای سرعت و فشار در شکل ۸ برابر با ۰/۰۲ است. در این حالت وجود کاویتاسیون قطعی می‌باشد. مقایسه کیفی میان شروع کاویتاسیون و توسعه آن بر روی لبه و سطح پروانه در دو حالت عددی و تجربی و برای دو ۰/۲ و ۰/۱۷ J در شکل ۹ مشاهده می‌شود، همان‌طور که از این شکل پیداست تطابق بسیار خوبی میان نتایج عددی و تست در تونل کاویتاسیون برای این دو حالت از لحاظ کیفی برقرار است. در شکل ۹ برای تست تجربی، کاویتاسیون بر روی لبه پایین به شکل لکه‌های تیره و بر روی لبه بالایی ورتکس لبه نشان‌دهنده کاویتاسیون است. برای حل عددی کسر حجمی بخار که نشان‌دهنده کاویتاسیون است در کانتور مربوط به نتایج عددی، حفره به رنگ مشکی و خاکستری تیره در نوک و لبه مشاهده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد جهت رسیدن به شروع کاویتاسیون در تحلیل عددی نیاز به شبکه‌بندی بسیار دقیق و ریزی به‌خصوص در لبه پروانه می‌باشد در این مقاله به‌منظور رسیدن به شبکه‌بندی بهینه تحلیل عددی بارها و برای شبکه‌بندی‌های مختلف صورت گرفته است. از آنجا که فیزیک مسئله پدیده کاویتاسیون می‌باشد بنابراین نیاز به شبکه بسیار ریزی برای تحلیل می‌باشد. مناسب‌ترین تعداد شبکه‌بندی برای این تحلیل در بازه دو تا پنج میلیون سلول است. مقایسه میان شبکه‌بندی مختلف برای ضرایب تراست^۱، گشتاور^۲ و بازده^۳ در شکل ۱۰ نسبت به ضریب پیشروی^۴ مشاهده می‌شود. شماره گریدها در جدول ۴

1- Thrust coefficient ($K_t = T/\rho ND^4$)

2- Momentum Coefficient ($K_Q = Q/\rho N^2 D^5$)

3- Efficiency ($\eta_0 = (K_t/K_Q)(1/2\pi)$)

4- Advance Coefficient



شکل ۱۱ مراحل شروع و توسعه کاویتاسیون در تونل کاویتاسیون با افت فشار در محدوده ۶۰-۹۰ kPa در $J=0.2$

۲- اندازه‌گیری نویز تونل همراه با گردش دینامومتر در شرایط عملکردی پروانه، بدون بستن پروانه به همراه گردش آب در تونل.

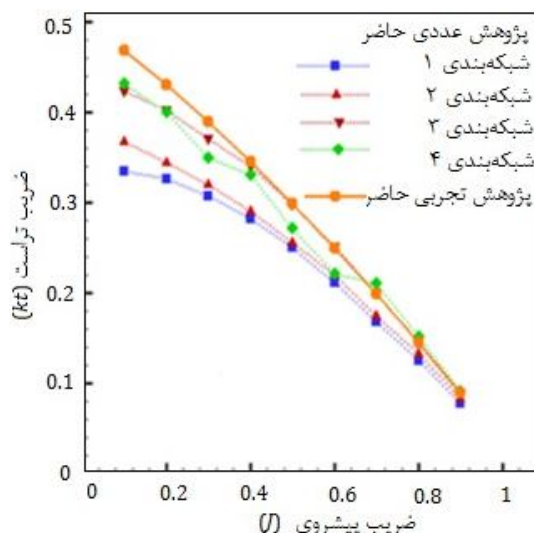
۳- اندازه‌گیری نویز در تونل با بستن پروانه و کار در شرایط عملکردی مشخص به همراه گردش جریان آب در تونل.

