# 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

**اطلاعات مقاله**

*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

**چکیده**

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.

# Hydrodynamic and Acoustic Analysis of Underwater Propellers by a Numerical Method

**Mohammad Reza Bagheri[1], Mohammad saeed Seif[2*], Hamid Mehdigholi[3]**

*[1] PhD Student, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; mrbagheri@mech.sharif.ir*
*[2] Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu*
*[3] 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 diopole
noncavitaing 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.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

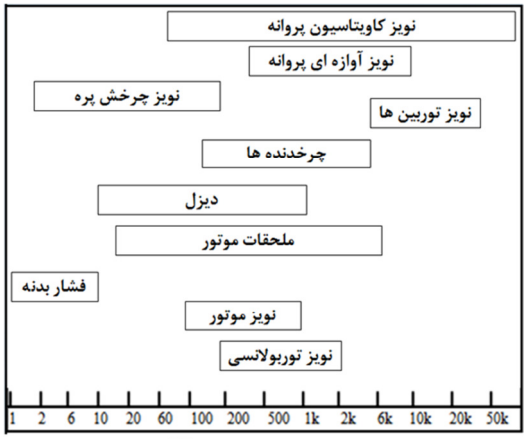
**۱- مقدمه**

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 پروانه‌ی 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 درحالت 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 ضخامتی 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 شکل۱ 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 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 فروریزشی 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 ضخامتی 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 ۱۲/۵هرتز طبق رابطه (۱) می‌باشد[۲].

$$f_m = mnf_r \qquad (۱)$$

$m$: تعداد هارمونی‌های مرتبط با چرخش پروانه است.



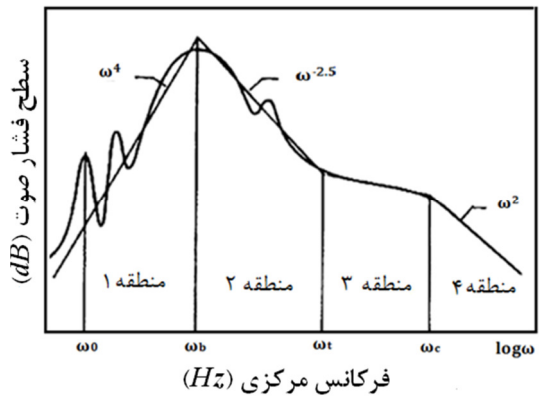
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

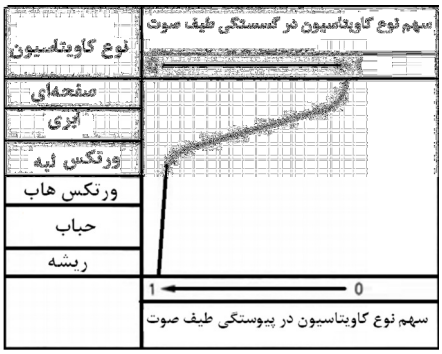
$n$: تعداد پره‌های پروانه است.

$f_r$: فرکانس چرخشی پروانه می‌باشد.

اما در حالت کاویتاسیونی گسستگی سطح طیف صوت مربوط به فرکانسهای نوسانات کاویتی 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 دورهای 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 دورهای بسیار بالا به شرایط کاویتاسیونی نزدیک و در دورهای بالا و محدوده‌ای تقریبا معادل با J=۰/۳۲ 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 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 وگسستگی 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].

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2}\ddot{p} = \dot{q} + \nabla \cdot f + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \qquad (۲)$$

به طوریکه:

P : فشار صوت($kgm^{-1}s^{-2}$)

c : سرعت صوت($ms^{-1}$)

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



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

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

$\tau_{ij}$ : تنسور تنش لایت هیل می‌باشد($kgm^{-3}s^{-2}$)

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 می‌باشد 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 حل‌های ساده تحلیلی ارائه شده برای رابطه لایت هیل رابطه انتگرالی برای حل آن می‌باشد. 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 می‌باشد که در روش حجم محدود از معادلات ویلیامز و هاوکینگز جهت استخراج سطح طیف صوت پروانه در میدان دور استفاده می‌شود [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 فلوئنت استفاده می‌شود. مدلهای توربولانسی مورد استفاده مدل توربولانسی RSM و $k-\varepsilon$ است. یکی از مشکلات این روش زمان حل بالا می‌باشد. بنابراین در این تحلیل از یک سوپر کامپیوتر با در اختیار داشتن ۳۲ هسته جهت تحلیل جریانی و آکوستیکی استفاده می‌شود. 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 می‌باشد. مدل کاویتاسیونی سینگهال شامل تمام اثرات مرتبه اول مانند تغییر فاز، دینامیک حباب، نوسانات فشار توربولانسی و گازهای چگال ناپذیر می‌باشد. 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 می‌گیرد[۱۵]. بخش اصلی مرتبط با هر مدل فیزیکی کاویتاسیون استخراج کسر جرمی معادل بین فاز بخار و مایع می‌باشد که در مطالعه حاضر ترم چشمه در سمت راست رابطه (۳) به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l \rho_l\right)+\vec{\nabla}.\left(\alpha_l \rho_l \vec{C}_m\right)=\Gamma_n=\dot{m}_l^v+\dot{m}_l^c \qquad (۳)$$

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

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

$\rho_l$ : چگالی مایع($kgm^{-3}$)

$\alpha_l$ : 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 می‌شود 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 کاویتی 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 می‌شود. کسر حجمی بخار جهت ارائه در معادله لایت هیل بعنوان ترم اول (ترم تک قطبی کاویتاسیونی) توسط روابط (۴) و (۵) ارائه می‌شود[۱۶].

