

تحلیل هیدرودینامیکی و آکوستیکی پروانه های مغروق به شیوه عددی

محمد رضا باقری^۱، محمد سعید سیف^{۲*}، حمید مهدیقلی^۳^۱ دانشجوی دکتری مکانیک دریا، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ mrbagheri@mech.sharif.ir^۲ استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu^۳ استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ mehdi@sharif.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله نویز و هیدرودینامیک دو مدل پروانه مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش اول این مقاله جریان غیر کاویتاسیونی و کاویتاسیونی در شرایط عملکردی مختلف حول پروانه‌های دریایی به شیوه حجم محدود تحلیل می‌شود. تست هیدرودینامیکی پروانه در تونل کاویتاسیون انجام و تطابق خوبی میان نتایج عددی و تجربی در این بخش برقرار است. در بخش دوم این مقاله از نتایج جریانی بخش اول بعنوان شرایط اولیه منبع تولید صوت جهت استخراج سطح طیف صوت در معادله ویلیامز و هاوکینگز به شیوه حجم محدود استفاده می‌شود.

رفتار طیف صوت ایجاد شده بخوبی تشریح شده و تطابق خوبی میان این نمودارها از لحاظ رفتاری و دامنه نوسانات با تحقیقات گذشته وجود دارد. در این تحقیق انتشار صوت ناشی از منابع تک قطبی و دو قطبی در نواحی مختلف در جلوی هاب مورد بررسی قرار گرفته است.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۵/۲۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:

جریانهای کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی

منابع تک قطبی و دو قطبی

نویز غیر کاویتاسیونی پروانه

روش حجم محدود، میدان دور

Hydrodynamic and Acoustic Analysis of Underwater Propellers by a Numerical Method

Mohammad Reza Bagheri¹, Mohammad saeed Seif^{2*}, Hamid Mehdigholi³¹ PhD Student, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; mrbagheri@mech.sharif.ir² Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu³ Assistant Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; Mehdi@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 21 Feb. 2013

Accepted: 20 Aug. 2013

Available online: 22 Sep. 2013

Keywords:

cavitating and noncavitating flow

monopole and dipole

noncavitating noise

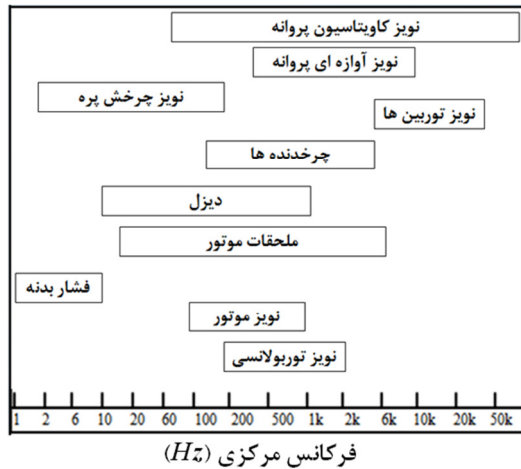
finite volume method

far field

ABSTRACT

The noise and hydrodynamics of two propeller models were investigated. First, the non-cavitating and cavitating flow was analyzed in different operating conditions around the marine propellers using the finite volume method (FVM). The hydrodynamic tests of the propeller were performed in the cavitation tunnel and similar results were observed between the numerical and experimental results. Second, the flow results obtained in the first step were used as the input to extract the sound spectrum levels (SPLs) in the Ffowcs Williams–Hawkings (FW-H) formulation, to predict the far field noise. In addition, the behaviour of the obtained SPL was studied and a good agreement was observed between our data and the previous works results. We investigated the noise emission regions and compared the SPL in different separation between the propeller hub, and the monopole and dipole sources.

پروانه از ۱۰ کیلوهرتز هم بیشتر می‌شود [۳]. مشاهده می‌شود که محدوده فرکانسی نویزهای غیرکاویتاسیونی از ۵ هرتز تا ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد که در تحلیل عددی بدست آمده بر روی دو مدل پروانه A, B در این تحقیق نتایج بدست آمده در این محدوده قرار دارد.



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

هانشین سول و همکاران [۴] یک روش عددی جهت مطالعه نویز غیر کاویتاسیونی و نویز کاویتاسیون صفحه‌ای پره پروانه را مورد بررسی قرار دادند. در نتایج آنها نویز کاویتاسیون صفحه‌ای ناشی از رشد و فروریزی از یک لایه یا صفحه‌ای از حبابها که حجم منحصر به فرد بر روی تیغه را در بر می‌گیرد مشاهده می‌شود. شکل ۲ نشان‌دهنده طیف نویز کلی از یک پروانه کاویتاسیونی است. کاویتاسیون 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 کاویتاسیون صفحه‌ای است که توسط یک حباب بزرگ که به شکل یک منبع تک قطبی آکوستیکی عمل می‌نماید ارائه می‌شود. از طرفی دیگر نویز فرکانس بالا (منطقه ۳ و ۴) توسط فروریزش کاویتی صفحه‌ای یا توسعه موج شوک به وجود می‌آید [۴]. نویز تک قطبی یا ضخامت با انرژی آکوستیکی در هارمونیهای پایین بیشترین مقادیرش در صفحه چرخش پروانه منتشر می‌شود. نویز بارگذاری غیریکنواخت به شکل منبع دو قطبی شناخته شده که بیشترین مقدار آن بر روی محور هاب است. نکته قابل توجه آن است که در حالت غیر کاویتاسیونی پیک طیف فشار صوت مرتبط با هارمونیهای فرکانس پره است که این فرکانس مطابق رابطه ۱ قابل محاسبه است. بعنوان مثال زمانیکه پروانه سه پره در دور ۱۲۰rpm عمل می‌کند نرخ فرکانس هر پره طبق رابطه ۱ برابر با ۶ هرتز می‌باشد و زمانیکه پروانه با دور ۲۵۰rpm می‌چرخد نرخ فرکانس پره برابر با ۱۲/۵ هرتز طبق رابطه (۱) می‌باشد [۲].

$$f_m = mnf_r \quad (1)$$

m : تعداد هارمونی‌های مرتبط با چرخش پروانه است.

اصولا 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 شناورها، نویز پروانه‌ای آنها است [۱]. هر چند پروانه بخشی از سیستم پیشرانه شناور محسوب می‌گردد ولی بدلیل نحوه تولید صوت آن در گروه جداگانه‌ای بررسی می‌شود. تعداد پروانه و تعداد پره هر پروانه در شناورهای متفاوت یکسان نیست. همچنین گام پروانه در برخی شناورها قابل تغییر می‌باشد. بنابراین با توجه به اهمیت مربوط به هندسه پروانه در تولید نویز به خصوص ایجاد کاویتاسیون به عنوان منبع تک قطبی و مهمترین منبع تولید صوت در فرکانسهای بالا و در میدان دور جهت شروع پدیده کاویتاسیون در این مقاله و بر روی دو مدل پروانه در شرایط عملکردی مختلف سرعت و دور، جریان حول پروانه حل شده و نتایج مطلوبی حاصل شده است. نویز پروانه چهار منشا اصلی دارد. منابع اصلی نویز پروانه شامل موارد زیر است [۲]:

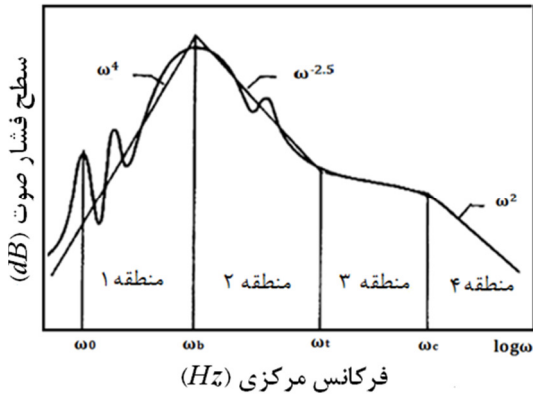
- ۱- جابجایی آب توسط چرخش پره‌های پروانه (منابع تک قطبی).
 - ۲- اختلاف فشار میان سطوح جلو و عقب پره‌های پروانه زمانیکه در حال چرخش می‌باشد (منابع دو قطبی).
 - ۳- نوسانات حجمی کاویتی بوجود آمده روی پره‌ها (کاویتاسیون صفحه‌ای بعنوان منبع تک قطبی).
 - ۴- فرآیند فروریزش کاویتی بوجود آمده (منابع تک قطبی).
- دو مورد اولی هم در حالت شرایط جریان غیرکاویتاسیون و هم در حالت جریان کاویتاسیونی وجود دارد درحالیکه مورد سوم و چهارم تنها در شرایط کاویتاسیونی رخ خواهد داد. در این مقاله فقط نتایج مربوط به سطح طیف صوت منابع غیر کاویتاسیونی ارائه خواهد شد. مورد اول از نوع منابع نویز تک قطبی است که به آن نویز ضخامت نیز 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 است و دارای بیشترین مقادیر سطح طیف صوت در جلوی هاب پروانه است. اما مجموع آنها که نویز در حالت کلی است دارای بیشترین مقادیر در صفحه واقع بر محور هاب در حالت غیر کاویتاسیونی است.

بنابراین در حالت کلی نویز پروانه شامل دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی می‌باشد که نویز حالت کاویتاسیونی دارای سطوح طیف بالاتر در یک فرکانس خاص نسبت به نویز غیر کاویتاسیونی می‌باشد. محدوده مرتبط با فرکانس هر یک از منابع تولید نویز پروانه در شکل ۱ قابل مشاهده است. در نمودار شکل ۱ محدوده فرکانسی مربوط به هر یک از عوامل مهم و عمده تولید نویز در شناورها ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نویزهای مربوط به کاویتاسیون

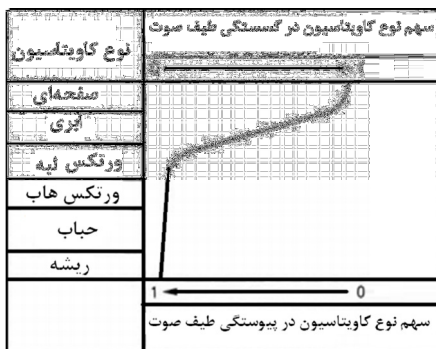
n : تعداد پره‌های پروانه است.

f_r : فرکانس چرخشی پروانه می‌باشد.

