

## تحلیل طیف فرکانسی نویز پروانه‌های مغروق در تونل کاویتاسیون

محمد کاظمی راد<sup>۱</sup>، داوود غرویان<sup>۲</sup>، رحیم مالمیر<sup>۳</sup>

m.kazemi935@gmail.com

۱- کارشناس ارشد مخابرات سیستم، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

۳- کارشناس ارشد معماری کشتی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

### چکیده

انتشار نویز ناشی از پروانه برای شناورهای سطحی و یخ‌خصوص زیر سطحی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این پدیده هم برای کشتی‌های تجاری و هم برای کشتی‌های نظامی غیر مطلوب می‌باشد. منابع تولید نویز، در حالت کلی برای شناورهای دریایی، به سه دسته نویز بدنه هیدرودینامیکی، نویز ماشین آلات و نویز ناشی از پروانه تقسیم‌بندی می‌شود. نویز پروانه از تاثیر بیشتری برخوردار است. در حالت کاویتاسیون و غیرکاویتاسیون این نویز متفاوت می‌باشد. در این مقاله، پروانه مدل B، در تونل کاویتاسیون در سرعت‌های مختلف (۲۰۰ الی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) و فشار ثابت، به چرخش در آمده و نویز پروانه بدون حالت کاویتاسیون و با حالت کاویتاسیون، توسط هیدروفن ۸۱۰۳ یا حساسیت بالا در کامپیوتر ذخیره و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، افزایش دور پروانه و وجود جریان آب در تونل، باعث افزایش شدت دامنه نویز پروانه می‌گردد. همچنین پاند فرکانسی موثر نویز پروانه در محدوده پاند صوتی است که در سامانه‌های آکوستیکی یک نویز قوی و با شدت بالا محسوب می‌گردد. متوسط شدت فشار نویز پروانه در پاند ۱۵ اکتاو ۷۲ دسی بل و در پاند ۱۸ اکتاو برابر ۷۵ دسی بل است. در دوره‌های کاویتاسیون متوسط شدت فشار نویز در پاند ۱۵ اکتاو ۷۰ و در پاند ۱۸ اکتاو برابر ۷۶ دسیبل است.

واژگان کلیدی: پروانه، نویز، کاویتاسیون، هیدروفن.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۷/۰۹

## ۱- مقدمه

در طراحی شناورها، نویز باعث ایجاد محدودیت‌های نسبتاً مختلفی می‌گردد که این محدودیت‌ها در دو حوزه مورد بحث قرار می‌گیرند، نخست تاثیر نویز بر روی سنسورها و سامانه‌های سلاح‌های خودی و دوم تاثیر این نویز در اطراف کشتی است که یکی از عوامل شناسایی توسط سامانه‌های شناسایی دشمن است و به واسطه آن دشمن قادر خواهد بود که کشتی را ردیابی نماید.

شناسایی کشتی توسط سامانه‌های دشمن، بستگی به حساسیت سامانه‌های گیرنده دشمن متفاوت می‌باشد. هر چند که با دریافت نویز آکوستیکی به سختی می‌توان نوع کشتی و یا کلاس آن را تشخیص داد. به هر حال شناسایی و کشف شناور، به منظور جمع آوری اطلاعات، از نقطه نظر نظامی دارای اهمیت بسزایی دارد. اما چنانچه در مورد مشخصات دریافتی، به اندازه کافی اطلاعات داشته باشیم، تشخیص هویت کشتی امکان‌پذیر خواهد بود. این اطلاعات می‌تواند پهنای باند، شدت توان صوتی نویزهای انتشاری و محدوده اثر (باند موثر) هر نویز یا به عبارت دیگر هر سامانه متحرک دریایی باشد. هدف نهایی طراح یک شناور نظامی، بایستی به صفرسازدن اثرات نویزی آن شناور تا حد نویز پس‌زمینه دریا باشد. نویز پس‌زمینه توسط حباب‌های معلق در آب، حیوانات دریایی، برخورد امواج به سواحل و صخره‌ها و همچنین حرکت سایر کشتی‌ها در یک گستره جغرافیایی از دریا به وجود می‌آید [۱].

نویزهایی که توسط اجزاء مختلف کشتی و زیردریایی تولید می‌شوند را به دو دسته کلی زیر تقسیم بندی می‌کنند:

۱. نویز خودی<sup>۱</sup>: منبع آن تجهیزات داخلی شناور است و تاثیر آن بر روی کارکنان و تجهیزات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. نویز انتشاری<sup>۲</sup>: نویز انتشاری خارج شناور بررسی قرار می‌گیرد. این نویز عامل ردیابی و شناسایی شناور می‌باشد. در طبقه‌بندی کلی، نویزهای انتشاری را به چهار دسته زیر دسته‌بندی می‌نمایند [۱].