$$\dot{m}_l^v=-F^v\frac{3\rho_v\alpha_{nuc}\alpha_l}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}Max\left(\frac{p_v-p}{\rho_l},0\right)} \qquad (۴)$$

$$\dot{m}_c^v=F^c\frac{3\rho_v(1-\alpha_l)}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}Max\left(\frac{p-p_v}{\rho_l},0\right)} \qquad (۵)$$

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

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

$\rho_l$ : چگالی مایع($kgm^{-3}$)

$\rho_v$ : چگالی بخار($kgm^{-3}$)

$\alpha_l$ : کسر حجمی مایع

$\alpha_v$ : کسر حجمی بخار

$P_v$ : فشار بخار ($kgm^{-1}s^{-2}$)

$R_0$ : شعاع اولیه کاویتی (m)

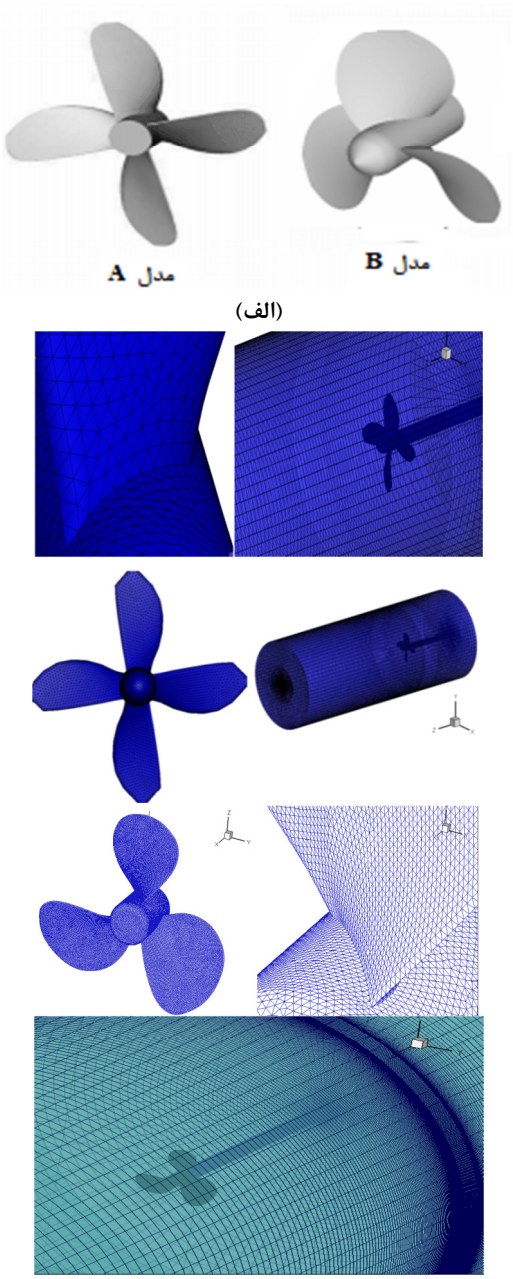
## ۳- تحلیل عددی

در این مقاله دو مدل پروانه مورد بررسی واقع شده است. پروانه مدل A از سری تجاری و پروانه مدل B از سری Gawn می‌باشد. 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 می‌شود. تعداد شبکه در پروانه مدل A سه میلیون المان و در پروانه مدل B پنج میلیون سلول است. شبکه‌بندی 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 می‌شود. ابعاد شبکه در نواحی کناره‌ها

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

حدود۰/۰۰۱Dو در بقیه نقاط حدود ۰/۰۵D می‌باشد. پس از شبکه بندی سطح پره و هاب بقیه سطوح میدان نیز توسط المانهای بزرگتر شبکه‌بندی 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 ۴D طول قسمت خروجی برابر ۱۰D 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 ناحیه‌ای است که انتشار یا الگوهای انتشار صوت در تمامی جهات یکسان می-باشد که این ناحیه برای پروانه معادل با ۴ R تا ۱۰R تعریف می-شود[۱۸ و ۱۷]. بنابراین نیاز به تعریف ناحیه 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 درشت‌تری 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 می-باشد. این گام زمانی معادل با $10^{-4}$ و با ۳۰۰۰ 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.




**شکل۴- (الف): نمایی از هندسه پروانه‌ها، (ب): شبکه بندی پروانه‌ها و ناحیه محاسباتی حل، (ج): نمایی از ناحیه ساکن، ناحیه متحرک و اعمال شرایط مرزی**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

**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 جریانی 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 ۹۰۰rpm اتفاق می‌افتد. با تحلیل عددی پروانه مورد نظر دور در ۹۰۰rpm ثابت نگه داشته شده و سرعت جریان از ۰/۴۳۵ متر بر ثانیه تا ۳/۴ متر بر ثانیه که در محدوده شرایط عملکردی تونل کاویتاسیون شریف است تغییر داده می‌شود. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A برای دور ثابت ۹۰۰rpm 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 ۱m/s و تغییر دور در محدوده ۲۰۰ rpm - ۲۰۰۰rpm نیز تحلیل جریانی گشته و نتایج مربوط به کانتورهای کسرحجمی بخاربرای J=۰/۱و۰/۲ 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 ۲۰۶۸ rpm مقدار وسیعی از سطح پره را فاز بخار تشکیل داده که تاثیر زیادی بر روی سطح طیف صوت ایجادی خواهد داشت. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل A به ازای سرعت ثابت ۱ و ۳ متر بر ثانیه در دورهای مختلف در جدول ۳ مشاهده می‌شود. نتایج کانتور فشار استاتیکی و سرعت به ازای سرعت ثابت ۳m/s و برای دورهای rpm ۹۰۰و ۱۱۰۰rpm 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 ۹۰۰ rpm**

| ردیف | سرعت ورودی | دور پروانه | مدل توربولانسی | ضریب پیشروی |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۴۳m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۱ |
| ۲ | ۰/۸۷m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۲ |
| ۳ | ۱/۳۰m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۳ |
| ۴ | ۱/۷۴m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۴ |
| ۵ | ۲/۱۷m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۵ |
| ۶ | ۲/۶۱m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۶ |
| ۷ | ۳/۴۸m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۸ |