جهت ارائه جواب‌های صحیح در تست و در محدوده مناسب هر تست حداقل ۲ بار انجام تا درصد خطا در تونل که معادل با $\pm 3\text{dB}$ برای هر شرایط عملکردی است استخراج شود. در اندازه‌گیری‌ها، داده‌های ارائه شده توسط هیدروفون‌ها به شکل ولتاژ-زمان می‌باشد. در این مقاله جهت استخراج ولتاژ طیفی در حوزه فرکانسی، از داده‌های ولتاژ زمانی استخراج شده توسط هیدروفون‌ها، از محیط اس پی تول^۱ در متلب^۲، استفاده می‌شود [۱۸]. ولتاژ طیفی $v(f)$ توسط رابطه ۷ به سطح فشار صوت $p(f)$ و حساسیت هیدروفون‌ها S_h که معادل با ۲۱۱- دسی بل می‌باشد نسبت داده می‌شود:

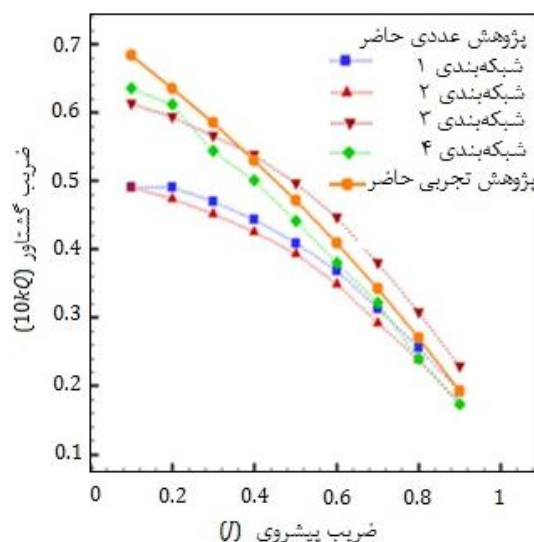
$$SPL = 20 \log p(f)/p_{ref} = 20 \log v(f) - S_h \quad (7)$$

در شکل ۱۲ نمونه‌ای از سطح طیف صوتی بدون پردازش برای دو حالت با و بدون وجود پروانه و در دو هیدروفون مشاهده می‌شود. مقادیر ارائه شده در سطح خام طیف صوت با حساسیت هیدروفون مطابق رابطه ۷ جمع تا در نهایت مقدار سطح فشار صوت در هر فرکانس مرکزی برای دو حالت نویز کلی و نویز محیطی به دست آید [۱۹].

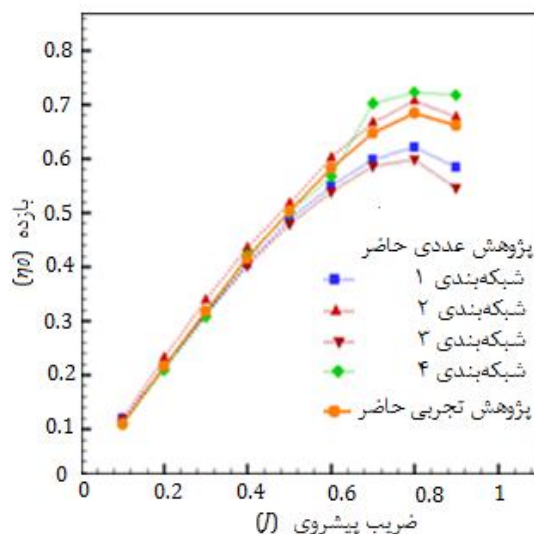
بعد از ثبت داده‌ها در دو حالت با و بدون وجود پروانه (ثبت داده‌ها در حالت کلی و محیطی) داده‌های مورد نظر در هر $1/3$ اکتاو ثبت می‌شود (هر اکتاو محدوده فرکانسی است که در آن باند بالایی فرکانس دو برابر باند پایینی فرکانسی است. بر همین اساس هر یک سوم اکتاو محدوده فرکانسی است که در آن باند بالایی محدوده فرکانس $2^{1/3}$ برابر باند پایینی فرکانس می‌باشد). سطح طیف صوت ثبت شده در هر $1/3$ اکتاو برای هر تست و در فرکانس مرکزی مشخص با SPL_m تعریف می‌شود. حال طبق استاندارد اندازه-گیری کمیته کاویتاسیون و نویز پروانه^۳ لازم است که مقدار طیف صوت در هر ۱ Hz محاسبه شود، اگر پهنه باند در هر $1/3$ اکتاو ثبت شده با Δf نمایش داده شود در این صورت میزان طیف صوت در هر ۱ Hz از رابطه (۸) به دست می‌آید [۵]. بنابراین در این مقاله هدف استخراج سطح فشار صوت مطلق پروانه در فرکانس‌های مرکزی می‌باشد.



