

اندازه‌گیری نوفه پروانه دریایی در تونل کاویتاسیون

محمد رضا باقری*

دانشجوی دکتری مکانیک دریا
قطب علمی هیدرودینامیک
و دینامیک متحرک‌های دریایی
دانشگاه صنعتی شریف

mrb.bagheri@gmail.com

محمد سعید سیف

استاد قطب علمی هیدرودینامیک
و دینامیک متحرک‌های دریایی
دانشگاه صنعتی شریف

seif@sharif.edu

حمید مهدیقلی

استادیار قطب علمی هیدرودینامیک
و دینامیک متحرک‌های دریایی
دانشگاه صنعتی شریف

mehdi@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۳

چکیده

در این مقاله اندازه‌گیری نوفه^۱ پروانه دریایی مغروق در تونل کاویتاسیون^۲ بررسی شده است. در این رهگذر، سیگنال‌های ثبت‌شده در دو هیدروفون استخراج و با استفاده از روش یک‌سوم اکتاو در بسته نرم‌افزاری متلب^۳ ارزیابی شده است. سیگنال‌های استخراج‌شده در شرایط عملکردی گوناگون با تغییر در دور پروانه، سرعت جریان و آثار افت فشار در تونل کاویتاسیون ثبت می‌شود. شرایط ایجاد کاویتاسیون در تونل کاویتاسیون، ایجاد و نحوه افزایش و توسعه کاویتاسیون از طریق افزایش دور پروانه، کاهش فشار و تأثیر آن بر تولید نوفه مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعه سیگنال‌های ثبت‌شده با توجه به نحوه اندازه‌گیری و فرکانس نمونه‌برداری دارای حجم بالایی است؛ از این‌رو با ارائه برنامه‌ای در متلب و استفاده از محیط SPTOOL برای شرایط مختلف آزمایش، و برای هر یک‌سوم اکتاو مطابق با روش ارائه‌شده در کمیته بین‌المللی تست پروانه در تونل کاویتاسیون و مخزن آب^۴ سطح فشار صوت برای دو هیدروفون و در شرایط عملکردی گوناگون استخراج می‌شود. نتایج در دو هیدروفون و در فواصل گوناگون از منبع تولید صوت مقایسه می‌شوند. نتایج این مقاله به‌عنوان نخستین کار تحقیقاتی در حوزه نوفه پروانه در تونل کاویتاسیون در کشور حائز اهمیت است و به‌منظور استفاده در کنترل و کاهش نوفه پروانه‌های شناورهای سطحی و زیرسطحی قابل استفاده می‌باشد.

واژگان کلیدی: نوفه پروانه، کاویتاسیون پروانه، افت فشار، تونل کاویتاسیون

۱. مقدمه

اصولاً هرگونه ناهمگنی در محیط سیال و یا ارتعاش جسم در آن، منبع تولید نوفه و امواج آکوستیک در آب خواهد بود. معمولاً عوامل متعددی سبب ایجاد نوفه در شناورهای متحرک در دریا می‌شود که یکی از اصلی‌ترین آنها نوفه

پروانه است [۱]. هرچند پروانه بخشی از سیستم پیشراننده شناور محسوب می‌شود، اما به‌دلیل نحوه تولید صوت آن در گروه جداگانه‌ای بررسی می‌شود. اصولاً تعداد پروانه و تعداد پره هر پروانه در شناورهای گوناگون یکسان نیست.

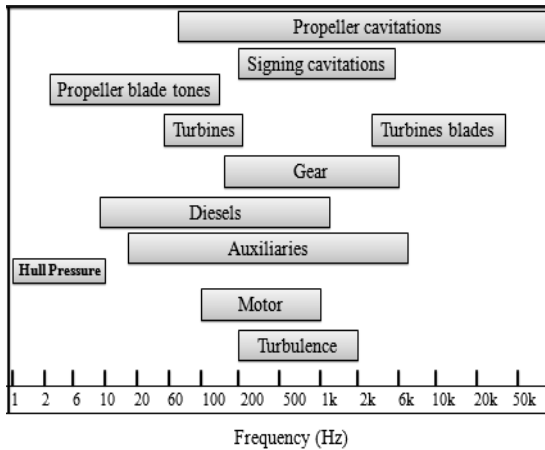
همچنین گام پروانه در برخی شناورها قابل تغییر است. بنابراین با توجه به اهمیت مربوط به هندسه پروانه در تولید نوفه، به خصوص ایجاد کاویتاسیون، به عنوان منبع تک قطبی و مهم ترین منبع تولید صوت در فرکانس های بالا و در میدان دور جهت شروع پدیده کاویتاسیون، در این مقاله مدل پروانه چهارپره و در شرایط عملکردی گوناگون سرعت جریان، دور پروانه و تغییر در فشار تونل کاویتاسیون بررسی و نتایج مطلوبی حاصل می شود. نوفه پروانه چهار منشأ اصلی دارد که به ترتیب عبارتند از [۲]:

۱. جابه جایی آب توسط چرخش پره های پروانه
۲. اختلاف فشار میان سطوح جلو و عقب پره های پروانه، وقتی در حال چرخش است
۳. نوسانات حجمی کاویتی به وجود آمده روی پره ها
۴. فرایند فروریزش کاویتی^۵

دو مورد اول، هم در حالت شرایط جریان غیر کاویتاسیون^۶ و هم در حالت جریان کاویتاسیونی^۷ وجود دارد؛ حال آنکه موارد سوم و چهارم تنها در شرایط کاویتاسیونی رخ می دهند. در این مقاله تنها نتایج مربوط به سطح فشار صوت منابع غیر کاویتاسیونی ارائه می شود. مورد اول از نوع منابع نوفه تک قطبی^۸ است که به آن نوفه ضخامت^۹ نیز گفته می شود و بیشترین مقادیر سطح فشار صوت آن در صفحه چرخش پروانه است. مورد دوم، که منبع صوت دوقطبی^{۱۰} است، تحت عنوان نوفه بارگذاری^{۱۱} است و دارای بیشترین مقادیر سطح فشار صوت در جلوی هاب پروانه است. اما مجموع آنها، که نوفه در حالت کلی است، دارای بیشترین مقادیر در صفحه واقع بر محور هاب است. بنابراین در حالت کلی نوفه پروانه شامل دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی می باشد که نوفه حالت کاویتاسیونی دارای سطوح فشار صوت بالاتر در یک فرکانس خاص نسبت به نوفه غیر کاویتاسیونی است.