اختلاف دامنه صوت در دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی ثبت شده است [۱۰].



شکل ۲- محدوده فرکانسی نویز پروانه در حالت کاویتاسیونی [۴]



شکل ۳- تاثیر نقش مربوط به هریک از انواع کاویتاسیون پروانه بر روی پیوستگی و گسستگی نمودار سطح طیف صوت [۲]

۲- معادلات اساسی

معادله اساسی جهت بررسی انتشار صوت معادله لایت هیل می‌باشد که از تلفیق معادلات پیوستگی و مومنتوم حاصل می‌شود. معادله لایت هیل طبق رابطه (۲) معرفی می‌شود. ترمهای سمت چپ در معادله لایت هیل مربوط به انتشار صوت و ترمهای سمت راست منابع تولید صوت بوده، اولین ترم سمت راست مربوط به تزریق جرم یا حجم به داخل سیال است و تحت عنوان منبع تک قطبی نام برده می‌شود که بیشترین تاثیر آن مربوط به حالت کاویتاسیونی است، ترم دوم اعمال نیرو به داخل سیال است و بیشتر مرتبط با اختلاف فشار به وجود آمده در جلو و عقب پروانه است و ترم سوم ترم تنسور تنش لایت هیل بوده که در سرعت‌های پایین پروانه قابل چشم پوشی است [۱۱].

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

به طوریکه:

P : فشار صوت ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

c : سرعت صوت (ms^{-1})

\dot{q} : تزریق جرم یا حجم به داخل سیال تزریق جرمی (kgs^{-1})

اما در حالت کاویتاسیونی گسستگی سطح طیف صوت مربوط به فرکانسهای نوسانات کاویتا در سیال و تزریق آن به داخل سیال می‌باشد. در حالت کاویتاسیونی بیشترین سهم در گسستگی نمودارهای سطح طیف صوت مربوط به نوسانات کاویتاسیون صفحه‌ای به داخل سیال خواهد بود در حالت کلی ۴ نمونه کاویتاسیون بر روی پروانه شامل کاویتاسیون حباب، کاویتاسیون صفحه‌ای، کاویتاسیون ابری و کاویتاسیون نوک هاب تحت عنوان هاب ورتکس قابل بررسی می‌باشد که بیشترین تاثیر بر روی گسستگی نمودارهای سطح طیف صوت مربوط به کاویتاسیون صفحه‌ای می‌باشد که نحوه تاثیر آن بر روی گسستگی و پیوستگی سطح طیف صوت در شکل ۳ قابل مشاهده است [۲]. در این مقاله نحوه شکل گیری کاویتاسیون صفحه‌ای به شکل کسر حجمی بخار مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تاثیر بر روی گسستگی و نوسانات سطح طیف صوت مربوط به کاویتاسیون صفحه‌ای است. شارما و همکاران چند مدل پروانه را در تونل کاویتاسیون مورد تست قرار داده و سطح طیف صوت آنها را استخراج نموده‌اند و نتایج بررسی شده نشان از آن است که اختلاف سطح طیف صوت کلی در حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی در حدود ۱۰ تا ۳۵ دسی بل برای پروانه‌های مختلف می‌باشد [۵]. تحقیق دیگری توسط جین مینگ و همکاران جهت استخراج نویز پروانه سه پره صورت گرفته است و نتایج آن حاکی از این موضوع است که سطح طیف صوت کلی پروانه در صفحه جلوی هاب و منطبق بر محور آن بیشتر از صفحه واقع بر صفحه چرخش پروانه است [۶]. باقری و همکاران سطح طیف صوت پروانه سه پره مدل B در دوره‌های پایین را توسط روش حجم محدود و با شبکه بندی کمتر جهت دسترسی به محدوده جوابها برای ایجاد شرایط کاویتاسیون و تشکیل فاز بخار مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج مرتبط حاکی از آن است که برای این مدل پروانه (پروانه مدل B) در دوره‌های بسیار بالا به شرایط کاویتاسیونی نزدیک و در دوره‌های بالا و محدوده‌ای تقریباً معادل با $J=0.32$ و کمتر از آن به حالت کاویتاسیون نزدیک می‌شود [۷]. در تحقیق دیگری که توسط باقری و همکاران صورت گرفته است نویز غیر کاویتاسیونی پروانه ۴ پره (مدل A) توسط روش حجم محدود مورد تحلیل قرار گرفته است [۸]. پروانه ۴ پره مدل A در تونل کاویتاسیون دانشگاه صنعتی شریف مورد تست واقع شده است و نتایج عددی موجود در این تحقیق با نتایج تجربی انجام شده در تونل کاویتاسیون مقایسه که انطباق خوبی میان نتایج هیدرودینامیکی پروانه حاصل شده است [۹]. در کار تحقیقاتی دیگری که توسط هانشین سول و همکاران صورت پذیرفته است نویز پروانه در تونل کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است و

$$\nabla \cdot f : \text{گرادیان نیرو به مرزهای سیال (kgs}^{-2}\text{)}$$

$$T_{ij} : \text{تنسور تنش لایت هیل می باشد (kgm}^{-3}\text{s}^{-2}\text{)}$$

$$\rho_l : \text{چگالی مایع (kgm}^{-3}\text{)}$$

$$\alpha_l : \text{کسر حجمی مایع}$$

جهت حل معادله (۳) از روش حجم محدود برای استخراج ترم چشمه یعنی \dot{m}_l^v و \dot{m}_l^c بر اساس معادله رایلی- پلیست اصلاح شده استفاده می شود که نتیجه آن به شکل ارائه کسر جرمی بخار موجود بر روی سطح پره است [۱۴]. از آنجا که حل کاویتاسیونی برای پروانه به علت زمان خیلی کم رشد کاویته نیاز به شبکه بندی بسیار ریزی بر روی پروانه دارد زمان اجرای برنامه برای گرفتن جواب صحیح در حالت گذرا برای حل بسیار بالا بوده که نیاز به تجهیزات کامپیوتری بسیار مجهز دارد که همانطور که اشاره شد در این تحلیل از یک سوپر کامپیوتر با در اختیار داشتن ۳۲ هسته محاسباتی استفاده شده است. گسسته سازی معادلات در این روش با به کارگیری الگوریتم آپ ویند مرتبه دوم صورت گرفته است. جهت کوپل سرعت و فشار از الگوریتم *SIMPLEC* استفاده می شود. کسر حجمی بخار جهت ارائه در معادله لایت هیل بعنوان ترم اول (ترم تک قطبی کاویتاسیونی) توسط روابط (۴) و (۵) ارائه می شود [۱۶].

$$\dot{m}_l^v = -F^v \frac{3\rho_v \alpha_{mic} \alpha_l}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \text{Max} \left(\frac{p_v - p}{\rho_l}, 0 \right)} \quad (4)$$

$$\dot{m}_l^c = F^c \frac{3\rho_v (1 - \alpha_l)}{R_0} \sqrt{\frac{2}{3} \text{Max} \left(\frac{p - p_v}{\rho_l}, 0 \right)} \quad (5)$$

$$\dot{m}_l^v : \text{دبی جرمی در حالت انبساط (kgs}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{m}_l^c : \text{دبی جرمی در حالت تراکم (kgs}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_l : \text{چگالی مایع (kgm}^{-3}\text{)}$$

$$\rho_v : \text{چگالی بخار (kgm}^{-3}\text{)}$$

$$\alpha_l : \text{کسر حجمی مایع}$$

$$\alpha_v : \text{کسر حجمی بخار}$$

$$P_v : \text{فشار بخار (kgm}^{-1}\text{s}^{-2}\text{)}$$

$$R_0 : \text{شعاع اولیه کاویته (m)}$$

۳- تحلیل عددی

در این مقاله دو مدل پروانه مورد بررسی واقع شده است. پروانه مدل A از سری تجاری و پروانه مدل B از سری Gawn می باشد. نکته قابل توجه در این مقاله شبکه بندی بسیار ریز جهت گرفتن دقت و صحت جوابها به خصوص در حالت تحلیل جریان کاویتاسیونی است. مشخصات هندسی پروانهها در جدول ۱ مشاهده می شود. تعداد شبکه در پروانه مدل A سه میلیون المان و در پروانه مدل B پنج میلیون سلول است. شبکه بندی سطح پره با استفاده از المان مثلثی صورت گرفته است. ابعاد المانها بر روی سطح پره متغییر بوده، بطوریکه در ناحیه اطراف ریشه، لبه و نوک پرهها از اندازه مش کوچکتری استفاده می شود. ابعاد شبکه در نواحی کنارهها

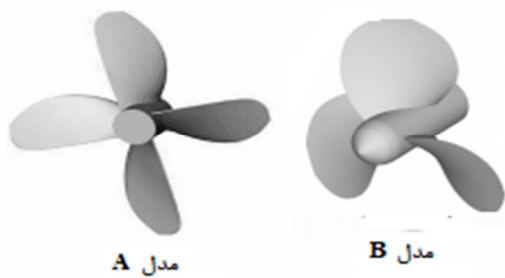
راههای مختلفی جهت پیشگویی نویز جهت ارزیابی معادله ویلیامز- هاوکینگز و سه نوع از منابع نویز تک قطبی، دو قطبی و چهار قطبی وجود دارد [۱۲ و ۱۳]. منبع نویز چهار قطبی در این مطالعه تا هنگامیکه سرعت چرخشی پروانه خیلی کمتر از سرعت صوت در آب می باشد قابل چشم پوشی است. از این مطالعات منبع نویز حاکم از پروانه در زیر آب آنالیز می شود که یک راه حل اساسی جهت کنترل نویز پیشنهاد می کند.