شکل ۱۰- الف مقایسه حل عددی با نتایج تست تجربی برای ضریب تراست در شبکه‌بندی‌های مختلف

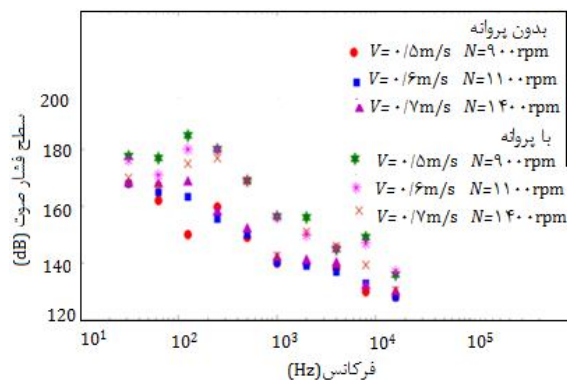


شکل ۱۰- ب مقایسه حل عددی با نتایج تست تجربی برای ضریب گشتاور در شبکه‌بندی‌های مختلف

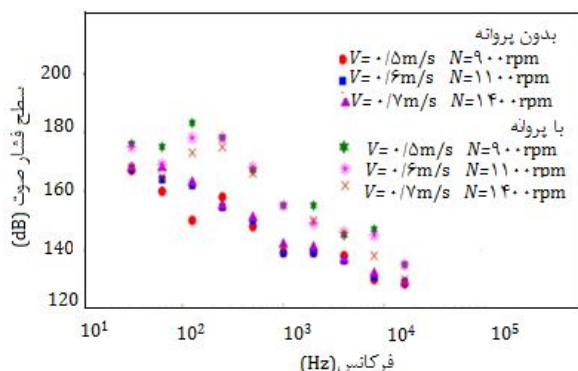


شکل ۱۰- پ مقایسه حل عددی با نتایج تست تجربی برای بازده در شبکه‌بندی‌های مختلف

1- SPT00L
2- Matlab
3- ITTC



شکل ۱۳- الف سطح فشار صوت در تونل در دو حالت با و بدون وجود پروانه در شرایط عملکردی مختلف برای هیدروفون ۱ در فشار ۹۰ kPa



شکل ۱۳- ب سطح فشار صوت در تونل در دو حالت با و بدون وجود پروانه در شرایط عملکردی مختلف برای هیدروفون ۲ در فشار ۹۰ kPa

بنابراین با ثبت SPL_m برای هر $\frac{1}{3}$ اکتاو می‌توان SPL_l و SPL را برای هر تست استخراج و سپس طبق رابطه لگاریتمی (۱۰) سطح فشار صوت مطلق پروانه را استخراج نمود [۵].

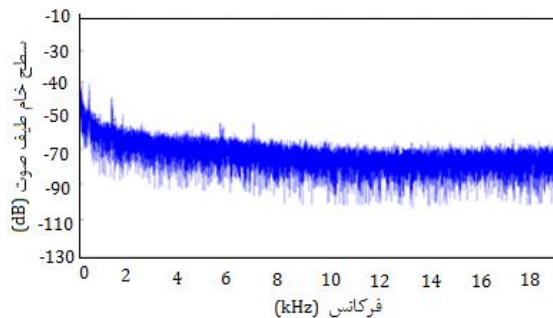
$$SPL_N = 10 \log [10^{(SPL_T/10)} - 10^{(SPL_B/10)}] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، SPL_T سطح کلی فشار صوت، SPL_B سطح فشار صوت محیطی و SPL_N سطح فشار مطلق صوت پروانه بر حسب دسی بل می‌باشد. اگر فرکانس بالایی در پهنه یک‌سوم اکتاو را با f_u فرکانس پایینی در پهنه یک‌سوم اکتاو را با f_l و فرکانس مرکزی در هر یک‌سوم اکتاو را با f_c تعریف نماییم، آنگاه طبق رابطه (۱۱) باند پایین فرکانسی، بالا و فرکانس مرکزی در پهنه یک‌سوم اکتاو به شکل زیر ارتباط داده می‌شود [۲۰]:

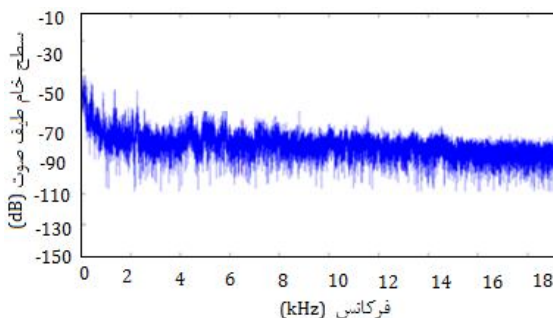
$$f_l = \frac{f_c}{2^{1/6}}, f_u = 2^{1/6} f_c, f_c = \sqrt{f_l f_u} \quad (11)$$

فرکانس پایینی اولین پهنه یک‌سوم اکتاو، مطابق استاندارد محدوده شنوایی انسان، معادل با ۲۵ هرتز می‌باشد [۲۰]. بنابراین براساس رابطه ۱۱ اولین فرکانس مرکزی معادل با ۳۱/۵ هرتز می‌باشد و سایر فرکانس‌های مرکزی در مرجع [۲۰] همراه باند بالا، پایین و پهنه باند مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به سطح طیف صوت در این مقاله و براساس مرجع [۵ و ۲۰] در فرکانس‌های مرکزی ارائه می‌شود.

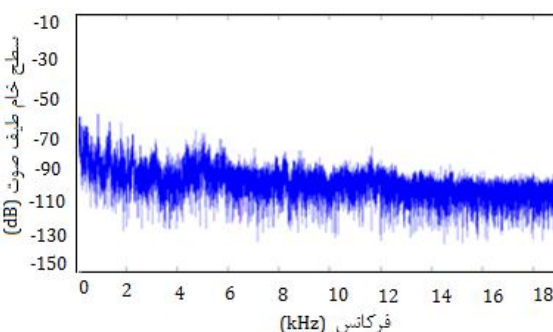
نتایج سطح طیف صوت نویز محیطی در فرکانس‌های مرکزی، یعنی SPL_B در رابطه ۱۰، و نویز کلی داخل تونل کوایتاسیون، یعنی SPL_T در رابطه ۱۰، برای دو هیدروفون ۱ و ۲ در شکل‌های ۱۳ مشاهده می‌شود. با استفاده از مقادیر شکل‌های ۱۳ در فرکانس‌های مرکزی و با استفاده از روابط ۸ تا ۱۰، سطح طیف مطلق پروانه (یعنی SPL_N در رابطه ۱۰ برای دو هیدروفون) در فرکانس‌های مرکزی استخراج می‌شود.



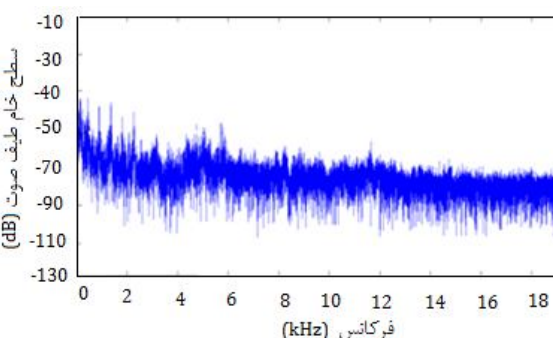
شکل ۱۲- الف سطح فشار صوت برای حالت بدون وجود پروانه برای هیدروفون ۱ در دور ۱۱۰۰ rpm، سرعت جریان ۰/۷ m/s و فشار ۹۰ kPa



شکل ۱۲- ب سطح فشار صوت برای حالت با پروانه برای هیدروفون ۱ در دور ۱۱۰۰ rpm، سرعت جریان ۰/۷ m/s و فشار ۹۰ kPa



شکل ۱۲- پ سطح فشار صوت برای حالت بدون وجود پروانه برای هیدروفون ۲ در دور ۱۱۰۰ rpm، سرعت جریان ۰/۷ m/s و فشار ۹۰ kPa