در شکل ۱ محدوده مرتبط با فرکانس هر یک از منابع تولید نوفه پروانه نمایش داده شده است. در این شکل، محدوده فرکانسی مربوط به هر یک از عوامل مهم و عمده

تولید نوفه در شناورها ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، نوفه های مربوط به کاویتاسیون پروانه از ۱۰ کیلوهرتز هم بیشتر می شود [۳]. همچنین محدوده فرکانسی نوفه های غیر کاویتاسیونی از ۵ تا ۱۰۰۰ هرتز است.

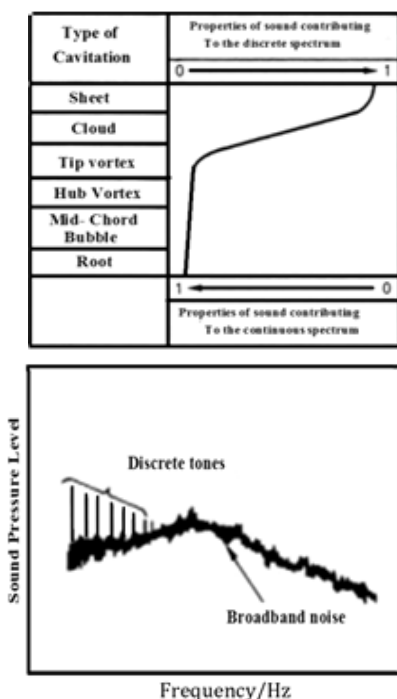


شکل ۱. محدوده فرکانسی

مربوط به هر یک از منابع تولید نوفه در شناور [۳]

هانشین سول و همکاران (۲۰۰۵) یک روش عددی جهت مطالعه نوفه غیر کاویتاسیونی و نوفه کاویتاسیون صفحه ای پره پروانه را بررسی کرده اند [۴]. در نتایج حاصل از کار آنها نوفه کاویتاسیون صفحه ای ناشی از رشد و فروریزش از یک لایه یا صفحه ای از حباب ها، که حجم منحصر به فرد روی تیغه را در بر می گیرد، مشاهده می شود. شکل ۲ نشان دهنده طیف نوفه کلی از یک پروانه کاویتاسیونی است. کاویتاسیون صفحه ای صوت را از ۵ هرتز تا بیشتر از ۱۰ کیلوهرتز منتشر می کند. نوفه فرکانس پایین (منطقه ۱ و ۲ روی شکل ۲) ناشی از نوساناتی از حجم های کاویتاسیون صفحه ای است که توسط یک حباب بزرگ، که به شکل یک منبع تک قطبی آکوستیکی عمل می کند، ارائه می شود. از طرفی، نوفه فرکانس بالا (منطقه ۳ و ۴) توسط فروریزش کاویتی صفحه ای یا توسعه موج شوک به وجود می آید [۴]. نوفه تک قطبی یا ضخامت یا انرژی آکوستیکی در هارمونی های پایین بیشترین مقادیرش در صفحه

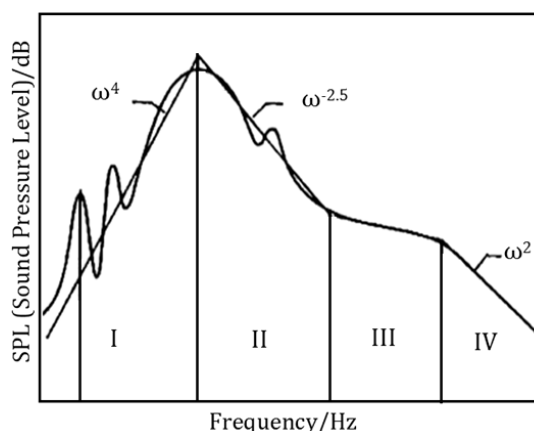
(۲۰۱۲) جهت استخراج نوفه پروانه سه‌پره صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نیز حاکی است که سطح فشار صوت کلی پروانه در صفحه جلوی هاب و منطبق بر محور آن بیشتر از صفحه واقع بر صفحه چرخش پروانه است [۶].



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

باقری و همکاران (۲۰۱۲) نیز سطح فشار صوت پروانه سه‌پره در دوره‌های پایین را توسط روش حجم محدود^{۱۷} و با شبکه‌بندی کمتر جهت دسترسی به محدوده جواب‌ها برای ایجاد شرایط کاویتاسیون و تشکیل فاز بخار مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مرتبط نیز حاکی است که برای این مدل پروانه در دوره‌های بسیار بالا به شرایط کاویتاسیون نزدیک و در دوره‌های بالا و محدوده‌ای تقریباً معادل $z = 0.32$ و کمتر از آن به حالت کاویتاسیون نزدیک می‌شود [۷]. در تحقیق دیگری از باقری و همکاران (۲۰۱۲)، نوفه غیرکاویتاسیونی پروانه چهارپره از سری B توسط روش حجم محدود تحلیل شده است [۸]. در کار تحقیقاتی که توسط پارک و همکاران (۲۰۰۹) انجام شده است، نوفه

چرخش پروانه منتشر می‌شود. نوفه بارگذاری غیریکنواخت به شکل منبع دوقطبی شناخته شده که بیشترین مقدار آن روی محور هاب است. اما در حالت کاویتاسیونی، گسستگی سطح فشار صوت مربوط به فرکانس‌های نوسانات کاویتی در سیال و تزریق آن به داخل سیال است. در حالت کاویتاسیونی، بیشترین سهم در گسستگی نمودارهای سطح طیف صوت مربوط به نوسانات کاویتاسیون صفحه‌ای به داخل سیال خواهد بود.