یکی از حل های ساده تحلیلی ارائه شده برای رابطه لایت هیل رابطه انتگرالی برای حل آن می باشد. حالت کلی این روابط برای اولین بار توسط ویلیامز و هاوکینگز که یک روش انتگرال مرزی است ارائه شد که در حال حاضر به روابط FW-H معروف هستند. کاربرد این روابط برای پیش بینی میدان آکوستیکی، برای مناطق دور از جسم می باشد که در روش حجم محدود از معادلات ویلیامز و هاوکینگز جهت استخراج سطح طیف صوت پروانه در میدان دور استفاده می شود [۴]. پیش از حل معادله لایت هیل باید جریان حول پروانه حل شود تا منابع تولید صوت استخراج و صحت سنجی شود. در این مقاله جهت تحلیل جریان حول پروانه از روش حجم محدود با استفاده از کد تجاری فلونت استفاده می شود. مدل های توربولانسی مورد استفاده مدل توربولانسی RSM و $k - \epsilon$ است. یکی از مشکلات این روش زمان حل بالا می باشد. بنابراین در این تحلیل از یک سوپر کامپیوتر با در اختیار داشتن ۳۲ هسته جهت تحلیل جریانی و آکوستیکی استفاده می شود. جهت تحلیل کاویتاسیون به عنوان مهمترین منبع صوت پروانه دو روش تک فازی و چند فازی وجود دارد، مبنای حل استفاده شده جهت تحلیل کاویتاسیونی در روش حجم محدود مورد استفاده در این مقاله استفاده از روش چند فازی است. روش چند فازی کاویتاسیون کامل سینگهال [۱۴] جهت استخراج کسر حجمی بخار و تولید ترم اول معادله لایت هیل بعنوان منبع تولید صوت کاویتاسیونی می باشد. مدل کاویتاسیونی سینگهال شامل تمام اثرات مرتبه اول مانند تغییر فاز، دینامیک حباب، نوسانات فشار توربولانسی و گازهای چگال ناپذیر می باشد. این مدل اثرات مربوط به سرعت لغزشی میان فاز مایع و بخار را در نظر میگیرد و چگالی مخلوط را ترکیبی از چگالی مایع، بخار و سایر گازها در نظر می گیرد [۱۵]. بخش اصلی مرتبط با هر مدل فیزیکی کاویتاسیون استخراج کسر جرمی معادل بین فاز بخار و مایع می باشد که در مطالعه حاضر ترم چشمه در سمت راست رابطه (۳) به شکل زیر معرفی می شود:

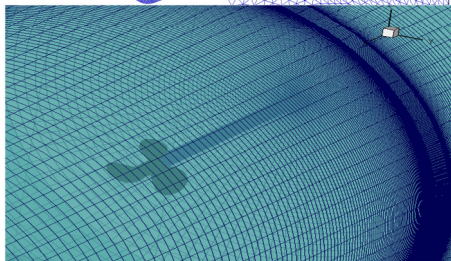
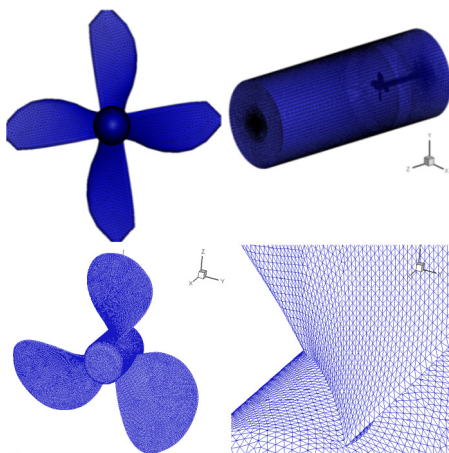
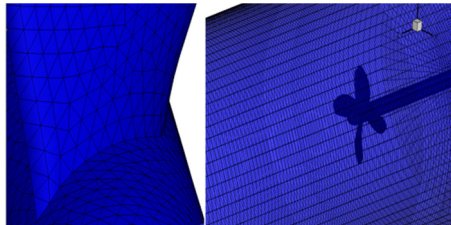
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{C}_m) = \Gamma_n = \dot{m}_l^v + \dot{m}_l^c \quad (3)$$

$$\dot{m}_l^v : \text{دبی جرمی در حالت انبساط (kgs}^{-1}\text{)}$$

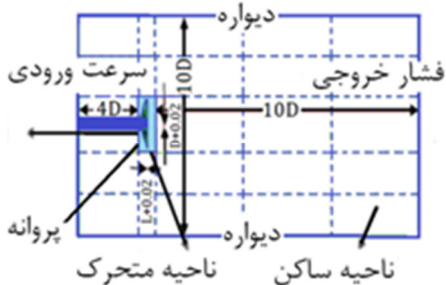
$$\dot{m}_l^c : \text{دبی جرمی در حالت تراکم (kgs}^{-1}\text{)}$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- (الف): نمایی از هندسه پروانه‌ها، (ب): شبکه بندی پروانه‌ها و ناحیه محاسباتی حل، (ج): نمایی از ناحیه ساکن، ناحیه متحرک و اعمال شرایط مرزی

حدود $0.1D$ و در بقیه نقاط حدود $0.05D$ می‌باشد. پس از شبکه بندی سطح پره و هاب بقیه سطوح میدان نیز توسط المانهای بزرگتر شبکه بندی می‌شوند. در نهایت کل حجم و میدان محاسباتی با المان ساختاری شش وجهی پر می‌شود. ناحیه حل جریان اطراف پروانه به دو قسمت دوار و ساکن تقسیم می‌شود. طول و قطر ناحیه دوار متناسب با قطر مدل پروانه و قسمت دوار هاب می‌باشد که این مقادیر در این شبیه سازی به ترتیب معادل با $(D+0.02)$ و $(L+0.02)$ می‌باشد که در آن D و L به ترتیب قطر پروانه و طول قسمت دوار هاب به متر می‌باشد البته تا جایی که به تداخل شبکه بندی پروانه و ناحیه دوار آسیبی وارد نشود بهتر است این ناحیه کوچک و متناسب با ابعاد قطر پروانه و طول قسمت دوار هاب انتخاب شود. هدف از ساخت این ناحیه مدل سازی حرکت دورانی پروانه و هاب و وارد ساختن ترم شتاب کوریولیس در معادلات کلی حاکم بر جریان سیال می‌باشد. ناحیه ساکن، این ناحیه که به صورت استوانه ای بوده، دربرگیرنده هاب، پروانه و ناحیه متحرک می‌باشد. طول قسمت ورودی برابر $4D$ طول قسمت خروجی برابر $10D$ در نظر گرفته شده است که D قطر پروانه می‌باشد. علت گرفتن ناحیه محاسباتی بزرگ گرفتن جوابهای صحیح برای ناحیه میدان دور تعریف شده می‌باشد. زیرا مطابق استاندارد ناحیه میدان دور ناحیه ای است که انتشار یا الگوهای انتشار صوت در تمامی جهات یکسان می‌باشد که این ناحیه برای پروانه معادل با $4R$ تا $10R$ تعریف می‌شود [۱۷ و ۱۸]. بنابراین نیاز به تعریف محاسباتی بزرگ است که این ناحیه محاسباتی به شدت حجم شبکه بندی و به دنبال آن زمان اجرا را بالا می‌برد. جهت جلوگیری از تعداد شبکه بندی بیشتر و همچنین کنترل شبکه بندی ناحیه ساکن به تعدادی استوانه کوچکتر تقسیم بندی شده تا بتوان در مناطقی که ضرورت ندارد از شبکه بندی درشت تری استفاده نمود نمایی از هندسه پروانه‌ها در شکل (۴-الف) و شبکه بندی و میدان اطراف آنها در شکل (۴-ب) قابل مشاهده است. جهت حل جریان از شرط مرزی سرعت ورودی برای حل و فشار خروجی استفاده می‌شود که در شکل (۴-ج) به طور کامل مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در حل انتخاب گام زمانی مناسب و تعداد تکرارهای مناسب جهت حل دقیق جوابها می‌باشد. این گام زمانی معادل با 10^{-4} و با 3000 تکرار و دقت 10^{-4} برای حل معادلات استفاده شده است. نکته مهم در این شبکه بندی فیزیک مسئله مرتبط با کاویتاسیون است و از آنجا که محل شکل گیری کاویتاسیون بر روی ریشه و یا لبه فرار پره است بنابراین کنترل شبکه و ریز بودن شبکه در این مناطق باید رعایت شود.

دوره‌های مختلف در جدول ۳ مشاهده می‌شود. نتایج کانتور فشار استاتیکی و سرعت به ازای سرعت ثابت 3 m/s و برای دوره‌های rpm ۹۰۰ و 1100 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 می‌انجامد.

جدول ۲- شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A جهت استخراج ضریب تراست و گشتاور در دور ثابت 900 rpm

ردیف	سرعت ورودی	دور پروانه	مدل توربولانسی	ضریب پیشروی
۱	0.43 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۱
۲	0.87 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۲
۳	1.30 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۳
۴	1.74 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۴
۵	2.17 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۵
۶	2.61 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۶
۷	3.04 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۸

جدول ۳: شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A به ازای سرعت ثابت ۱ و ۳ متر بر ثانیه در دوره‌های مختلف

ردیف	سرعت ورودی	دور پروانه	مدل توربولانسی	ضریب پیشروی
۱	1 m/s	816 rpm	k-ε	۰/۲۵
۲	3 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۶۸
۳	1 m/s	900 rpm	k-ε	۰/۲۲
۴	3 m/s	1100 rpm	k-ε	۰/۵۶
۵	1 m/s	2068 rpm	k-ε	۰/۱
۶	1 m/s	1034 rpm	k-ε	۰/۲
۷	1 m/s	690 rpm	k-ε	۰/۳
۸	1 m/s	520 rpm	k-ε	۰/۴
۹	1 m/s	415 rpm	k-ε	۰/۵
۱۰	1 m/s	345 rpm	k-ε	۰/۶
۱۱	1 m/s	260 rpm	k-ε	۰/۸
۱۲	1 m/s	200 rpm	k-ε	۱