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

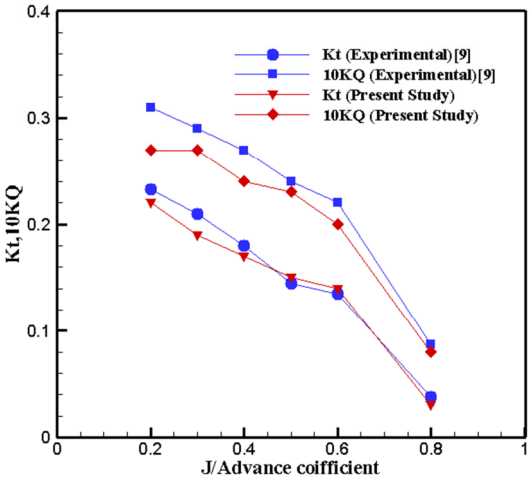
| ردیف | سرعت ورودی | دور پروانه | مدل توربولانسی | ضریب پیشروی |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱m/s | ۸۱۶rpm | k-ε | ۰/۲۵ |
| ۲ | ۳m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۶۸ |
| ۳ | ۱m/s | ۹۰۰rpm | k-ε | ۰/۲۲ |
| ۴ | ۳m/s | ۱۱۰۰rpm | k-ε | ۰/۵۶ |
| ۵ | ۱m/s | ۲۰۶۸rpm | k-ε | ۰/۱ |
| ۶ | ۱m/s | ۱۰۳۵rpm | k-ε | ۰/۲ |
| ۷ | ۱m/s | ۶۹۰rpm | k-ε | ۰/۳ |
| ۸ | ۱m/s | ۵۲۰rpm | k-ε | ۰/۴ |
| ۹ | ۱m/s | ۴۱۵rpm | k-ε | ۰/۵ |
| ۱۰ | ۱m/s | ۳۴۵rpm | k-ε | ۰/۶ |
| ۱۱ | ۱m/s | ۲۶۰rpm | k-ε | ۰/۸ |
| ۱۲ | ۱m/s | ۲۰۰rpm | 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 ۱۰۳۴ rpm به ۲۰۶۸ rpm افزایش می‌یابد کسر حجمی بخار شکل گرفته بر روی پره ها حجم زیادی را به خود اختصاص خواهد داد، لازم به ذکر است که همانطور که قبلا اشاره شد محدوده شکل گیری کسر حجمی بخار بر روی پره J=۰/۶ بوده که به ازای دور ۹۰۰ 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.

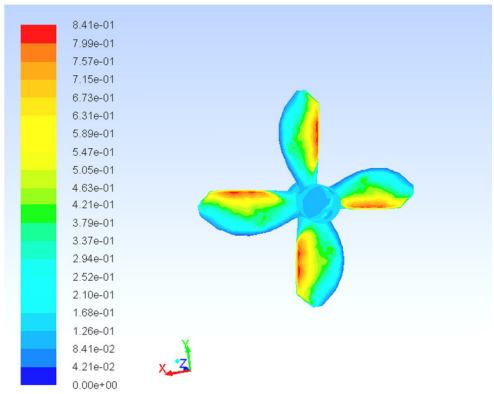


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

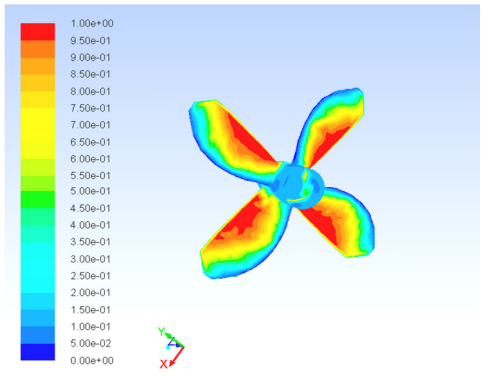
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]




**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 ۳m/s(الف): برای دور ۱۰۳۴ rpm (J=۰/۲) و (ب): برای دور ۲۰۶۸rpm (J=۰/۱)**

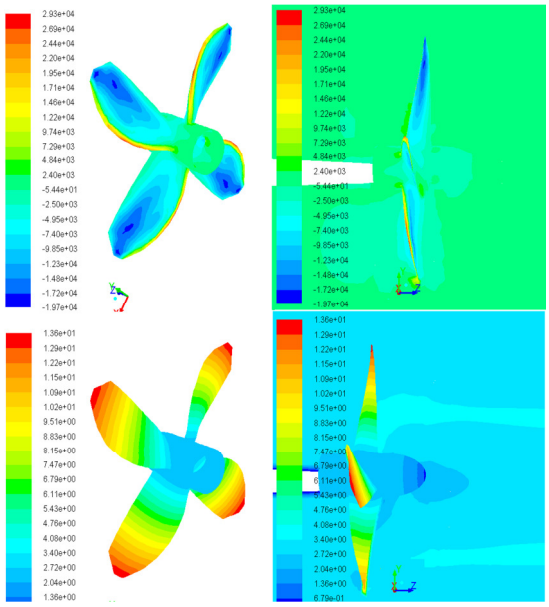
کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیک جهت محاسبه عدد کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پره در شرایط عملکردی دور ۹۰۰ rpm و سرعت جریان ۳ m/s در شکل ۷ قابل مشاهده است. هرگاه پروانه دارای دور کم باشد کاویتاسیون را در r=0 یعنی در ریشه بررسی و اگر دور پروانه زیاد باشد کاویتاسیون در r=۰/۷R بررسی می‌شود. اعداد کاویتاسیون در این دو حالت طبق روابط (۶) و (۷) بدست می‌آید[۲]. محدوده وقوع شروع کاویتاسیون و اعداد کاویتاسیون در نقاط مختلف پروانه در جدول ۴ به ازای دورهای ۹۰۰rpm و ۱۱۰۰rpm برای سرعت جریان ۳m/s مشاهده می‌شود. همانطور که از کانتور فشار استاتیکی نمایش داده شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش دور در سرعت ثابت ۳m/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.