شکل ۲. محدوده فرکانسی نوفه پروانه در حالت کاویتاسیونی [۴]

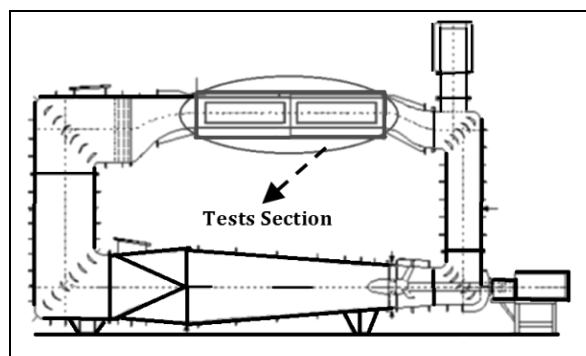
در حالت کلی چهار نمونه کاویتاسیون روی پروانه شامل کاویتاسیون حباب^{۱۲}، کاویتاسیون صفحه‌ای^{۱۳}، کاویتاسیون ابری^{۱۴} و کاویتاسیون نوک هاب^{۱۵} تحت عنوان هاب ورتکس^{۱۶} قابل بررسی می‌باشد که در این میان، بیشترین تأثیر روی گسستگی نمودارهای سطح طیف صوت مربوط به کاویتاسیون صفحه‌ای است. نحوه تأثیر آن روی گسستگی و پیوستگی سطح طیف صوت نیز در شکل ۳ مشاهده می‌شود [۲].

شارما و همکاران (۱۹۹۰) چند مدل پروانه را در تونل کاویتاسیون آزمایش و سطح طیف صوت آنها را استخراج کرده‌اند. نتایج بررسی آنها حاکی است که اختلاف سطح طیف صوت کلی در حالت کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی برای پروانه‌های گوناگون در حدود ۱۰ تا ۳۵ دسی‌بل می‌باشد [۵]. تحقیق دیگری توسط جین مینگ و همکاران

پروانه در تونل کاویتاسیون بررسی و اختلاف دامنه صوت در دو حالت کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی ثبت شده است [۹].

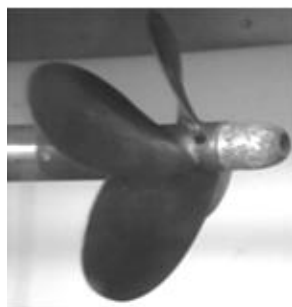
۲. تشریح مجموعه آزمایشگاهی و ثبت داده‌ها

اندازه‌گیری نوفه در تونل کاویتاسیون آزمایشگاه مهندسی دریا، واقع در دانشگاه صنعتی شریف^{۱۸}، انجام شده است. مقطع تست تونل کاویتاسیون دانشگاه صنعتی شریف در شکل ۴ و مشخصات آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. تونل کاویتاسیون K23 و قسمت‌های گوناگون بدنه آن

پیشنهادی جهت جانمایی هیدروفون و منبع در یک مخزن آب معمولاً نیمی از عمق مخزن است. در این مقاله محل قرارگیری هیدروفون‌ها، با توجه به امکانات موجود، برآورد نیازها در پدیده‌شناسی نوفه پروانه، رعایت عمق پیشنهادی برای قرارگیری هیدروفون در کانال آب، ابعاد پروانه‌های مورد آزمایش (ماکزیمم قطر پروانه جهت انجام آزمایش در تونل کاویتاسیون K23 معادل با ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد)، ابعاد تونل کاویتاسیون (ابعاد مقطع اندازه‌گیری تونل کاویتاسیون آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف مخزنی مستطیلی‌شکل به طول ۳۲۰۰ میلی‌متر، عرض ۶۳۰ میلی‌متر و عمق ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد) و همچنین مطالعات آماری موجود در گزارش‌های منتشر شده توسط کمیته تست مخزن آب^{۱۹} روی مقطع جانبی در تونل کاویتاسیون در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، هدف اندازه‌گیری و آنالیز نوفه مطلق یک مدل پروانه چهارپره است؛ پروانه‌ای که مشخصات هندسی و فنی آن به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۵. هندسه پروانه مدل

جدول ۲. مشخصات فنی پروانه مورد بررسی

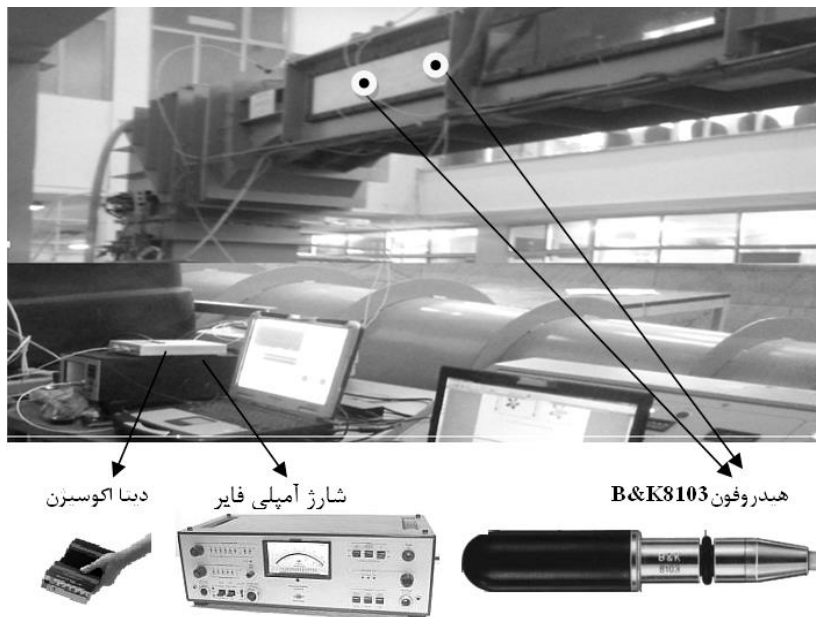
۴	تعداد پره
۰/۱۵	قطر (متر)
۰/۶	A_E/A_0
۱	P/D