در شکل ۶ کسر حجمی بخار شکل گرفته بر روی پروانه مدل A مشاهده می‌شود و با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که زمانیکه دور از 1034 rpm به 2068 rpm افزایش می‌یابد کسر حجمی بخار شکل گرفته بر روی پره‌ها حجم زیادی را به خود اختصاص خواهد داد، لازم به ذکر است که همانطور که قبلاً اشاره شد محدوده شکل گیری کسر حجمی بخار بر روی پره $J=0.6$ بوده که به ازای دور 900 rpm این محاسبات بیان شده است که دور مناسب جهت شکل گیری کاویتی بر روی پره می‌باشد. البته لازم به ذکر است که اجراها برای شرایط مختلف انجام شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی پروانه‌های مورد بررسی

مدل پروانه	مدل A	مدل B
تعداد پره	۴	۳
قطر (متر)	۰/۲۹	۰/۳
EAR = AE/A0	۰/۴۳	۰/۵
P/D	۰/۷	۱
گروه مورد نظر	سری B	سری Gawn

۴- نتایج

۴-۱- تحلیل هیدرودینامیکی

پروانه مدل A

در این تحقیق دو مدل پروانه در شرایط عملکردی مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. جهت مقایسه میان نتایج جریان دور پروانه مدل A که دور مناسب جهت مشاهده پدیده کاویتاسیون و تشکیل کسر حجمی بخار است استخراج شده است. شروع کاویتاسیون و کسر حجمی بخار برای این پروانه در دور 900 rpm اتفاق می‌افتد. با تحلیل عددی پروانه مورد نظر دور در 900 rpm ثابت نگه داشته شده و سرعت جریان از 0.435 m/s متر بر ثانیه تا 3.04 m/s متر بر ثانیه که در محدوده شرایط عملکردی تونل کاویتاسیون شریف است تغییر داده می‌شود. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A برای دور ثابت 900 rpm در جدول ۲ قابل مشاهده است. مقایسه میان نتایج عددی و نتایج تجربی [۹] در شکل ۵ قابل مشاهده است. این نمودار مقایسه میان ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی را برای تحلیل عددی و نتایج تجربی نمایش می‌دهد که انطباق خیلی خوبی میان نتایج در تحلیل عددی موجود در این مقاله و نتایج تجربی وجود دارد. همچنین این مدل پروانه در شرایط عملکردی بسیاری مورد تحلیل قرار گرفته است تا اثر تغییر دور و سرعت جریان به ازای ضریب پیشروی یکسان مورد مقایسه قرار گیرد، با ملاحظه کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی این موضوع بسیار حائز اهمیت است که تغییر دور در مقدار عدد کاویتاسیون نسبت به تغییر سرعت جریان تاثیر بیشتری در شروع کاویتاسیون دارد بنابراین پروانه مدل A با ثابت نگه داشتن سرعت جریان در 1 m/s و تغییر دور در محدوده $200\text{ rpm} - 2000\text{ rpm}$ نیز تحلیل جریانی گشته و نتایج مربوط به کانتورهای کسر حجمی بخار برای $J=0.1$ و $J=0.2$ در شکل ۶ جهت مقایسه حجم کاویتی به ازای افزایش دور پروانه قابل ملاحظه است. همانطور که از شکل ۶ برای کسر حجمی بخار مشاهده می‌شود با افزایش دور پروانه مدل A کسر حجمی بخار به شدت افزایش یافته به طوریکه در دور 2068 rpm مقدار وسیعی از سطح پره را فاز بخار تشکیل داده که تاثیر زیادی بر روی سطح طیف صوت ایجاد می‌کند. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A به ازای سرعت ثابت ۱ و ۳ متر بر ثانیه در

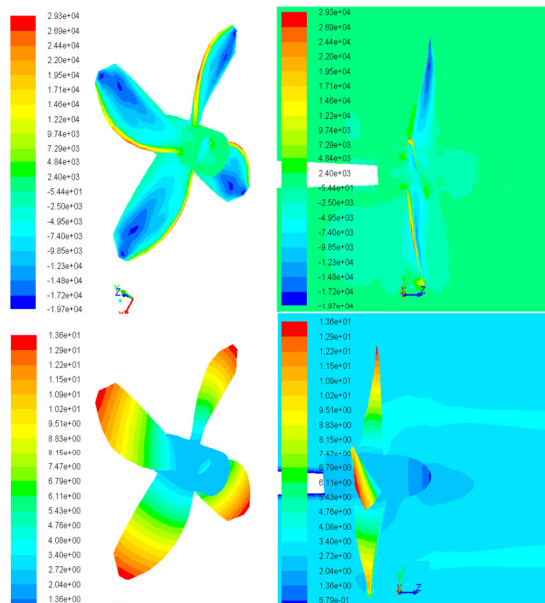
کاویتاسیون در نقاط مختلف پروانه در جدول ۴ به ازای دورهای ۹۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm برای سرعت جریان ۳ m/s مشاهده می‌شود. همانطور که از کانتور فشار استاتیکی نمایش داده شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش دور در سرعت ثابت ۳ m/s از ۹۰۰ rpm به ۱۱۰۰ rpm (کاهش J از ۰/۶۸ به ۰/۵۶) محدوده کاهش فشار استاتیکی بیشتر قابل مشاهده است که نشاندهنده این موضوع است که افزایش دور در سرعت ثابت سهم زیادی در شروع کاویتاسیون دارد. بنابراین با افزایش دور به ازای سرعت جریان ثابت جریان خیلی سریعتر وارد محدوده شروع کاویتاسیون می‌شود.

$$r = 0 \quad \sigma_0 = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_a^2} \quad P_0 = P_a + \rho gh \quad (۶)$$

$$r = 0.7R \quad (۷)$$

$$P_0 = P_a + \rho g(h - 0.7R) \quad V_R = \sqrt{V_a^2 + (0.7nD)^2}$$

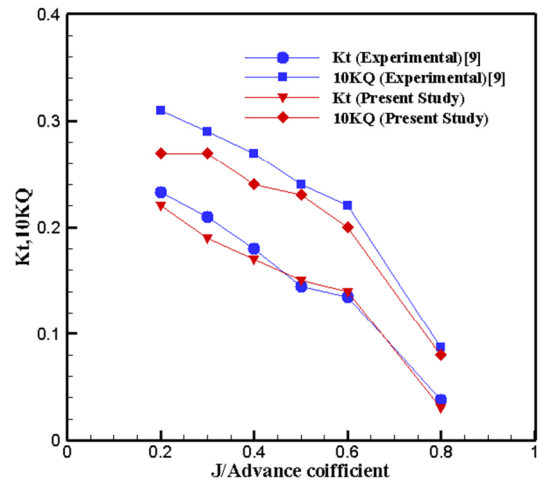
$$\sigma_{0.7R} = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_R^2}$$



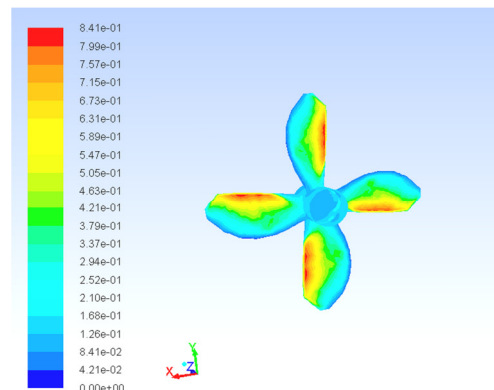
شکل ۷- کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیکی جهت محاسبه عدد

کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پروانه (دو کانتور بالا فشار استاتیکی و دو کانتور پایین سرعت مماسی در دور ۹۰۰ rpm و سرعت جریان ۳ m/s در J=۰/۶۸)

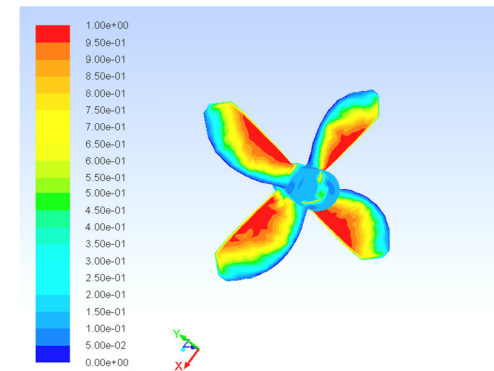
نحوه شکل گیری کاویتاسیون صفحه‌ای، رشد و جدایش کاویتی در شکل ۹ و مقایسه آن با نحوه شکل گیری کاویتاسیون صفحه‌ای در تونل کاویتاسیون و شروع کسر حجمی بخار در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. نکته مهم و قابل توجه این موضوع است که برای این مدل پروانه در محدوده J=۰/۶ برای دور ۹۰۰ rpm شروع تشکیل کسر حجمی بخار و آغاز کاویتاسیون حاصل می‌شود. برای پروانه مدل A جهت رسیدن به شرایط کاویتاسیونی (دور و سرعت جریان) حل جریان در دورهای متنوع و برای ضرایب پیشروی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵- مقایسه نتایج ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی در دو حالت تجربی و عددی



(الف)



(ب)

شکل ۶- مشاهده کانتورهای کسر حجمی بخار بر روی پروانه در سرعت جریانی ۱ m/s (الف): برای دور ۱۰۳۴ rpm (J=۰/۲) و (ب): برای دور ۲۰۶۸ rpm (J=۰/۱)

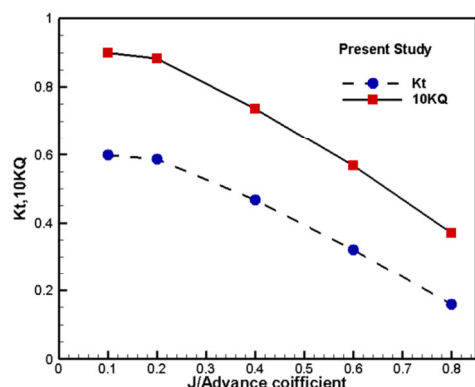
کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیکی جهت محاسبه عدد کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پره در شرایط عملکردی دور ۹۰۰ rpm و سرعت جریان ۳ m/s در شکل ۷ قابل مشاهده است. هرگاه پروانه دارای دور کم باشد کاویتاسیون را در $r=0$ یعنی در ریشه بررسی و اگر دور پروانه زیاد باشد کاویتاسیون در $r=0.7R$ بررسی می‌شود. اعداد کاویتاسیون در این دو حالت طبق روابط (۶) و (۷) بدست می‌آید [۲]. محدوده وقوع شروع کاویتاسیون و اعداد