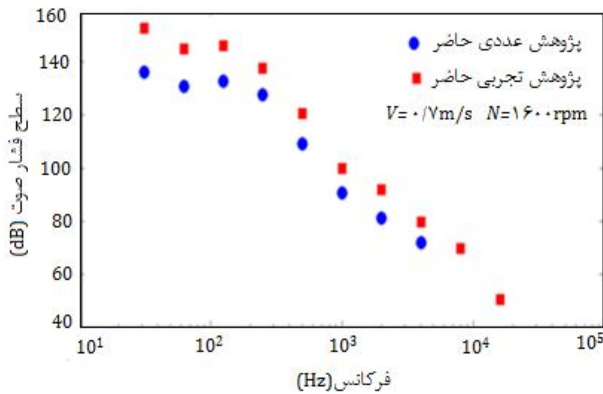


شکل ۱۲- ت سطح فشار صوت برای حالت با پروانه برای هیدروفون ۲ در دور ۱۱۰۰ rpm، سرعت جریان ۰/۷ m/s و فشار ۹۰ kPa

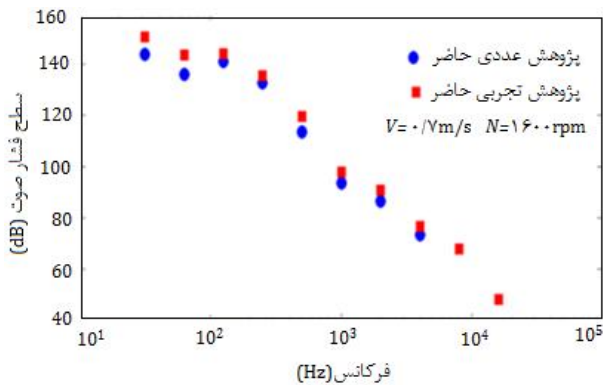
$$SPL_1 = SPL_m - 10 \log \Delta f \quad (8)$$

همچنین نیاز است که مقادیر ثبت شده برای سطح فشار صوت نسبت به یک فاصله مرجع ۱ متری اصلاح شود که مطابق رابطه (۹) قابل بررسی است. رابطه (۹) فاصله گیرنده از منبع صوت است [۵].

$$SPL = SPL_1 + 20 \log (r) \quad (9)$$



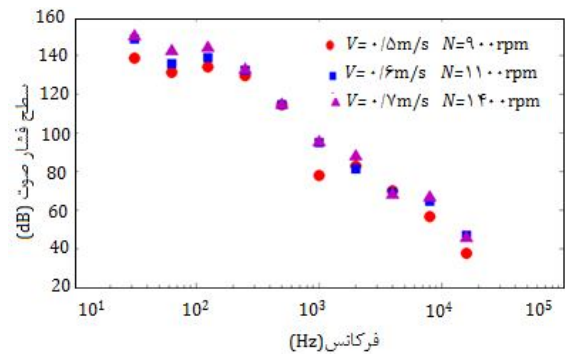
شکل ۱۵- الف مقایسه نتایج عددی و تجربی بر روی سطح طیف صوت برای $J=0.17$ در هیدروفون ۱ در فشار ۹۰ kPa



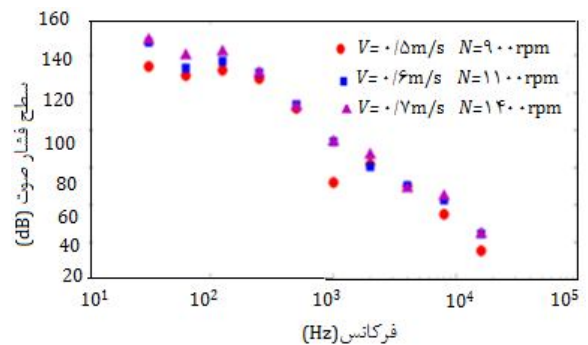
شکل ۱۵- ب مقایسه نتایج عددی و تجربی بر روی سطح طیف صوت برای $J=0.17$ در هیدروفون ۲ در فشار ۹۰ kPa