در این آزمایش از دو هیدروفون مدل بی. اند کی. ۲۰۸۱۰۳ به همراه ملحقات آن شامل شارژ آمپلی‌فایر دوکاناله مدل

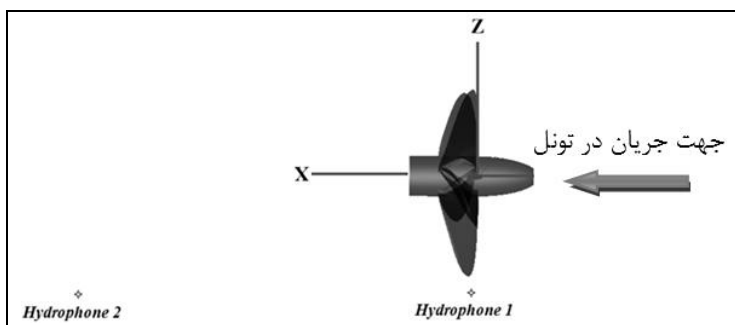
از جمله موضوعات اساسی در تونل کاویتاسیون مشاهده الگوهای کاویتاسیونی از پروانه‌های مدل است. در این رهگذر، محل استقرار هیدروفون‌ها و استخراج عملکرد آکوستیکی بسیار مهم است. استاندارد قرارگیری هیدروفون‌ها شامل عمق قرارگیری، فاصله منبع (در این پژوهش منبع محل قرارگیری پروانه می‌باشد) و هیدروفون و محل یا ترازبندی که در واقع محور اصلی انتشار نوفه است و همان محور منبع می‌باشد. این سه شاخص زمانی، که تست در یک میدان پرنعکاس مانند تونل کاویتاسیون رخ می‌دهد، بسیار مهم است. هیدروفون و منبع نوفه باید در محلی قرار بگیرد که نوفه یا موج صوتی در ابتدا تا حد امکان مستقیم به هیدروفون برسد؛ یعنی قبل از آنکه بازتاب یا انعکاسی از مرزها داشته باشیم، ابتدا موج به هیدروفون برسد. بنابراین جهت ایجاد این شرایط فاصله میان هیدروفون و منبع (پروانه) بسیار مهم است. عمق

داده‌های آنالوگ از شارژر آمپلی‌فایر به داده‌های دیجیتال از یک داده‌برداری^{۳۳} استفاده می‌شود. ست‌آپ اندازه‌گیری آزمایش و موقعیت آنها نسبت به تونل کاویتاسیون در شکل ۶ مشاهده می‌شود. موقعیت هیدروفون‌های ۱ و ۲ نیز نسبت به پروانه جهت ثبت سیگنال‌ها در تونل کاویتاسیون در جدول ۳ و شکل ۷ مشاهده می‌شود.

برونل و کایر^{۲۱} ۲۶۱۰ استفاده می‌شود. هیدروفون بی. اند کی. ۸۱۰۳ دارای هندسه کوچک و مبدل^{۲۲} حساسیت‌بالا، مناسب برای اندازه‌گیری‌های صوتی بالا تا محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۱۸۰ کیلوهرتز و با یک حساسیت گیرنده حدود $re\ dB -211$ و ۱ ولت بر میکرو پاسکال را دارد. این نوع هیدروفون پاسخ فرکانسی بالایی دارد و برای اندازه‌گیری‌های نوفه کاویتاسیونی مفید است. برای تبدیل



شکل ۶. مجموعه ست‌آپ اندازه‌گیری نوفه پروانه



شکل ۷. محل قرارگیری هیدروفون‌ها نسبت به پروانه

۳. نحوه انجام آزمایش و تحلیل داده‌ها

مراحل جهت استخراج نتایج صحیح، با دقت خوبی اجرا شده است. نحوه انجام آزمایش و اندازه‌گیری نوفه پروانه شامل مراحل زیر است [۱۰-۱۱]:

جهت ثبت و اندازه‌گیری نوفه پروانه، استانداردها و مراحل گوناگونی توسط کمیته بین‌المللی تست پروانه در تونل کاویتاسیون و مخزن آب ارائه شده است. در این مقاله، این

۱. انجام آزمایش تنها در حالتی که جریان آب در تونل می‌چرخد، به‌منظور ثبت سیگنال‌های محیطی ناشی از گردش آب در تونل کاویتاسیون

۲. آزمایش در شرایطی که دینامومتر^{۲۴} بدون وجود پروانه در حال کار و جریان در تونل می‌چرخد

۳. انجام آزمایش در حالتی که پروانه بسته شده است و در شرایط عملکردی گوناگون عمل می‌کند

از جمله نکات مهم و کلیدی در تحلیل داده‌ها تشریح فرمولاسیون داده‌های ثبت‌شده در آزمایش است. پس از ثبت داده‌ها، در دو حالت با و بدون پروانه، داده‌های مورد نظر در هر یک‌سوم اکتاو بررسی می‌شوند. سطح فشار صوت ثبت‌شده در هر یک‌سوم اکتاو برای هر آزمایش و در فرکانس مرکزی مشخص با SPL_m معرفی می‌شود. حال بنابر استاندارد اندازه‌گیری صوت کمیته بین‌المللی تست پروانه در تونل کاویتاسیون و مخزن آب لازم است که مقدار طیف صوت در هر یک هرگز محاسبه شود، اگر پهنه باند در هر یک‌سوم اکتاو ثبت‌شده با Δf نمایش داده شود، در این‌صورت سطح فشار صوت در هر یک هرگز از رابطه ۱ به‌دست می‌آید [۱۰-۱۱].