پروانه مدل B

جهت مقایسه میان نتایج جریان‌ی دور پروانه مدل B که دور مناسب جهت مشاهده پدیده کاپیتاسیون و تشکیل کسر حجمی بخار است استخراج شده است. شروع کاپیتاسیون و کسر حجمی بخار برای این پروانه در دور ۱۸۵۰ rpm اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه در این پروانه شروع کاپیتاسیون در دور ۱۸۵۰ rpm است. این مدل پروانه در دوره‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است تا به دور لازم جهت شکل‌گیری فاز بخار برسد که در نهایت در دور ۱۸۵۰ rpm و سرعت جریان معادل با ۳ متر بر ثانیه که معادل با $J=0.32$ بوده به شرایط کاپیتاسیونی و تشکیل فاز بخار نزدیک می‌شود که علت آن کاملا واضح بوده که این نوع پروانه ها برای کار در دور بالا طراحی شده و به سختی به حالت کاپیتاسیونی خواهند رسید. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل B در جدول ۵ و به ازای دور ثابت ۹۰۰ rpm قابل مشاهده است. برای تحلیل این پروانه از دو مدل توربولانسی استفاده شده که نتایج مطابقت خوبی دارد. نتایج ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی در این مدل پروانه به ازای دور ثابت ۹۰۰ rpm در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۵- شرایط عملکردی مختلف در پروانه مدل B

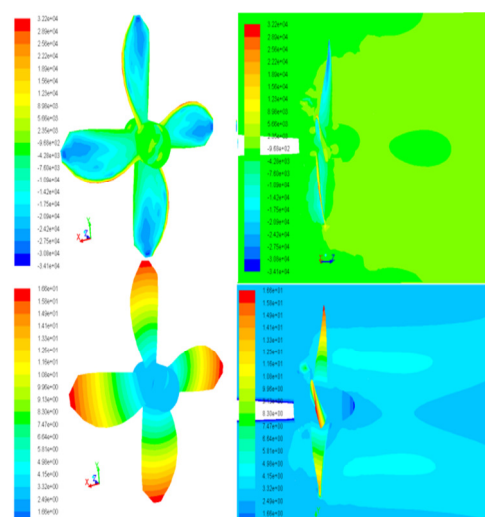
ردیف	سرعت ورودی	دور پروانه	مدل توربولانسی	ضریب پیشروی
۱	۰/۴۵ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۱
۲	۰/۹۰ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۲
۳	۱/۳۵ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۳
۴	۱/۸۰ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۴
۵	۲/۶۳ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۵
۶	۲/۷۰ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۶
۷	۳/۶۰ m/s	۹۰۰ rpm	k-ε, RSM	۰/۸



شکل ۱۱- نتایج ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی در

تحلیل عددی در دور ثابت ۹۰۰ rpm برای پروانه مدل B

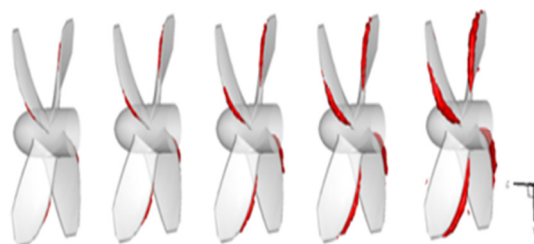
کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در $J=0.32$ و در دور ۱۸۵۰ rpm که مرحله شروع کاپیتاسیون و تشکیل فاز بخار بر روی پره است در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. ی از این دو کانتور



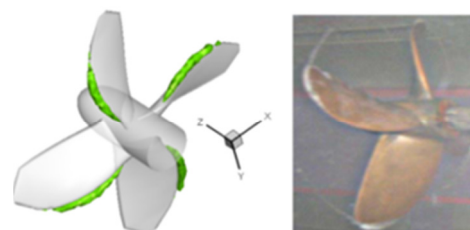
شکل ۸- کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیکی جهت محاسبه عدد کاپیتاسیون بر روی مناطق مختلف پروانه (دو کانتور بالا فشار استاتیکی و دو کانتور پایین سرعت مماسی در دور ۱۱۰۰ rpm و سرعت جریان ۳ m/s در $J=0.56$)

جدول ۴- مقایسه وقوع کاپیتاسیون در نقاط مختلف پروانه مدل A در دور ۹۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm برای سرعت جریان ۳ m/s

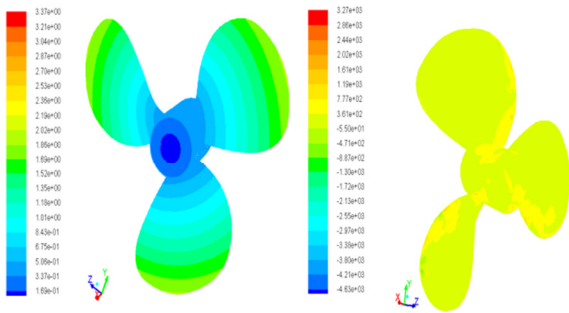
نتایج عدد کاپیتاسیون برای دور ۹۰۰ rpm و سرعت ۳ m/s ($J=0.16$)	محل مورد نظر روی پروانه مدل A	عدد کاپیتاسیون در تحقیق حاضر
$0.16 < \sigma < 0.2$ احتمال وقوع کاپیتاسیون حتمی	نوک پره	۰/۵۷
$0.16 < \sigma < 0.2$ احتمال وقوع زیاد	روی لبه در $R=0.7$	۰/۸۵
$\sigma > 0.2$ احتمال وقوع کم است	روی ریشه	۱۰/۶۷
نتایج عدد کاپیتاسیون برای دور ۱۱۰۰ rpm و سرعت ۳ m/s ($J=0.15$)		
$0.16 < \sigma < 0.2$ احتمال وقوع زیاد	نوک پره	۰/۵۰
$0.16 < \sigma < 0.2$ احتمال وقوع زیاد است	روی لبه در $R=0.7$	۰/۷۸
$\sigma > 0.2$ احتمال وقوع کم است	روی ریشه	۷/۱۲



شکل ۹- نحوه شکل‌گیری کاپیتاسیون صفحه‌ای، رشد و جدایش کاپیتاسیون در مراحل مختلف در دور ثابت ۹۰۰ rpm



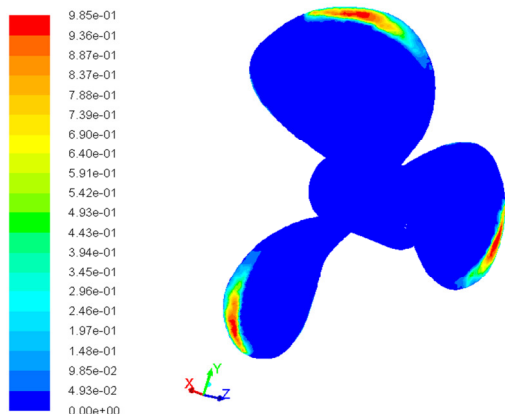
شکل ۱۰- شروع کسر حجمی بخار و مقایسه آن با نحوه شکل‌گیری کاپیتاسیون صفحه‌ای در تونل کاپیتاسیون در دور ۹۰۰ rpm [۹]



شکل ۱۳- کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در $J=0/83$ و در دور 120rpm برای پروانه مدل B

جدول ۶- محدوده وقوع عدد کایتاسیون و اعداد کایتاسیون در نقاط مختلف پروانه مدل B در $J=0/32$ و $N=1850\text{rpm}$

عدد کایتاسیون	محل مورد نظر روی پروانه	احتمال وقوع کایتاسیون [۲]
۰/۵۸	نوک پره	$\sigma < 0/6$ وقوع کایتاسیون حتمی است
۰/۳۷	روی لبه در $0/7R$	$0/6 < \sigma < 2/10$ احتمال وقوع زیاد است
۲۹۶	در ریشه پره	$\sigma > 2/10$ احتمال وقوع کم است



شکل ۱۴- کسر حجمی بخار شکل گرفته در شروع کایتاسیون در دور 1850rpm برای پروانه مدل B و در $J=0/32$

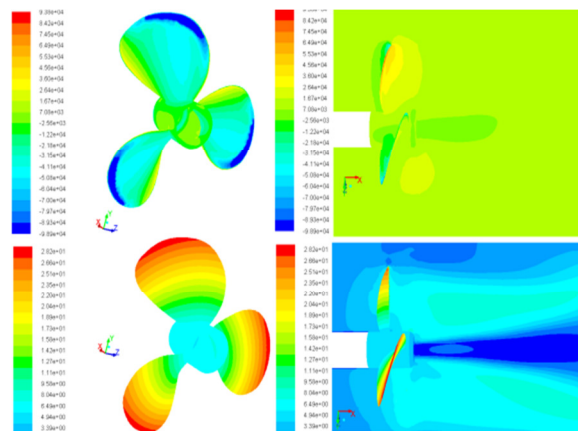
۴-۲- تحلیل آکوستیکی

سطح طیف صوت پروانه مدل A

در این مقاله از معادله اساسی ویلیام و هاوکینگز و به روش حجم محدود جهت تحلیل آکوستیکی و انتشار نویز پروانه استفاده می شود. دامنه و نحوه رفتار نتایج سطح طیف صوت در محدوده مناسب نسبت به سایر کارهای عددی و تجربی قرار دارد. به طور طبیعی هر چه از پروانه فاصله گرفته شود دامنه سطح طیف صوت کمتر می شود که علت آن جذب صوت در سیال بوده که میزان اتلاف صوت مطابق با رابطه ۸ قابل محاسبه است. میزان اتلاف صوت به شکل نمایی با فاصله از سیال بیشتر و مطابق رابطه ۹ میزان سطح طیف نویز کاسته می شود. در رابطه ۹، P_{ref} معادل با فشار مرجع و برابر با 10^{-6}Pa می باشد [۱].

$$TL = 20 \log(R/R_0) \quad (8)$$

جهت محاسبه عدد کایتاسیون بر روی مناطق مختلف پره استفاده می شود. همانطور که مشخص است کایتاسیون تنها در لبه یا نوک پره بوده که فشار استاتیک به طرز قابل توجهی کاهش پیدا کرده و جهت محاسبه عدد کایتاسیون در هر منطقه این فشار با فشار اتمسفر که معادل 101500 پاسکال است جمع و سپس مطابق رابطه ۷ عدد کایتاسیون با استفاده از مقادیر ارائه شده در شکل ۱۲ محاسبه می شود. مقادیر عدد کایتاسیون در نقاط مختلف پره در جدول ۶ به خوبی مشاهده می شود. با مقادیر بدست آمده در جدول ۶ بخوبی مشاهده می شود که کایتاسیون برای پروانه مدل B تنها در ناحیه کوچکی از نوک پره در لحظه شروع یعنی در دور 1850rpm به وجود می آید که با افزایش دور این مقادیر افزایش می یابد.