نتایج مربوط به سطح طیف صوت در تست نویز در تونل کاویتاسیون در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۴ سطح طیف صوت برحسب دسی بل را در شرایط مرجع یعنی فشار ۱μPa، فرکانس ۱ Hz و فاصله ۱ متری نسبت به فرکانس نشان می‌دهد. مقایسه نتایج سطح طیف صوت در دو هیدروفون در هر یک از این شکل‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش دور پروانه سطح طیف صوت افزایش می‌یابد. با مقایسه سطح طیف صوت در فرکانس‌های مشخص در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که سطح کلی طیف صوت در فرکانس‌های مرکزی برای هیدروفون ۱، که در نزدیک پروانه است، بیشتر از سطح کلی طیف صوت هیدروفون ۲ می‌باشد. زمانی که فشار کاهش می‌یابد پدیده کاویتاسیون افزایش یافته و توسعه بیشتری می‌یابد. بنابراین با افت فشار منبع کاویتاسیونی که تاثیر گذارترین منبع تولید صوت است افزایش و به دنبال آن افزایش سطح کلی طیف صوت را به دنبال خواهد داشت.

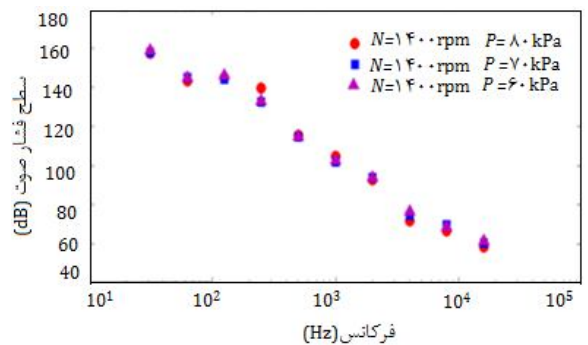
با مقایسه میان شکل‌های ۱۴ که برای افت فشار در هیدروفون ۱ و ۲ استخراج شده است، مشاهده می‌شود که سطح طیف کلی صوت برای هیدروفون ۱ که در فاصله کمتری نسبت به هیدروفون ۲ قرار دارد بیشتر است. نویز فرکانس پایین ناشی از نوساناتی از حجم‌های کاویتاسیون صفحه‌ای است که توسط یک حباب بزرگ که به شکل یک منبع تک قطبی آکوستیکی عمل می‌نماید ارائه می‌شود. زیرا در ابتدا کاویتاسیون بر روی نوک پره و به شکل صفحه‌ای است که با گذر زمان کاویتاسیون صفحه‌ای توسعه یافته و در نهایت در پایین دست جریان فرو ریزش می‌نماید. با توجه به تحقیقات چلسو پارک و همکاران با کاهش فشار در تونل کاویتاسیون نویز پروانه افزایش می‌یابد [۴]. نحوه رفتار نمودارها به‌ازای دور ثابت و برای کاهش فشار در



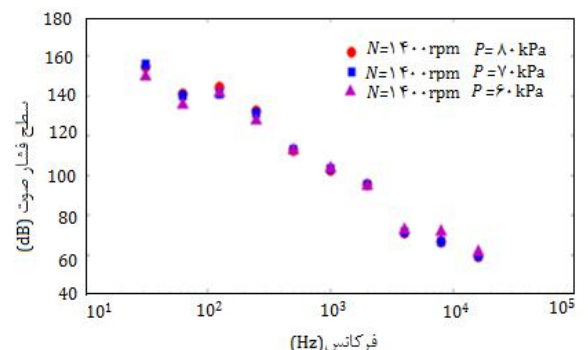
شکل ۱۴- الف سطح طیف صوت مطلق پروانه در سه دور مختلف و فشار ثابت ۹۰ kPa در هیدروفون ۱



شکل ۱۴- ب سطح طیف صوت مطلق پروانه در سه دور مختلف و فشار ثابت ۹۰ kPa در هیدروفون ۲



شکل ۱۴- پ سطح طیف صوت در $J=0.17$ و در سه فشار مختلف برای هیدروفون ۱



شکل ۱۴- ت سطح طیف صوت در $J=0.17$ و در سه فشار مختلف برای هیدروفون ۲

سطح فشار صوت مطلق پروانه در مجموعه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ در فرکانس‌های مرکزی ارائه شده است.