$$SPL_1 = SPL_m - 10 \log \Delta f \quad (1)$$

همچنین نیاز است که مقادیر ثبت‌شده برای سطح فشار صوت را نسبت به یک فاصله مرجع (حدود ۱ متری) اصلاح شود که مطابق رابطه ۲ قابل بررسی است و در آن r فاصله از منبع صوت است [۱۰-۱۱]:

$$SPL = SPL_1 + 20 \log r \quad (2)$$

بنابراین با ثبت SPL_m برای هر یک‌سوم اکتاو می‌توان SPL و SPL_1 را برای هر آزمایش استخراج کرد و سپس طبق رابطه لگاریتمی ۳ سطح فشار مطلق پروانه را استخراج نمود:

$$SPL_N = 10 \log \left(10^{(SPL_T/10)} - 10^{(SPL_B/10)} \right) \quad (3)$$

به‌طوری‌که در این رابطه، سطح فشار صوت کلی اندازه‌گیری‌شده در تونل با پروانه و سطح فشار صوت اندازه‌گیری‌شده در تونل بدون وجود پروانه می‌باشد. چون

محدوده شنوایی انسان در پهنه ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز قرار دارد، بنابراین فرکانس‌های مرکزی مطابق استاندارد و براساس باند پایین اولین پهنه یک‌سوم اکتاو، معادل با ۲۵ هرتز بوده که در جدول ۴، فرکانس مرکزی هر پهنه باند مشاهده می‌شود [۱۲].

بر اساس فرکانس‌های مرکزی و مطابق با تعریف باند پایین و بالایی در پهنه یک‌سوم اکتاو، که در رابطه ۴ مشاهده می‌شود، می‌توان پهنای باند را برای هر یک‌سوم اکتاو محاسبه کرد. اگر فرکانس بالایی در پهنه یک‌سوم اکتاو را با f_u ، فرکانس پایینی در پهنه یک‌سوم اکتاو را با f_l و فرکانس مرکزی در هر یک‌سوم اکتاو را با f_c تعریف کنیم، آنگاه بنابر روابط ۴ باند فرکانسی پایین، بالا و فرکانس مرکزی در پهنه یک‌سوم اکتاو به شکل زیر به یکدیگر مرتبط می‌شود [۱۲]:

$$f_1 = \frac{f_c}{2^{\frac{1}{6}}} \quad (4)$$

$$f_u = 2^{\frac{1}{6}} f_c$$

$$f_c = \sqrt{f_1 f_u}$$

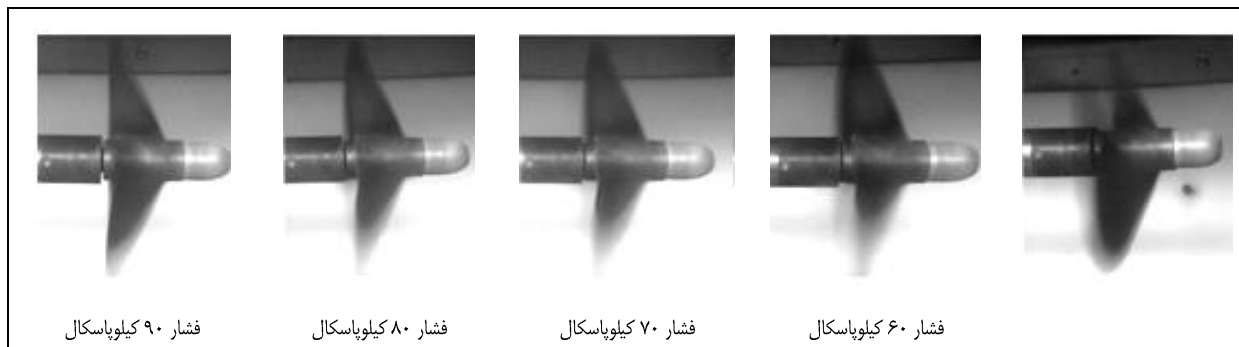
سیگنال‌های ثبت‌شده توسط دو هیدروفون در تاریخچه زمانی ثبت شده، با نوشتن برنامه‌ای در بسته نرم‌افزاری متلب فراخوانی و با استفاده از محیط $SPTOOL$ می‌توان سیگنال‌های موجود در حوزه زمانی را به حوزه فرکانسی تبدیل کرد و براساس روابط انتگرال فوریه از سیگنال‌های زمانی تبدیل سریع فوریه^{۲۵} گرفت. نتایج ثبت‌شده در $SPTOOL$ را در هر یک‌سوم اکتاو ثبت و سپس با استفاده از روابط ۱ تا ۳ برای شرایط عملکردی گوناگون سطح فشار صوت مطلق پروانه به‌دست می‌آید [۱۳].

۴. نتایج

این مدل پروانه در شرایط عملکردی گوناگون جهت نیل به شرایط عملکردی لازم به‌منظور رسیدن به شرایط شروع و توسعه کاویتاسیون و تأثیر آن بر میزان سطح فشار صوت

آزمایش شده است. چون تغییر در افت فشار نسبت به تغییرات سرعت محوری و دور پروانه تأثیر بیشتری بر شروع کاویتاسیون و توسعه آن دارد، بنابراین جهت رسیدن به شروع و توسعه کاویتاسیون با انجام آزمایش‌های متعدد شرایط شروع کاویتاسیون را در فشار ثابت مشخص و سپس با ثابت نگه‌داشتن دور پروانه و ایجاد افت فشار، شرایط توسعه کاویتاسیون را دنبال و در نهایت تأثیر آن بر تغییرات نوفه مطلق پروانه بررسی می‌شود. این پروانه در محدوده دور ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و تغییر سرعت محوری در محدوده ۵/۰ تا ۲ متر بر ثانیه آزمایش شده است که در نهایت در دور ۱۷۰۰ دور بر دقیقه کاویتاسیون رخ می‌دهد. میزان کاویتاسیون در این دور خیلی کم است و تنها در لبه