شکل ۱۲- کانتورهای فشار استاتیکی در $J=0/32$ و در دور 1850rpm برای پروانه مدل B

(کانتورهای بالا فشار استاتیکی و کانتورهای پایین میدان سرعت)

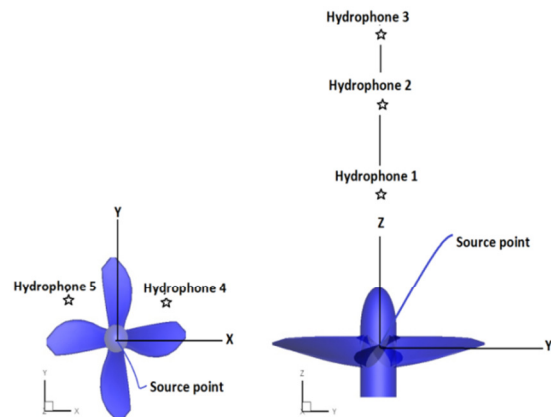
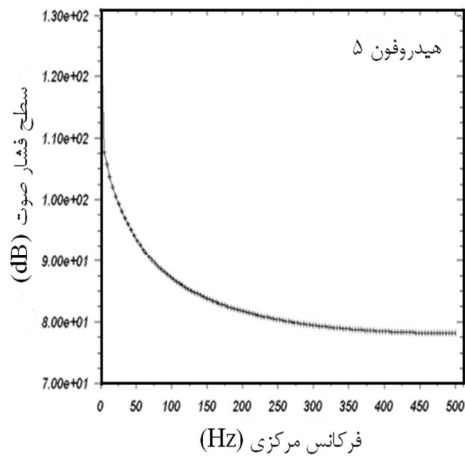
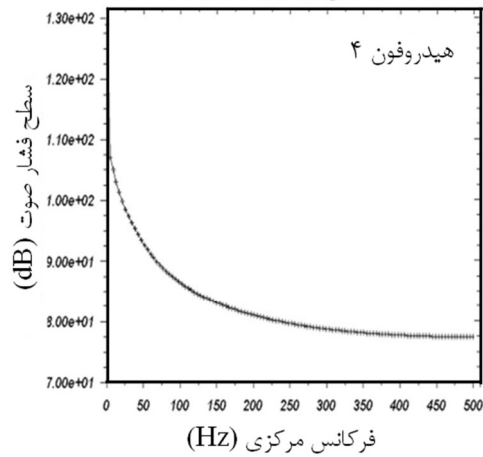
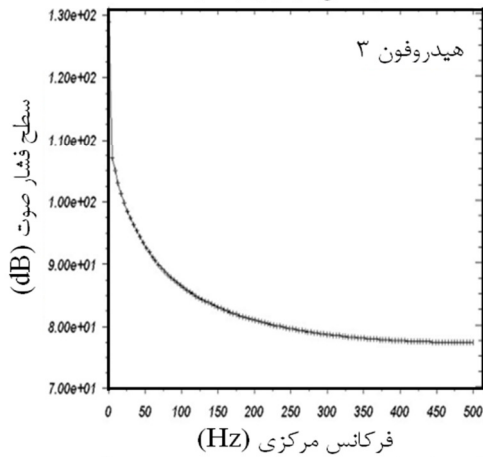
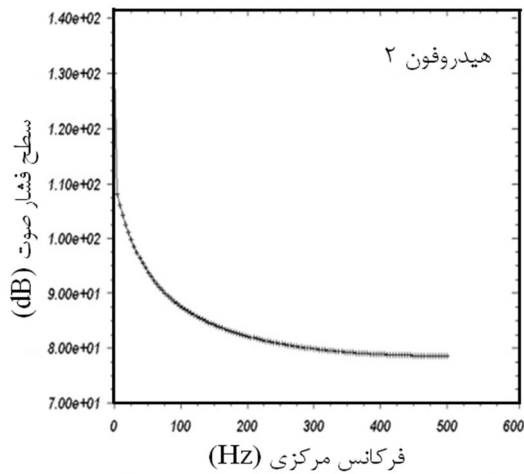
کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در $J=0/83$ و در دور 120rpm در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مشاهده شده در این کانتورها مشاهده می شود در این شرایط و دور پروانه کسر حجمی بخار بر روی پره به وجود نمی آید. در این پروانه حل برای شرایط مختلف صورت گرفته است که دور پروانه از 120rpm شروع شده که در نهایت در دور 1850rpm کسر حجمی بخار بر روی پره شکل گرفته، کسر حجمی بخار و نحوه رشد کایتاسیون بر روی پره در مرحله شروع کایتاسیون در $J=0/32$ نیز در شکل ۱۴ مشاهده می شود. همچنین لازم به ذکر است نتایج مربوط به ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی برای حالتی که دور در 1850rpm ثابت نگه داشته شده و حل در $J=10/1$ انجام شده است. اجرای حل برای نتایج مربوط به این پروانه برای شرایط مختلف و با توجه به حجم بالای شبکه بسیار زمانبر است. به طوریکه هر اجرا تقریباً با بکارگیری ۸ هسته ۱۵ روز به طول می انجامد.

$$SPL=20\log(P/P_{ref}) \quad (9)$$

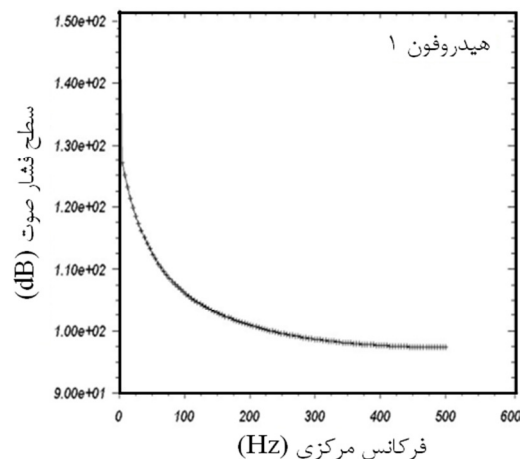
در این مقاله استخراج سطح طیف نویز برای پروانه مدل A در پنج هیدروفون نشان داده شده است. مختصات محل قرار گیری هیدروفونها برای سه هیدروفون ۱، ۲ و ۳ نسبت به منبع که در صفحه X-Y واقع شده و برای دو هیدروفون ۴ و ۵ که در صفحه X-Z قرار دارد در جدول ۷ و در شکل ۱۵ مشاهده می شود. صفحه منبع در این دو حالت واقع بر محل تقاطع میانه ریشه با محور هاب می باشد که مرکزی آن واقع بر محل تقاطع میانه ریشه با محور هاب می باشد که این نقطه با source point در شکل ۱۵ نمایش داده شده است و منبع تولید صوت در این شبیه سازی صفحات واقع بر پره های پروانه معرفی می شود. سطوح طیف صوت در این پنج هیدروفون در حالت غیرکاویتاسیونی در شکل ۱۶ مشاهده می شود.

جدول ۷- مختصات محل قرار گیری هیدروفونها در پروانه مدل A نسبت به نقطه منبع واقع در دو صفحه X-Z و X-Y

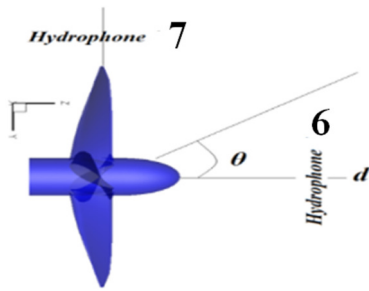
شماره هیدروفون	X(m)	Y(m)	Z(m)
H1	.	.	۱/۵
H2	.	.	۲/۵
H3	.	.	۳
H4	۰/۲	۰/۲	۱/۵
H5	-۰/۲	-۰/۲	۲/۵



شکل ۱۵- محل قرار گیری هیدروفونها نسبت به صفحات منبع تولید صوت در پروانه مدل A

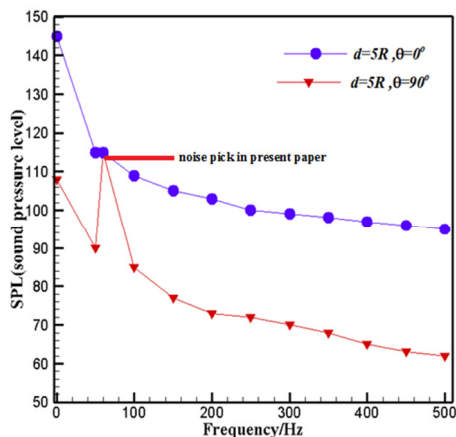


شکل ۱۶- سطوح طیف صوت در پنج هیدروفون در حالت غیرکاویتاسیونی برای پروانه مدل A



شکل ۱۸- محل قرارگیری دو هیدروفون ۶ و ۷ در دو صفحه عمودی و افقی

تغییرات سطوح نویز در دو صفحه افقی و عمودی مربوط به $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ در مقایسه با تحقیق سول هانشین مشابه بوده و هر دو در فرکانس پروانه و واقع در صفحه چرخش پروانه یک پیک دارند که مرتبط با ماکزیمم صوت ناشی از چرخش پروانه در صفحه چرخش می‌باشد (این پیک در صفحه $\theta=90^\circ$ برای پروانه ۴ پره در rpm ۹۰۰ در فرکانس ۶۰ هرتز (مطابق با رابطه ۱) و برای پروانه ۳ پره کار هانشین در rpm ۱۲۰ در ۶ هرتز (مطابق با رابطه ۱) اتفاق افتاده است) که به ترتیب در شکل ۱۹ و ۱۷ قابل مشاهده است. البته این قیاس فقط به جهت روند تغییرات سطح صوت در جلوی هاب و صفحه چرخش پروانه می‌باشد که روند تغییرات آن کاملاً درست است. اختلاف دامنه سطح طیف صوت در پروانه ۴ پره در بیشترین حالت برابر با ۳۵ دسی بل و برای پروانه ۳ پره کار هانشین برابر با ۳۰ دسی بل می‌باشد که این موضوع نیز به ترتیب در شکل ۱۹ و ۱۷ قابل مشاهده است. که نشان‌دهنده این موضوع است که بیشترین سطح طیف صوت در حالت غیر کاویتاسیونی که مجموع نویز ضخامتی (ناشی از چرخش پروانه) و نویز بارگذاری (ناشی از تغییرات در سطح فشار) است در جلوی هاب و به عبارتی بر روی محور شفت بیشتر از صفحه چرخش پروانه است.