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

$$r = 0.7R \qquad (۷)$$

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

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



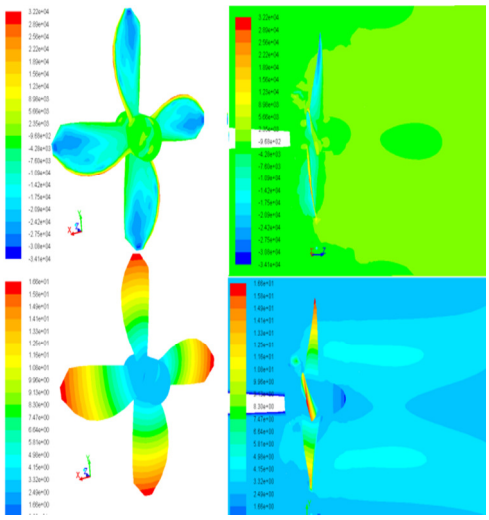
**شکل ۷- کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیک جهت محاسبه عدد کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پروانه (دو کانتور بالا فشار استاتیک و دو کانتور پایین سرعت مماسی در دور ۹۰۰ rpm و سرعت جریان ۳ m/s در J=۰/۶۸ )**

نحوه شکل گیری کاویتاسیون صفحه‌ای، رشد و جدایش کاویتی در شکل ۹ و مقایسه آن با نحوه شکل‌گیری 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.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

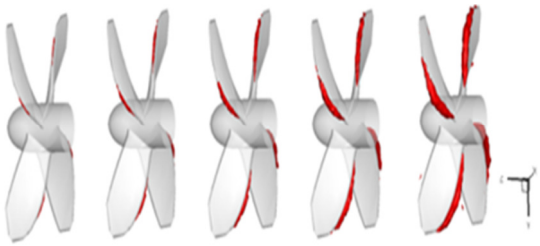
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]



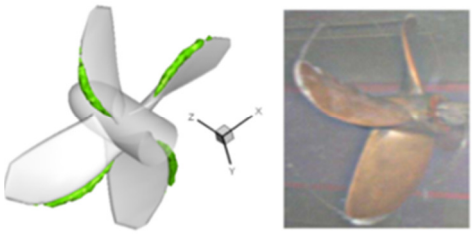
شکل ۸- کانتورهای سرعت مماسی و فشار استاتیک جهت محاسبه عدد کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پروانه (دو کانتور بالا فشار استاتیک و دو کانتور پایین سرعت مماسی در دور ۱۱۰۰ rpm و سرعت جریان۳m/s در J=۰/۵۶ )

جدول ۴-مقایسه وقوع کاویتاسیون در نقاط مختلف پروانه مدل A در دور ۹۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm برای سرعت جریان۳ m/s

| نتایج عدد کاویتاسیون برای دور ۹۰۰ rpm و سرعت۳ m/s (J=۰/۶) | | |
|---|---|---|
| عدد کاویتاسیون در تحقیق حاضر | محل مورد نظر روی پروانه مدل A | احتمال وقوع کاویتاسیون[۲] |
| ۰/۵۷ | نوک پره | وقوع کاویتاسیون حتمی است σ<۰/۶ |
| ۰/۸۵ | روی لبه در R ۰/۷ | احتمال وقوع زیاد ۰/۶<σ<۲است |
| ۱۰/۶۷ | روی ریشه | احتمال وقوع کم است σ>۲ |
| **نتایج عدد کاویتاسیون برای دور ۱۱۰۰ rpm و سرعت ۳ m/s (J=۰/۵)** | | |
| ۰/۵۰ | نوک پره | وقوع کاویتاسیون حتمی است σ<۰/۶ |
| ۰/۷۸ | روی لبه در R ۰/۷ | احتمال وقوع زیاد است ۰/۶<σ<۲ |
| ۷.۱۲ | روی ریشه | احتمال وقوع کم است σ>۲ |



شکل ۹- نحوه شکل گیری کاویتاسیون صفحه‌ای، رشد و جدایش کاویتی در تحلیل عددی در مراحل مختلف در دور ثابت ۹۰۰ rpm



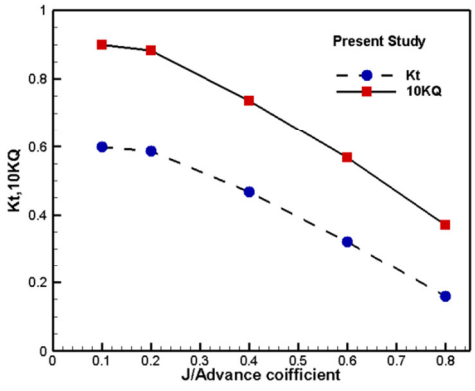
شکل ۱۰- شروع کسر حجمی بخار و مقایسه آن با نحوه شکل‌گیری کاویتاسیون صفحه‌ای در تونل کاویتاسیون در دور ۹۰۰ rpm [۹]