به میزان اندکی رخ می‌دهد. بنابراین با تغییر دور به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه میزان کاویتاسیون بیشتر می‌شود، که دور پروانه در آن ثابت نگه داشته می‌شود و با اعمال افت فشار تأثیر توسعه کاویتاسیون بر رشد و توسعه کاویتاسیون بررسی می‌شود. در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افت فشار میزان کاویتاسیون و شکل‌گیری کسر حجمی بخار روی پروانه افزایش می‌یابد، که این موضوع به خوبی در فشار ۶۰ کیلوپاسکال و به شکل هاله‌ای در اطراف لبه پایینی به خوبی مشاهده می‌شود. هرچه میزان افت فشار بیشتر می‌شود، میزان کاویتاسیون به خصوص روی لبه پایینی نیز بیشتر می‌شود و در نهایت اطراف پروانه را احاطه می‌کند. این موضوع در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸ مراحل شروع و توسعه کاویتاسیون با افت فشار در محدوده ۶۰ تا ۹۰ کیلوپاسکال و J برابر با ۰/۱

نتایج مربوط به سطح فشار صوت در آزمایش نوفه در تونل کاویتاسیون نیز در شکل‌های ۹ تا ۱۲ مشاهده می‌شود. نمودارهای ارائه شده در این شکل‌ها، سطح فشار صوت برحسب دسی‌بل را در شرایط مرجع؛ یعنی فشار یک میکروپاسکال، فرکانس یک هرتز و فاصله ۱ متری برحسب فرکانس نشان می‌دهند. مقایسه نتایج سطح فشار صوت در دو هیدروفون در هر یک از این نمودارها مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، سطح فشار صوت به‌طور متوسط در فرکانس‌های مرکزی با افزایش دور افزایش می‌یابد و همچنین مقادیر آنها در هیدروفون ۱ بیشتر از هیدروفون ۲ می‌باشد. البته در بخش عددی که امکان به‌کارگیری هیدروفون‌های بیشتری وجود

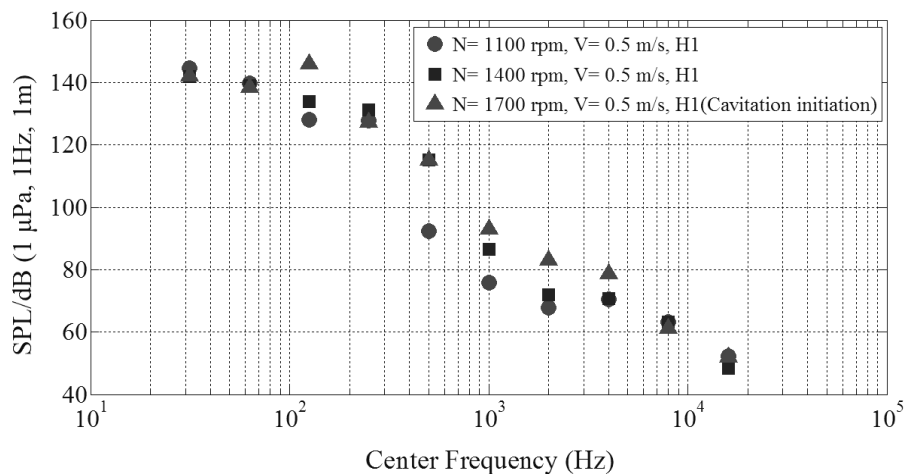
دارد، مشاهده می‌شود که سطح کلی فشار صوت در فاصله یکسان از هاب پروانه در جلوی هاب بیشتر از صفحه چرخش پروانه می‌باشد [۷-۸]. اگر از خط‌های موجود در تونل کاویتاسیون صرف‌نظر شود، با مشاهده شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز مشاهده می‌شود که به‌طور متوسط با افت فشار سطح فشار صوت در بیشتر فرکانس‌های مرکزی افزایش می‌یابد، که البته دلیل آن توسعه کاویتاسیون بر اثر نوسانات بیشتر فشار در تونل کاویتاسیون می‌باشد.

۵. جمع‌بندی

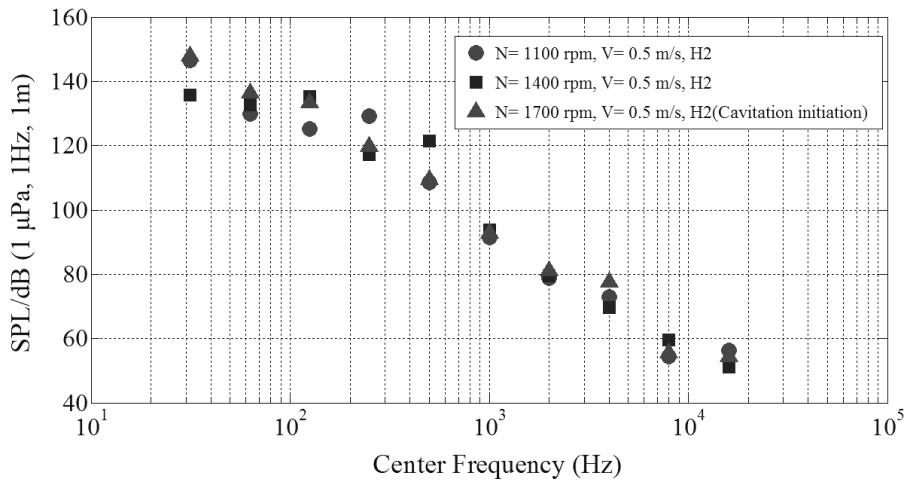
یکی از مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری نوفه پروانه‌های دریایی استفاده از شیوه‌های تجربی در حوضچه‌های

آکوستیکی^{۲۶} به شکل میدان آزاد و یا استفاده از تونل کاویتاسیون است. چون ساخت پروانه‌های واقعی و انجام آزمایش آن در میدان آزاد بسیار پرهزینه است، بنابراین سال‌هاست که اندازه‌گیری نوفه پروانه‌های دریایی در تونل کاویتاسیون دنبال می‌شود. مطالعات آماری موجود پیش از این پژوهش روی انواع تونل کاویتاسیون‌های موجود در سطح دنیا صورت گرفته است که با رعایت استانداردهای موجود اندازه‌گیری نوفه پروانه در تونل کاویتاسیون مانند قرارگیری و استقرار هیدروفون‌ها در عمق مشخص، فاصله معین از پروانه و جز این‌ها، تست‌ها در این پژوهش صورت پذیرفته است. از جمله مهم‌ترین مسائل موجود نحوه تعمیم نتایج به‌دست آمده در تونل کاویتاسیون به نتایج مدل واقعی در آب‌های آزاد است که این موضوع به‌خوبی توسط روابط بی‌بعد شده و ارتباط مدل با نمونه اصلی در گزارشات کمیته بین‌المللی تست پروانه در تونل کاویتاسیون و مخزن آب ارائه شده است [۱۴-۱۹]. هدف از نگارش این مقاله، اندازه‌گیری نوفه پروانه دریایی مستغرق در تونل کاویتاسیون است؛ کاری که برای نخستین بار در ایران انجام شده است. با رعایت استانداردهای موجود در اندازه‌گیری نوفه پروانه در تونل کاویتاسیون براساس کمیته بین‌المللی