با توجه به حجم زیاد محاسبات به‌منظور استخراج نویز مطلق پروانه در این مقاله سطح طیف صوت برای شرایط عملکردی خاص در شرایط شروع کاویتاسیون ارائه می‌شود.

تحقیق حاضر در شکل‌های ۱۴ مطابق نتایج موجود در مرجع [۴] می‌باشد.	P_0	فشار اتمسفر ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
در شکل ۱۵ نتایج تجربی گرفته شده بر روی سطح طیف صوت با نتایج به‌دست آمده در تست تجربی در تونل کاویتاسیون، برای شرایط $J=0.17$ ($N=1600\text{ rpm}$, $V=0.17\text{ m/s}$)، در دو هیدروفون مقایسه شده است.	P_v	فشار بخار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
یکی از دلایل اختلاف میان نتایج عددی و تجربی به‌خصوص در فرکانس‌های پایین‌تر نویز دستگاه تونل کاویتاسیون و ملحقات آن و همچنین اثرات انعکاس دیواره در تونل کاویتاسیون بر نتایج تست تجربی است. نتایج موجود در فرکانس‌های بالا برای دو حل عددی و تجربی انطباق بهتری دارد. اختلاف میان نتایج از محدودیت‌های موجود در دستگاه تونل کاویتاسیون می‌باشد.	P_a	فشار استاتیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
	Q	ممان ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)
	q	تزریق جرمی (kgs^{-1})
	R	شعاع پروانه (m)
	SPL	سطح فشار صوت (dB)
	SPL_m	سطح فشار صوت در هر یک‌سوم اکتاو (dB)
	SPL_T	سطح کلی فشار صوت (dB)
	SPL_B	سطح فشار صوت محیطی (dB)
	SPL_N	سطح فشار صوت مطلق پروانه (dB)
	T	تراست (kgms^{-2})
	Va	سرعت محوری (ms^{-1})
	V_R	سرعت مماسی در فاصله R (ms^{-1})

۶- نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین مباحث موجود در این مقاله بررسی شرایط عملکردی مختلف این مدل پروانه جهت دسترسی به محدوده مناسب شروع و توسعه کاویتاسیون و در نهایت تاثیر آن بر میزان سطح کلی طیف صوت می‌باشد. این موضوع به جهت رشد حفره و تاثیر آن بر شرایط عملکردی پروانه و در مرحله بعد سطح طیف صوت ناشی از آن حائز اهمیت است. در بخش اول این مقاله نتایج هیدرودینامیک پروانه در قالب ضرایب عملکردی پروانه در دو حالت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته که انطباق خیلی خوبی میان نتایج به لحاظ کیفی و کمی برقرار است.

در بخش بعدی مطالعه حاضر تاثیر افزایش دور پروانه و افت فشار بر روی شروع و توسعه پدیده کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است. افت فشار در دور ثابت تاثیر زیادی بر میزان سطح طیف صوت دارد به‌طوری که میزان تاثیر افت فشار نسبت به افزایش دور در شروع و توسعه کاویتاسیون بیشتر است.

همچنین یکی دیگر از نتایج ارزشمند در این مقاله مقایسه نتایج نویز در دو حالت تجربی و عددی می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که در تحلیل عددی معادلات حل صوت (معادلات فاکس-ویلیامز و هاوکنگز)، تاثیرات انعکاسات محیط را در نظر نمی‌گیرد. درحالی که در تست تجربی مقطع تست تونل کاویتاسیون تقریباً کوچک می‌باشد و تاثیرات اندک انعکاسات دیواره بر نتایج وجود دارد. بنابراین می‌توان از نتایج موجود در حل عددی به‌عنوان نتایج صوت در میدان آزاد استفاده کرد. همچنین اختلاف موجود در دامنه سطح فشار صوت در تحلیل عددی و تجربی، در فرکانس‌های مرکزی، را می‌توان به میزان انعکاسات از دیواره تونل تعمیم داد.