پروانه مدل B

جهت مقایسه میان نتایج جریانی دور پروانه مدل B 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 ۱۸۵۰rpm اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه در این پروانه شروع کاویتاسیون در دور ۱۸۵۰rpm است. این مدل پروانه در دورهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است تا به دور لازم جهت شکل‌گیری فاز بخار برسد که در نهایت در دور ۱۸۵۰ rpm و در سرعت جریان معادل با ۳ متر بر ثانیه که معادل با J=۰/۳۲ بوده به شرایط کاویتاسیونی 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 کاویتاسیونی خواهند رسید. شرایط عملکردی مختلف پروانه مدل B در جدول ۵ و به ازای دور ثابت ۹۰۰rpmقابل 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 ۹۰۰rpm در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۵- شرایط عملکردی مختلف در پروانه مدل B

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




شکل ۱۱- نتایج ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی در تحلیل عددی در دور ثابت ۹۰۰rpm برای پروانه مدل B

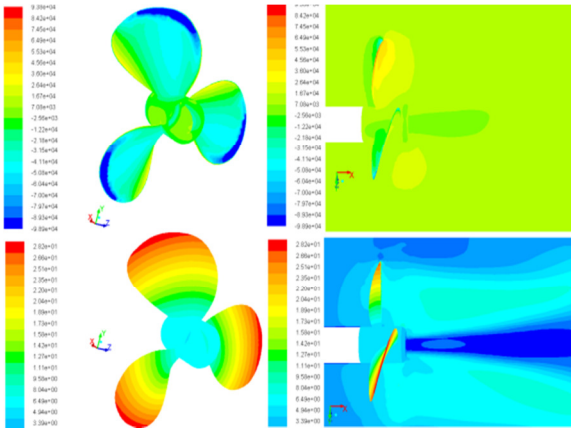
کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در J=۰/۳۲ و در دور ۱۸۵۰rpmکه مرحله شروع کاویتاسیون و تشکیل فاز بخار بر روی پره است در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. ی از این دو کانتور



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

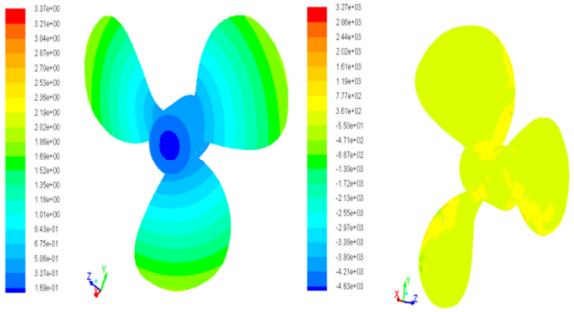
جهت محاسبه عدد کاویتاسیون بر روی مناطق مختلف پره استفاده می‌شود. همانطور که مشخص است کاویتاسیون تنها در لبه یا نوک پره بوده که فشار استاتیک به طرز قابل توجهی کاهش پیدا کرده و جهت محاسبه عدد کاویتاسیون در هر منطقه این فشار با فشار اتمسفر که معادل ۱۰۱۵۰۰ پاسکال است جمع و سپس مطابق رابطه ۷ عدد کاویتاسیون با استفاده از مقادیر ارائه شده در در شکل ۱۲ محاسبه می‌شود. مقادیر عدد کاویتاسیون در نقاط مختلف پره در جدول ۶ به خوبی مشاهده می‌شود. با مقادیر بدست آمده در جدول ۶ بخوبی مشاهده می‌شود که کاویتاسیون برای پروانه مدل B تنها در ناحیه کوچکی از نوک پره در لحظه شروع یعنی در دور rpm ۱۸۵۰ به وجود می‌آید که با افزایش دور این مقادیر افزایش می یابد.



**شکل ۱۲- کانتورهای فشار استاتیکی در J=۰/۳۲ و در دور rpm ۱۸۵۰ برای پروانه مدلB**

**(کانتورهای بالا فشار استاتیکی و کانتورهای پایین میدان سرعت)**

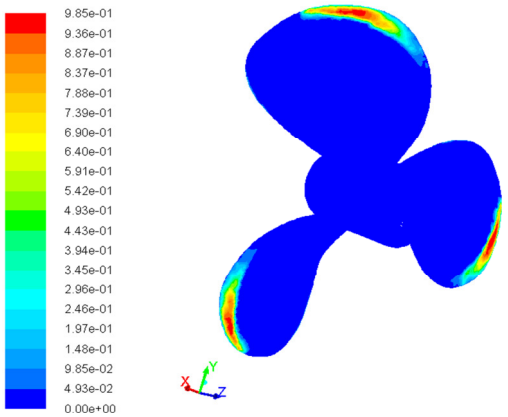
کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در J=۰/۸۳ و در دور rpm ۱۲۰ در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مشاهده شده در این کانتورها مشاهده می‌شود در این شرایط و دور پروانه کسر حجمی بخار بر روی پره به وجود نمی‌آید. در این پروانه حل برای شرایط مختلف صورت گرفته است که دور پروانه از rpm ۱۲۰ شروع شده که در نهایت در دور rpm ۱۸۵۰ کسر حجمی بخار بر روی پره شکل گرفته، کسر حجمی بخار و نحوه رشد کاویتی بر روی پره در مرحله شروع کاویتاسیون در J=۰/۳۲ نیز در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است نتایج مربوط به ضریب تراست و گشتاور نسبت به ضریب پیشروی برای حالتی که دور در rpm ۱۸۵۰ ثابت نگه داشته شده و حل در J= ۱-۰/۱ 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 تقریبا با بکارگیری ۸ هسته ۱۵ روز به طول می‌انجامد.