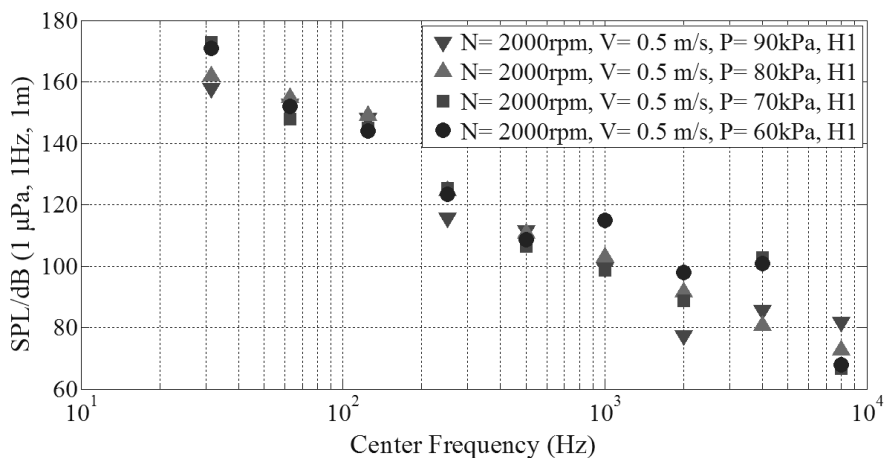
تست پروانه در تونل کاویتاسیون و مخزن آب نتایج مطلوبی به‌دست آمده است. پارامترهای اساسی در اندازه‌گیری نوفه کاویتاسیونی مورد بررسی قرار گرفته و شرایط رسیدن به شروع و توسعه کاویتاسیون با افزایش دور و کاهش فشار در تونل کاویتاسیون دنبال شده است. نحوه شکل‌گیری و توسعه کاویتاسیون به‌خوبی در نتایج قابل مشاهده است. از نتایج موجود در این مقاله می‌توان با استفاده از روابط مقیاس بی‌بعد شده برای نمونه اصلی این پروانه در آب‌های آزاد بهره گرفت. یکی از مسائل موجود در اندازه‌گیری نوفه در تونل کاویتاسیون حذف آثار انعکاس دیواره در تونل است. برای حل این موضوع دو راهکار پیشنهاد می‌شود: راهکار نخست استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی بر مبنای معادلات $FW-H$ می‌باشد که توسط نویسندگان در تحقیقات پیشین صورت گرفته است [۷، ۸، ۲۰ و ۲۱]. چون این معادلات انعکاس محیط را لحاظ نمی‌کنند، می‌توان از نتایج آن به‌عنوان نتایج میدان آزاد استفاده و با مقایسه با نتایج حاصل در تونل کاویتاسیون ضریب انعکاس از دیواره را استخراج کرد. راهکار دوم اندازه‌گیری نوفه این مدل پروانه در شرایط آب‌های آزاد است که همان‌گونه که اشاره شد ممکن است هزینه‌بر باشد.



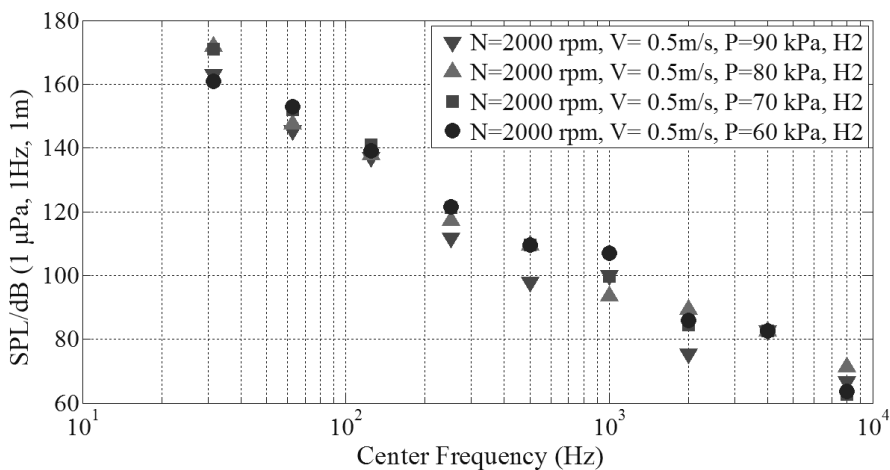
شکل ۹. سطح فشار صوت در سه دور مختلف و فشار ثابت ۹۰ کیلوپاسکال در هیدروفون ۱



شکل ۱۰. سطح فشار صوت در سه دور مختلف و فشار ثابت ۹۰ کیلوپاسکال در هیدروفون ۲



شکل ۱۱. سطح فشار صوت در J برابر با ۰/۱ و در چهار فشار گوناگون برای هیدروفون ۱



شکل ۱۲. سطح فشار صوت در J برابر با ۰/۱ و در چهار فشار گوناگون برای هیدروفون ۲

جدول ۱. مشخصات تونل کاویتاسیون دانشگاه صنعتی شریف

Cussons K23/ H29 Propeller Dynamometer		مدل تونل کاویتاسیون و دینامومتر
۳۲۰۰	طول (میلی‌متر)	ابعاد مقطع اندازه‌گیری مستطیلی
۶۳۰	عرض (میلی‌متر)	
۳۵۰	عمق (میلی‌متر)	
۳۰۰		ماکزیمم قطر مدل پروانه (میلی‌متر)
۳/۶		ماکزیمم سرعت آب در مقطع اندازه‌گیری (متر بر ثانیه)