۷- علائم و نشانه‌ها

فهرست علائم

D	قطر پروانه (m)
f_c	فرکانس مرکزی (Hz)
f_l	باند پایین فرکانس محدوده یک‌سوم اکتاو (Hz)
f_u	باند بالای فرکانس محدوده یک‌سوم اکتاو (Hz)
F_v	ضریب تجربی انبساط
F_c	ضریب تجربی تراکم
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
J	ضریب پیشروی
$\dot{m}_l^v$	دبی جرمی در حالت انبساط (kgs^{-1})
$\dot{m}_l^c$	دبی جرمی در حالت تراکم (kgs^{-1})
N	دور پروانه (rpm)

۸- مراجع

- [1] D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*, Peninsula Publishing. CA: Los Altos, 1987.
- [2] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, Heinemann, London, 1994.
- [3] J. C. Malcolm, *Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley and Sons Inc., 1997.
- [4] C. Park, H. Seol, K. Kim, W. Seong, A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel, *Journal Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 754-762, 2009.
- [5] D. Wang, M. Atlar, R. Sampson, An experimental investigation on cavitation, noise, and slipstream characteristics of ocean stream turbines, *Journal Power and Energy*, Vol. 221, No. 2, Part A, pp. 219- 231, 2007.
- [6] E. Korkut, M. Atlar, An experimental investigation of the effect of foul release coating application on performance, noise and cavitation characteristics of marine propellers, *Journal Ocean Engineering*, Vol.41, No. 1, pp. 1-12, 2012.
- [7] H. Seol, J. C. Suh, S. Lee, Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise, *Journal Sound and Vibration*, Vol. 288, No. 1-2, pp. 345-360, 2009.
- [8] S. D. Sharma, K. Mani, V. H. Arakeri, Cavitation noise studies on marine propellers, *Journal Sound and Vibration*, Vol. 138, No. 2, pp. 255-283, 1990.
- [9] M. R. Bagheri, M. S. Seif, H. Mahdigholi, Numerical simulation of underwater propeller noise, *International Conference on Marine Technology Kuala Terengganu*, Malaysia, 2012.
- [10] M. R. Bagheri, M. S. Seif, H. Mahdigholi, Numerical simulation of underwater propeller non-cavitating noise by FVM method, *2nd International Conference on Vibration and Acoustic*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [11] M. R. Bagheri, M. S. Seif, H. Mahdigholi, Hydrodynamic and acoustic analysis of underwater propellers by numerical method, *Journal Maritime Technology*, No. 17, pp. 1-14, 2013. (In Persian)
- [12] M. J. Light hill, On sound generated aerodynamically: I. General theory, *Proc. Royal Society London*, Vol. 211, pp. 564-587, 1952.
- [13] J. E. Ffowcs Williams, D. L. Hawkins, Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 264, No. 3, pp. 321-342, 1969.

- [18] *Signal Processing Toolbox*, User's Guide Version 4.2, For Use with MATLAB, 1988 - 1999 by the Math Works.
- [19] N. Cochard, J. L. Lacoume, P. Arzelies, Y. Gabillet, *Underwater acoustic noise measurement in test tanks*, *Journal Ocean Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 516-522, 2000.
- [20] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. H. Rindel, *Fundamentals of Acoustics and Noise Control*, Note no 31200, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, September 2011.
- [14] F. Farassat, M. K. Myers, Extensions of Kirchhoff's formula to radiation from moving surfaces, *Journal Sound and Vibration*, Vol. 123, No. 3, pp. 451-460, 1988.
- [15] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, Y. Jiang, Mathematical basis and validation of the full cavitation model, *ASME Journal Fluids Eng.*, Vol. 124, No. 3, pp. 617- 624, 2002.
- [16] S. H. Rhee, T. Kawamura, H. Li, Propeller cavitation study using an unstructured grid based navier-stoker solver, *ASME Journal Fluids Eng.*, Vol. 127, No. 5, pp. 986-994, 2005.
- [17] W. B. Morgan, K. R. Suhrbier, B. R. Parkin, A. G. Bovis, T. T. Huang, G. Kuiper, K. J. Minaas, T. Sasajima, E. A. Weitendorf, Discussion of the report and the Draft Recommendations of the Cavitation Committee, *Cf Proceedings*, Vol. 1, pp. 159-219, 1987.