**شکل ۱۳- کانتورهای سرعت و فشار استاتیکی در J=۰/۸۳ و در دور rpm ۱۲۰ برای پروانه مدلB**

**جدول ۶- محدوده وقوع عدد کاویتاسیون و اعداد کاویتاسیون در نقاط مختلف پروانه مدل B در J=۰/۳۲ و N=۱۸۵۰ rpm**

| عدد کاویتاسیون | محل مورد نظر روی پروانه | احتمال وقوع کاویتاسیون[۲] |
|---|---|---|
| ۰/۰۵۸ | نوک پره | σ<۰/۶ وقوع کاویتاسیون حتمی است |
| ۰/۳۷ | روی لبه در R ۰/۷ | ۰/۶<σ<۲ احتمال وقوع زیاد است |
| ۲۹۶ | در ریشه پره | σ>۲احتمال وقوع کم است |




**شکل ۱۴- کسر حجمی بخار شکل گرفته در شروع کاویتاسیون در J=۰/۳۲ و در دور rpm ۱۸۵۰ برای پروانه مدلB**

## 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 می‌شود 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 می‌شود. در رابطه ۹، $P_{ref}$معادل با فشار مرجع و برابر با $10^{-6}pa$ می‌باشد [۱].

$$TL=20log(R/R_0) \qquad (۸)$$



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

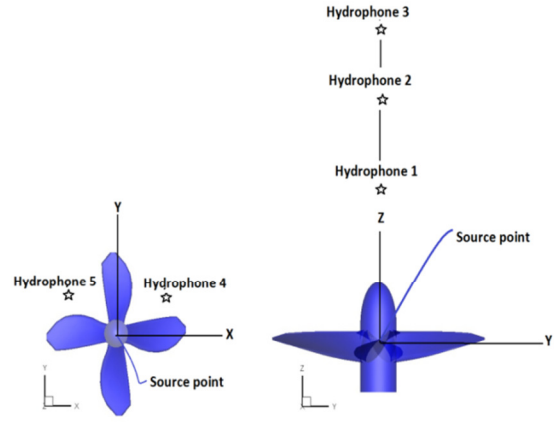
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

$$SPL=20log(P/P_{ref}) \quad (۹)$$

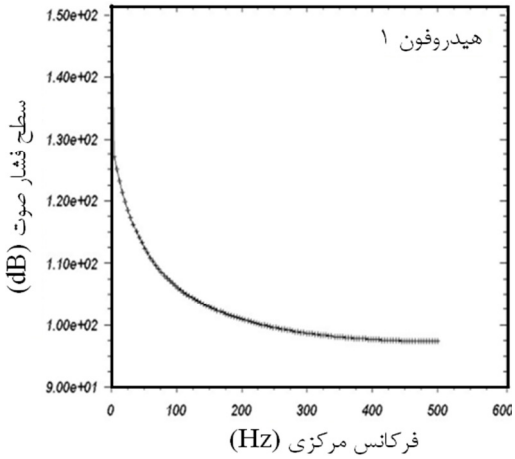
در این مقاله استخراج سطح طیف نویز برای پروانه مدل A در پنج هیدروفون نشان داده شده است. مختصات محل قرار گیری هیدروفونها برای سه هیدروفون ۱، ۲ و ۳ نسبت به منبع که در صفحه x-y واقع شده و برای دو هیدروفون ۴ و ۵ که در صفحه x-z قرار دارد در جدول ۷ و در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. صفحه منبع در این دو حالت صفحه واقع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

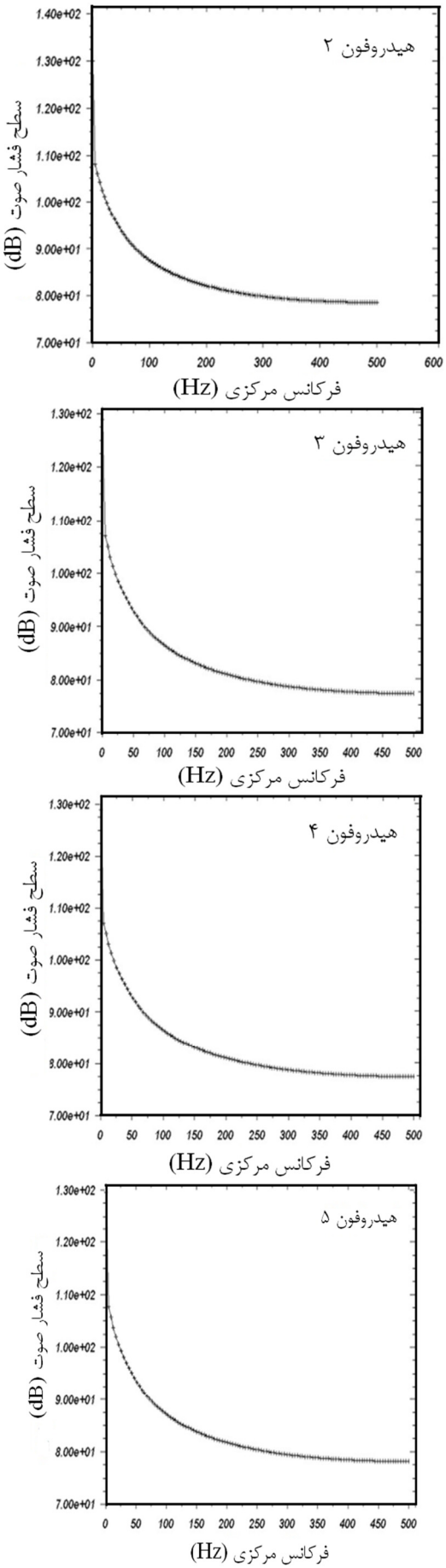
**جدول۷- مختصات محل قرار گیری هیدروفونها در پروانه مدل A نسبت به نقطه منبع واقع در دو صفحه x-y و x-z**

| شماره هیدروفون | X(m) | Y(m) | Z(m) |
|---|---|---|---|
| H1 | ۰ | ۰ | ۱/۵ |
| H2 | ۰ | ۰ | ۲/۵ |
| H3 | ۰ | ۰ | 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**