جدول ۳. مختصه قرارگیری هیدروفون‌ها در تونل کاویتاسیون

نام	محور x ها (متر)	محور y ها (متر)	محور z ها (متر)
هیدروفون ۱	صفر	صفر	۰/۲۲۵
هیدروفون ۲	۰/۵	صفر	۰/۲۲۵

جدول ۴. فرکانس مرکزی و پهنة باند برای هر فرکانس مرکزی در پهنة یک‌سوم اکتاو

شماره باند	فرکانس مرکزی (هرتز)	باند پایین فرکانسی (هرتز)	باند بالای فرکانسی (هرتز)	پهنای باند (هرتز)
۱	۳۳/۵	۲۵	۴۰	۱۵
۲	۶۳	۵۰	۸۰	۳۰
۳	۱۲۵	۱۰۰	۱۶۰	۶۰
۴	۲۵۰	۲۰۰	۳۱۵	۱۱۵
۵	۵۰۰	۴۰۰	۶۳۰	۲۳۰
۶	۱۰۰۰	۸۰۰	۱۲۵۰	۴۵۰
۷	۲۰۰۰	۱۶۰۰	۲۵۰۰	۹۰۰
۸	۴۰۰۰	۳۱۵۰	۵۰۰۰	۱۸۵۰
۹	۸۰۰۰	۶۳۰۰	۱۰۰۰۰	۳۷۰۰
۱۰	۱۶۰۰۰	۱۲۵۰۰	۲۰۰۰۰	۷۵۰۰

۶. مآخذ

- [1] Ross, D. *Mechanics of underwater noise*, Peninsula Publishing, CA: Los Altos, 1987.
- [2] Carlton, J.S. "Marine Propellers and Propulsion", Butterworth-Heinemann, London. 1994
- [3] Malcolm J. Crocker. *Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley and Sons Inc., 1997.
- [4] Hanshin Seol, Jung-Chun Suh, Soogab Lee, "Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise", *Journal of Sound and Vibration* 288 (2005): 345–360.
- [5] Sharma, S.D., K. Mani, V.H. Arakeri. "Cavitation Noise Studies on marine propellers." *Journal of Sound and Vibration* (1990) 138(2), 255-283.

- [6] Jin-ming, YE, Xiong Ying, LI Fang, Wang zhan-zhi, "Numerical prediction of blade frequency noise of cavitating propeller." *Journal of Hydrodynamics* 2012, 24(3):371-377
- [7] Bagheri M.R., M.S. Seif, H. Mahdigholi. "Numerical Simulation of underwater propeller noise." *International Conference on Marine Technology Kuala Terengganu, Malaysia, 20-22October 2012.*
- [8] Bagheri, M.R., M.S. Seif, H. Mahdigholi. "Numerical simulation of underwater propeller non-cavitating noise by FVM method." *2nd International conference on Vibration and Acoustic, Iranian Society of Acoustics and Vibration (ISAV), 2012.*
- [9] Park, Cheolsoo, Hanshin Seol, Kwangsoo Kim, Woojae Seong "A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel." *Ocean Engineering* 36 (2009) 754–762.
- [10] Wang, D., M. Atlar, R. Sampson. "An experimental investigation on cavitation, noise, and slipstream characteristics of ocean stream turbines." *J. Power and Energy.*
- [11] Korkut, Emin, Mehmet Atlar. "An experimental investigation of the effect of foul release coating application on performance, noise and cavitation characteristics of marine propellers." *Ocean Engineering* 41 (2012): 1–12.
- [12] Hansen, Colin. *Fundamentals of acoustics*
- [13] MATLAB R2012a Software.
- [14] Levkovskii, Y.L. "Modelling of Cavitation Noise." *Soviet Physics Acoustics*, 1968, Vol. 13, No. 3, pp. 337-339.
- [15] ITTC, "Cavitation Committee Report." *18th International Towing Tank Conference, Kobe, Japan, 1987.*
- [16] Lovik, A. "Scaling of Propeller Cavitation Noise." *Noise Sources in Ships: Propellers, Nordforsk, Sweden, 1981.*
- [17] Sasajima, T., H. Tanibayashi. "Contribution to Cavitation Committee." *Proceedings of 17th International Towing Tank Conference, Goteborg, Sweden, 1984.*
- [18] ITTC, "Cavitation Committee Report." *15th International Towing Tank Conference, The Hague, the Netherlands, 1978.*
- [19] ITTC, "Cavitation Committee Report." *19th International Towing Tank Conference, Madrid, Spain, 1990.*
- [20] Bagheri, M.R., H. Mehdigholi, M.S. Seif. "An analysis of hydrodynamics and noise behaviour for submerged propeller in various conditions by experimental and numerical methods." *Scientific Research Monthly Journal Modares Mechanical Engineering*, Accepted 21 Jan, 2014.
- [21] Bagheri, M.R., M.S. Seif, H. Mehdigholi. "Numerical Simulation of underwater propeller noise." *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-Science and Engineering*, 2014, Vol.4, pp. 1-6.

پی نوشت

1. noise
2. cavitation tunnel
3. MATLAB[®]

4. International Towing Tank Conference (ITTC),
<http://itcc.sname.org> (accessed October 1, 2014)
5. cavity collapse

-
6. non-cavitating
 7. cavitating
 8. monopole noise
 9. thickness noise
 10. dipole noise
 11. loading noise
 12. bubble cavitation
 13. sheet cavitation
 14. cloud cavitation
 15. hub tip
 16. hub vortex
 17. Finite Volume Method

۱۸. قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده

مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

<http://www.mech.sharif.ir/web/26983/1>

(accessed October 1, 2014)

19. water tank test committee
20. B&K 8103
21. Bruel & Kjaer
22. transducer
23. data acquisition
24. dynamometer
25. FFT
26. acoustic tank