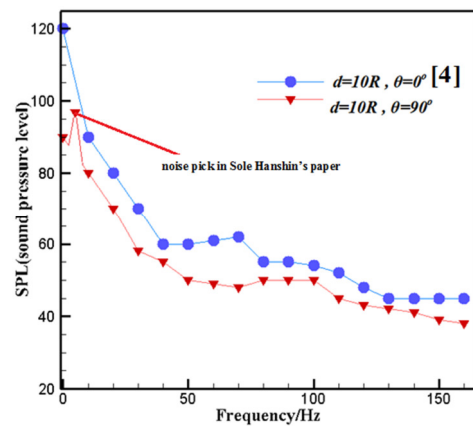


شکل ۱۹- مقایسه میان انتشار نویز در فاصله یکسان از مرکز هاب در دو

صفحه عمودی و افقی در $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ برای پروانه مدل A در شرایط

عملکردی $N=900$ rpm و $V=3$ m/s

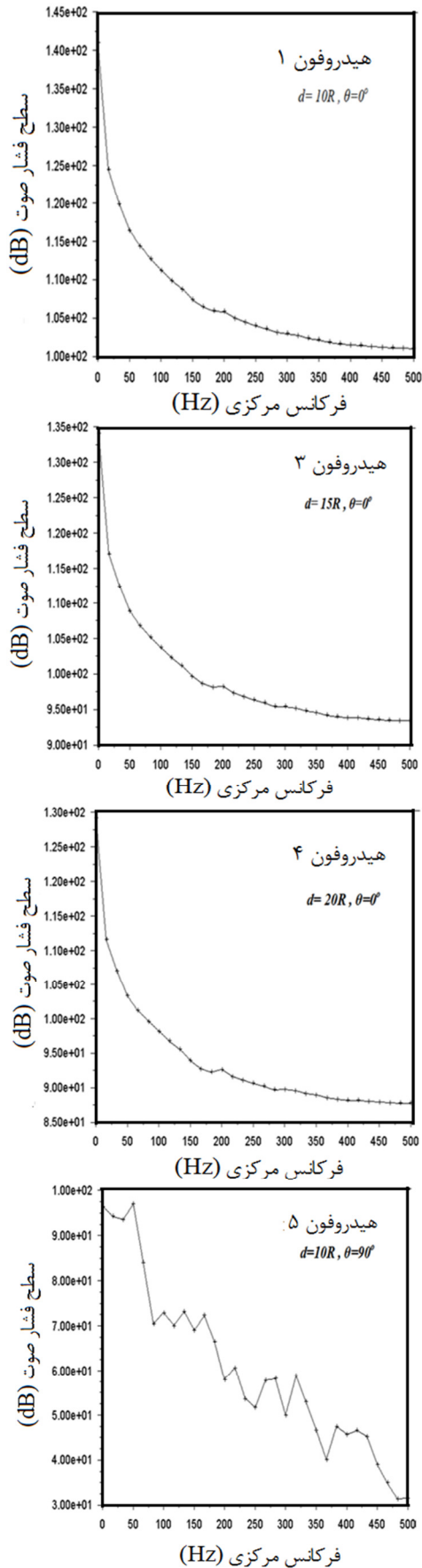
برای حالتی که کاویتاسیون وجود ندارد یا به عبارتی کسر حجمی بخار وجود ندارد باحل کامل آکوستیک نتایج در فرکانسهای کمتر از ۱ کیلوهرتز بدست می‌آید که در این حالت کاملاً منطقی است زیرا در این حالت فقط نویز ضخامتی ناشی از چرخش پروانه و نویز بار گذاری ناشی از تغییرات سطح فشار در آب وجود دارد که محدوده فرکانسی آن مطابق آنچه در شکل ۱ آمده است می‌باشد [۳]. در مقایسه نتایج حاصله با نتایج بدست آمده توسط سول هانشین ملاحظه می‌شود در حالت غیر کاویتاسیونی رفتار نمودار دقیقاً مطابق با نتایج بدست آمده توسط نتایج سول هانشین می‌باشد نمونه‌ای از کار هانشین و همکاران بر روی پروانه سه پره در حالت غیر کاویتاسیونی در فاصله یکسان از پره $d=10R$ و در دو صفحه عمودی و افقی $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ با شرایط عملکردی $N=120$ rpm و $V=1/6$ m/s در شکل ۱۷ قابل مشاهده است [۴]. در شکل ۱۸ جهت مقایسه میان دو حالت انتشاری نویز در جلوی هاب و در صفحه چرخش پروانه دو هیدروفون لحاظ شده که مختصه آنها در جدول ۸ قابل مشاهده است. نویز بارگذاری غیریکنواخت به طور عمده نویز حاکم بوده و ناشی از ناپایداری نوسانی فشار سطح است در حالیکه نویز ضخامتی ناشی از چرخش پروانه در سیال است. مقایسه میان انتشار نویز در فاصله یکسان از پره $d=5R$ و در دو صفحه عمودی و افقی $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ برای پروانه مدل A و در شرایط عملکردی $N=900$ rpm و $V=3$ m/s در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.



شکل ۱۷- نمونه‌ای از کار سول هانشین و همکاران بر روی پروانه سه پره در حالت غیر کاویتاسیونی در فاصله یکسان از پره $d=10R$ و در دو صفحه عمودی و افقی $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ با شرایط عملکردی $N=120$ rpm و $V=1/6$ m/s [۴]

جدول ۸- مختصه دو هیدروفون جهت مقایسه نحوه و مقدار انتشار نویز در صفحات $d=5R$ و $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ (مقایسه منابع تک قطبی و دو قطبی)

شماره هیدروفون	X(m)	Y(m)	Z(m)
H6	.	.	۰/۷۵
H7	.	۰/۷۵	.

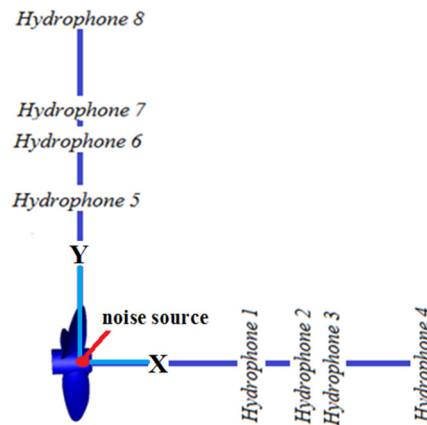


سطح طیف صوت پروانه مدل B

استخراج سطح طیف صوت برای پروانه مدل B در هشت هیدروفون استخراج شده است که نتایج در ۶ هیدروفون ارائه می‌شود. مختصات محل قرار گیری هیدروفونهای ۱، ۲، ۳ و ۴ نسبت به صفحه منبع صوت واقع در صفحه Z-Y و برای هیدروفونهای ۵، ۶، ۷ و ۸ نسبت به منبع صوت واقع در صفحه Z-X در جدول ۹ و در شکل ۲۰ نشان داده شده است. سطوح طیف صوت در شش هیدروفون در حالت غیرکاویتاسیونی در دو صفحه عمودی (صفحه چرخش پروانه مربوط به منبع تک قطبی و دو قطبی) و صفحه جلویی واقع بر محور هاب مربوط به منبع تک قطبی و دو قطبی واقع در $\theta=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ در فواصل $d=10R, 15R, 20R$ در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۹- مختصات محل قرار گیری هیدروفونها در پروانه مدل B

شماره هیدروفون	X(m)	Y(m)	Z(m)
H1	۱/۵	۰	۰
H2	۲	۰	۰
H3	۲/۲۵	۰	۰
H4	۳	۰	۰
H5	۰	۱/۵	۰
H6	۰	۲	۰
H7	۰	۲/۲۵	۰
H8	۰	۳	۰



شکل ۲۰- محل قرار گیری هیدروفونها در پروانه مدل B

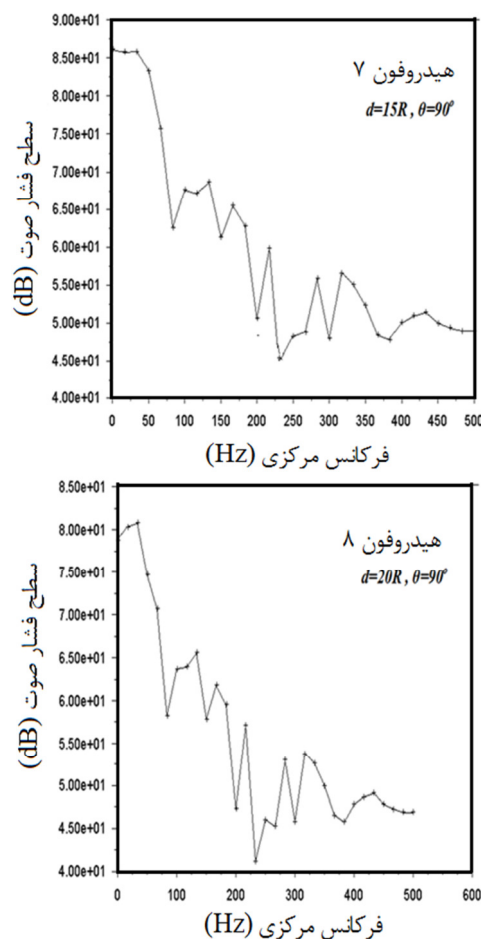
شکل ۲۱- سطوح طیف صوت در شش هیدروفون در حالت غیرکاویتاسیونی