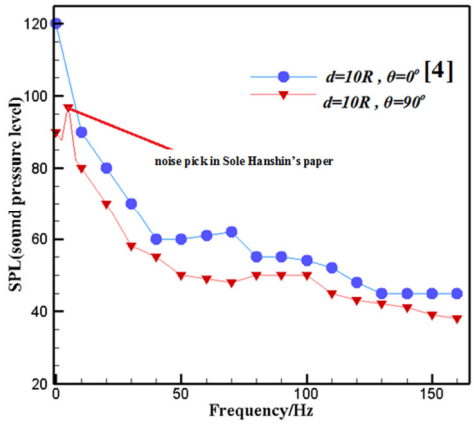

**شکل ۱۶- سطوح طیف صوت در پنج هیدروفون درحالت غیرکاویتاسیونی برای پروانه مدل A**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

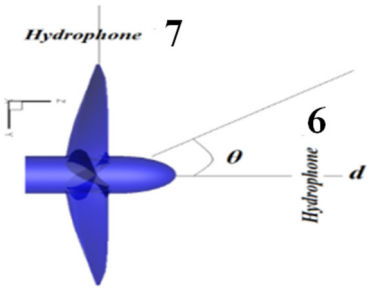
برای حالتی که کاویتاسیون وجود ندارد یا به عبارتی کسر حجمی بخار وجود ندارد باحل کامل آکوستیک نتایج در فرکانسهای کمتر از ۱ کیلوهرتز بدست می‌آید که در این حالت کاملا منطقی است زیرا در این حالت فقط نویز ضخامتی ناشی از چرخش پروانه و نویز بار گذاری ناشی از تغییرات سطح فشار در آب وجود دارد که محدوده فرکانسی 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 دقیقا 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 $\theta=0^{o}$و$\theta=90^{o}$ و با شرایط عملکردی N=۱۲۰ rpm و ۱/۶ m/s =V 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=۵R و در دو صفحه عمودی و افقی $\theta=0^{o}$و$90^{o}$ برای پروانه مدل A و در شرایط عملکردی N=۹۰۰rpm و V= ۳ 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 $\theta=0^{o}$و$90^{o}$ و با شرایط عملکردی N=۱۲۰rpm و V= ۱/۶ m/s [۴]**

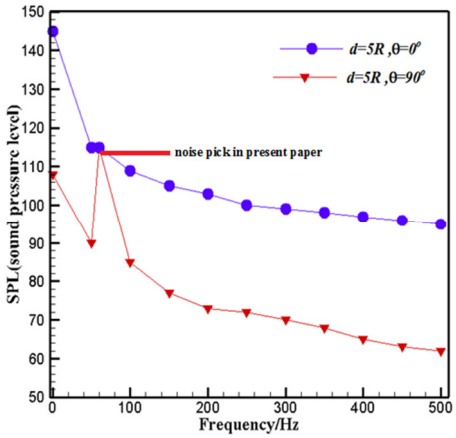
**جدول ۸- مختصه دو هیدروفون جهت مقایسه نحوه و مقدار انتشار نویز در صفحات d =۵ R و $\theta=0^{o}$و$90^{o}$ (مقایسه منابع تک قطبی و دوقطبی)**

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




**شکل۱۸- محل قرارگیری دو هیدروفون ۶ و ۷ در دو صفحه عمودی و افقی**

تغییرات سطوح نویز در دو صفحه افقی و عمودی مربوط به $\theta=0^{o}$ و $\theta=90^{o}$ 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 کاملا 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 غیرکاویتاسیونی 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 $\theta=0^{o}$و$90^{o}$برای پروانه مدل A در شرایط عملکردی N=۹۰۰ rpm و V= ۳ m/s**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

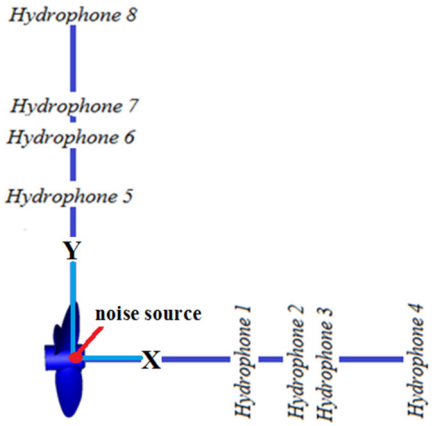
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