برای پروانه مدل B واقع در 0° و 90° در فواصل $d=10R, 15R, 20R$

پروانه و در مرحله بعد سطح طیف صوت ناشی از آن حائز اهمیت است. نتایج هیدرودینامیکی پروانه تاثیر زیادی بر روی حل آکوستیکی در مرحله بعد خواهد داشت که انطباق خوبی میان نتایج هیدرودینامیکی پروانه در دو حالت تحلیل عددی موجود در این مقاله و نتایج تجربی انجام شده در تونل کاویتاسیون وجود دارد. از جمله نتایج مهم دیگر حاصل شده در این مقاله شرایط ایجاد کسر حجمی بخار در دوره‌های بالا برای پروانه‌های سری Gawn می‌باشد که این موضوع به خوبی بر روی پروانه مدل B مشاهده می‌شود. موضوع قابل توجه دیگر تاثیر دور پروانه نسبت به افزایش سرعت محوری بر روی پدیده کاویتاسیون است. همچنین نتایج موجود بر روی تحلیل رفتار آکوستیکی پروانه نشان می‌دهد سطح نویز کلی در حالت غیر کاویتاسیونی که مجموعی از نویز تک قطبی و دو قطبی است بیشترین مقدار خود را در محل واقع بر محور هاب دارا می‌باشد. نویز تک قطبی که در صفحه چرخش پروانه بیشترین مقادیر خود را دارا می‌باشد در حالت غیر کاویتاسیونی و در دوره‌های پایین که فاز بخار به شکل وسیعی شکل نگرفته است در مقایسه با نویز بارگذاری دو قطبی کمتر است که این موضوع به خوبی در شکل ۲۱ که مقایسه میان این دو حالت است نمایش داده شده است و همچنین پیکهای تناوبی در صوت بوجود آمده در صفحه چرخش پروانه مربوط به هارمونی‌های پره بوده که در رابطه ۱ بیان شده است. این موضوع نیز در شکل ۲۱ به خوبی مشاهده می‌شود. بنابراین جهت بررسی رفتار نویز تک قطبی و یا ضخامتی باید مناطق موجود در صفحه چرخش پروانه را مورد بررسی قرار داده و برای تحلیل نویز دو قطبی و بارگذاری مناطق که بر روی محور هاب واقع شده‌اند حائز اهمیت می‌باشد. در ادامه می‌توان سطح طیف صوت برای منابع کاویتاسیونی را در حالات فوق به دو شیوه عددی و تجربی در تونل کاویتاسیون مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

۲- تشکر و قدردانی

از آنجا که محدوده گرفتن جوابهای صحیح با توجه به فیزیک مسئله به علت حجم بالای شبکه بندی، نوع حل گذرا برای تحلیل آکوستیکی و تعداد اجزای زیاد جهت استخراج نتایج کافی به جهت مقایسه با تست تجربی بسیار زمانبر است بنابراین انجام این‌گونه تحقیقات ملزم به استفاده از کامپیوترهایی با قدرت سخت افزاری بالا می‌باشد از اینرو تحقیق حاضر با حمایت مرکز محاسبات فوق سریع دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده و در نهایت لازم است از زحمات آقایان دکتر اکبری، دکتر علیرضا باقری و مهندس شجاعی که زمینه استفاده از تجهیزات موجود را فراهم آورده‌اند صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را نمایم.



شکل ۲۱- سطوح طیف صوت در شش هیدروفون در حالت غیر کاویتاسیونی برای پروانه مدل B واقع در $\theta=0^\circ$ و 90° در فواصل $d=10R, 15R, 20R$ (ادامه)

با مقایسه نتایج شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که مجموع نویز تک قطبی که در صفحه چرخش پروانه بیشترین مقادیر خود را دارا می‌باشد به همراه نویز دو قطبی ناشی از نوسانات فشار در صفحه چرخش پروانه کمتر از مجموع این دو نویز در جلوی هاب و بر روی محور شفت است که این موضوع به خوبی در شکل ۲۱ که مقایسه میان این دو حالت است نمایش داده شده است بعنوان نمونه هیدروفون ۱ و ۵ هر دو در فاصله یکسانی از محور هاب اما به ترتیب یکی بر روی محور هاب و در جلوی آن و دیگری در صفحه چرخش پروانه قرار دارند و در فرکانس ۱۵ هرتز تقریباً ۳۵ دسی بل دامنه سطح طیف صوت آنها اختلاف دارد و همچنین پیکهای تناوبی در صوت بوجود آمده در صفحه چرخش پروانه مربوط به هارمونی‌های پره بوده که در رابطه ۱ بیان شده است. این موضوع نیز در شکل ۲۱ و در سه هیدروفون ۵، ۷ و ۸ به خوبی مشاهده می‌شود.

۱- نتیجه‌گیری

از مهمترین مباحث موجود در این مقاله بررسی شرایط عملکردی مختلف پروانه جهت دسترسی به محدوده مناسب آغاز کاویتاسیون و شکل گیری کسر حجمی بخار در نقاط مشخصی بر روی پره است. این موضوع به جهت رشد کاویتا و تاثیر آن بر شرایط عملکردی

5. Sharma, S. D., Mani, K. and Arakeri, V.H.,(1990), *Cavitation Noise Studies on marine propellers*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol138(2), 255-283.
6. Jin-ming, Y., Ying, X., Fang, Li., zhan-zhi, W., (2012), *Numerical prediction of blade frequency noise of cavitating propeller*, *Journal of Hydrodynamics*, 24(3):371-377.
7. Bagheri, M., Seif, M.S. and Mahdigholi, H., (2012), *Numerical Simulation of underwater propeller noise*, *Proceeding of 12th International Conference on Marine Technology*, Kuala Terengganu, Malaysia.
8. Bagheri, M., Seif, M.S. and Mahdigholi, H., (2012), *Numerical simulation of underwater propeller non-cavitating noise by FVM method*, 2nd International conference on Vibration and Acoustic.
9. Arazgaldi1, R., Hajilouy1, A. and Farhanieh, B., (2009), *Experimental and Numerical Investigation of Marine Propeller Cavitation Transaction B: Mechanical Engineering* Vol. 16, No. 6, pp. 525{533 c Sharif University of Technology.
10. Park, C., Seol, H., Kim, K., Seong, W., (2009), *A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel*, *Ocean Engineering*, Vol 36 ,754-762.
11. Light hill, M.J., (1952), *On sound generated aerodynamically: I. General theory*, *Proc. Royal Society London* 211, 564-587.
12. Ffowcs Williams, J.E., Hawkings D.L.,(1969), *Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol 264 (1151), p.321-342.
13. Farassat, F. and Myers, M.K., (1988), *Extensions of Kirchhoff's formula to radiation from moving surfaces*, *Journal of Sound and Vibration* Vol.123,p.451-460.
14. Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H. and Jiang, (2002), Y., *Mathematical basis and validation of the full cavitation model* , *ASME J. Fluids Eng.*, 124, pp. 617- 624.
15. Rhee, S.H., Kawamura, T. and Li, H.,(2005), *Propeller cavitation study using an unstructured grid based Navier-Stoker solver* , *ASME J. Fluids Eng.*, Vol 127, pp. 986-994.
16. Wang, G., Senocak, I., Shyy, W., Ikohagi, T., and Cao, S., (2001), *Dynamics of attached turbulent cavitating flows*, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 37, 551-581.
17. Comparison of Propeller-Induced Hull Pressure Measurements for the Sydney Express Propeller Models (18th 1987 pp.219-211).
18. Acoustic measurements for sonar transducer test personal student guide naval underwater systems center, new london, Connecticut, 1 march 1990.

فهرست علائم

- $J=V_a/nD$: ضریب پیشروی پروانه
 $K_T=T/\rho N^2 D^4$: ضریب تراست
 $K_Q=Q/\rho N^2 D^5$: ضریب گشتاور
 N : دور پروانه (rpm)
 V_a : سرعت محوری جریان (ms⁻¹)
 T : تراست پروانه (kgms⁻²)
 Q : گشتاور پروانه (kgm²s⁻²)
 α_v : کسر حجمی بخار
 α_L : کسر حجمی مایع
 σ : عدد کاویتاسیون
 P_v : فشار بخار (kgm⁻¹s⁻²)
 P_0 : فشار استاتیک (kgm⁻¹s⁻²)
 R : شعاع پروانه (m)
 D : قطر پروانه (m)
 P_a : فشار اتمسفر (kgm⁻¹s⁻²)
 h : هد استاتیکی (m)
 g : شتاب جاذبه (ms⁻²)
 ρ : چگالی سیال (kgm⁻³)
 θ : زاویه نسبت به محور هاب
 q : تخریق جرم یا حجم به داخل سیال (kgs⁻¹)
 η : کشش سطح
 SPL : سطح طیف صوت (dB)
 TL : میزان اتلاف صوت در سیال (dB)
 m : تعداد هارمونی های مرتبط با چرخش پروانه
 n : تعداد پره های پروانه
 f_r : فرکانس چرخشی پروانه

۷- مراجع

- 1- Ross, D., (1987), *Mechanics of underwater noise*, Peninsula Publishing, CA: Los Altos.
2. Carlton, J.S., (1994), *Marine Propellers and Propulsion*, Butterworth-Heinemann, London.
3. Malcolm, J.C., (1997) *Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley and Sons Inc.,.
4. Hanshin, S., Suh, J.C., Lee, S., (2005), *Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol288, p.345-360.