سطح طیف صوت پروانه مدل B

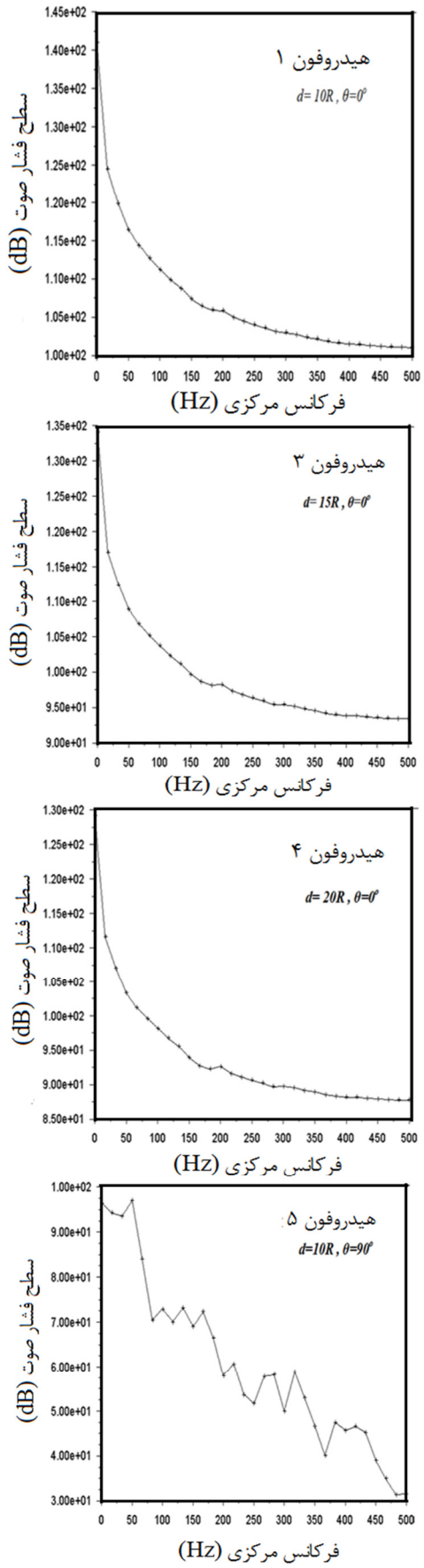
استخراج سطح طیف صوت برای پروانه مدل B در هشت هیدروفون استخراج شده است که نتایج در ۶ هیدروفون ارائه می‌شود. مختصات محل قرار گیری هیدروفونهای ۱، ۲، ۳ و ۴ نسبت به صفحه منبع صوت واقع در صفحه z-y و برای هیدروفونهای ۵، ۶، ۷ و ۸ نسبت به منبع صوت واقع در صفحه z-x در جدول ۹ و در شکل ۲۰ نشان داده شده است. سطوح طیف صوت در شش هیدروفون درحالت 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 $\theta=0^{o}$و$\theta=90^{o}$در فواصل d=10R,15R,20R در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود.

**جدول۹- 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**

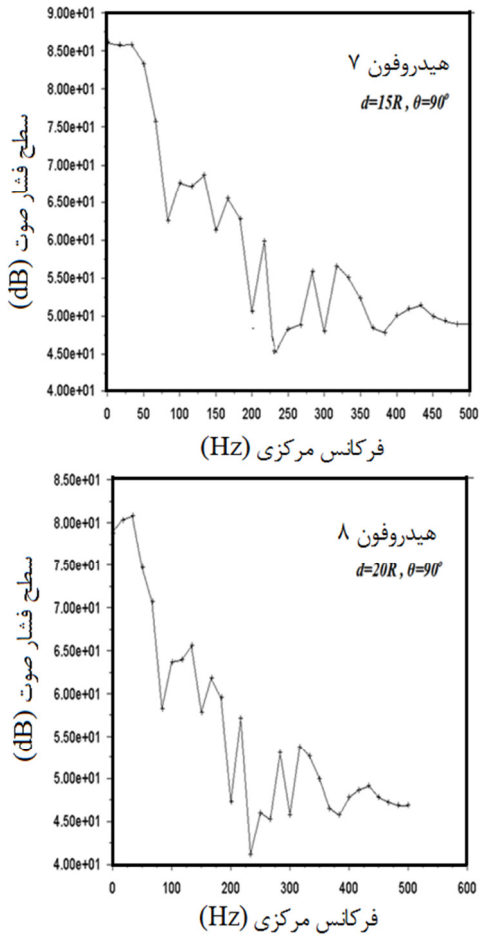



**شکل ۲۱- سطوح طیف صوت در شش هیدروفون درحالت غیرکاویتاسیونی برای پروانه مدل Bواقع در $\theta=0^{o}$و$\theta=90^{o}$در فواصل d=10R,15R,20R**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]




**شکل ۲۱- سطوح طیف صوت در شش هیدروفون درحالت غیرکاویتاسیونی برای پروانه مدل Bواقع در ۹۰°و۰°=θدر 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 تقریبا 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 کاویتی و تاثیر آن بر شرایط عملکردی 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 دورهای 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 دورهای پایین که فاز بخار به شکل وسیعی شکل نگرفته است در مقایسه با نویز بارگذاری دوقطبی 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 مناطقی 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 اجراهای 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 نماییم.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]

**فهرست علائم**

$J=V_a/nD$: ضریب پیشروی پروانه

$K_t=T/\rho N^2D^4$: ضریب تراست

$K_Q=Q/\rho N^2D^5$: ضریب گشتاور

$N$: دور پروانه($rpm$)

$V_a$: سرعت محوری جریان($ms^{-1}$)

$T$: تراست پروانه($kgms^{-2}$)

$Q$: گشتاور پروانه($kgm^2s^{-2}$)

$\alpha_v$: کسر حجمی بخار

$\alpha_L$: کسر حجمی مایع

$\sigma$: عدد کاویتاسیون

$P_v$: فشار بخار($kgm^{-1}s^{-2}$)

$P_0$: فشار استاتیک($kgm^{-1}s^{-2}$)

$R$: شعاع پروانه(m)

$D$: قطر پروانه(m)

$P_a$: فشار اتمسفر($kgm^{-1}s^{-2}$)

$h$: هد استاتیکی(m)

$g$: شتاب جاذبه($ms^{-2}$)

$\rho$: چگالی سیال($kgm^{-3}$)

$\theta$: زاویه نسبت به محور هاب

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

$\gamma$: کشش سطح

$SPL$: سطح طیف صوت(dB)

$TL$: میزان اتلاف صوت در سیال(dB)

$m$: تعداد هارمونی‌های مرتبط با چرخش پروانه

$n$ : تعداد پره‌های 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) *Encylopedia 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.

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 pridection of blade frequency noise of cavitating propeller*, Journalof 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. RoyalSociety London 211, 564-587.

12. Ffowcs Williams, J.E., HawkingsD.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.


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.4.6 ]