- نویز ناشی از کارکرد ماشین آلاتی که مستقیماً به بدنه شناور متصل هستند.

- نویز ناشی از ضربه فشارپروانه که در اثر نوسانات نیروی تراست ایجاد می‌گردد.

- نویز پروانه در حالت کاویتاسیون که در اثر تشکیل حباب در پشت پره‌های پروانه شناور ایجاد می‌شود.

- نویز هیدرودینامیکی که در اثر عبور جریان سیال از روی بدنه شناور و سازه‌های خارجی آن بوجود می‌آید.

جهت بررسی نویز شناور، آن را در موقعیت سطح نویز پس‌زمینه آب عمیق، که از گیرنده‌های همه‌جهته تعیین شده‌اند، مطابق شکل (۱) قرار می‌گیرد. با توجه به شکل، نویز ناشی از اغتشاش اقیانوسی و نویز زلزله‌ای در فرکانس‌های زیر ۲۰ Hz، نویز حمل‌ونقل دریایی و زیست محیطی در بازه فرکانس ۲۰ Hz تا ۲۰۰ Hz، آشفستگی سطح آب، در فرکانس‌های بین ۵۰۰ Hz تا ۲۰ KHz، بزرگترین منبع نویز می‌باشد. در فرکانس‌های بالای ۵۰ KHz در جایی که سطح طیف نویز تا حدود  $\delta dB/octave$  افزایش می‌یابد، آشفستگی گرمایی مولکول‌های آب، یک منبع نویز قابل توجه می‌باشد. در مورد آب کم عمق سطوح نویز می‌توانند بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر باشند [۱].

بطور کلی، در اثر طنین‌های سطحی و حجمی، نویز فرکانس‌های بالا با افزایش فاصله از منبع، تشدید می‌شوند، از طرفی فرکانس‌های پائین مسافت زیادی طی نموده و از نقطه نظر نویز انتشاری شناور، از اهمیت بیشتری برخوردارند. شکل (۲) میزان نوسانات را متناسب با ضریب جذب بر حسب dB در هر ۱۰۰۰ متر در بازه فرکانسی بین  $10^2$  و  $10^7$  هرتز، نشان می‌دهد [۱]. برای تخمین سطح فشار صوت<sup>۳</sup> (Lp)، داریم:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) dB \quad (1)$$

که در آن P فشار محاسبه شده در یک نقطه از محل مورد بررسی و  $P_0$  فشار منبع می‌باشد که ۲۰ میکرو پاسکال در هوا و ۱ میکرو پاسکال در سایر محیط‌ها تعیین شده است. در محاسبات صوتی، از فیلترهای اکتاو برای مطالعه طیف‌های نویز استفاده می‌شود. مطابق جدول (۱) در باند اکتاو، فرکانس مرکزی باند بالایی دو برابر فرکانس مرکزی باند پایینی است. همچنین در باند یک دوم اکتاو، فرکانس مرکزی باند بالایی مجذور فرکانس مرکزی باند پایینی و

<sup>1</sup> Self-Noise

<sup>2</sup> Radiated Noise

<sup>3</sup> Pressure Level

|           |           |     |    |
|-----------|-----------|-----|----|
| ۴۴/۷-۸۹/۱ | ۵۶/۲-۷۰/۸ | ۶۳  | ۱۸ |
|           | ۷۰/۸-۸۹/۱ | ۸۰  | ۱۹ |
|           | ۸۹/۱-۱۱۲  | ۱۰۰ | ۲۰ |

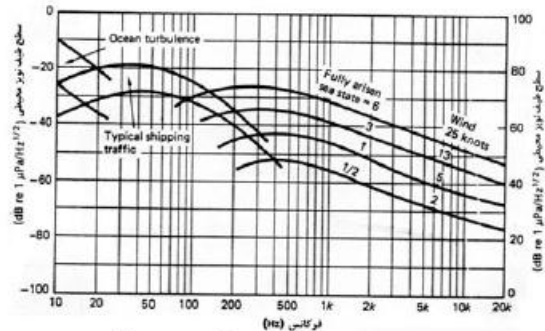
در شکل (۳) نویز انواع کشتی‌ها، به ترتیب از تانکرهای بزرگ تا قایق‌های مدل Rhine push، نمایش داده شده است. سطوح ۱۱۰-۱۰۰ دسیبل، در باندهای فرکانسی پایین، مربوط به موقعیت‌های نزدیک به پروانه، (مخازن پاشته) است [۱].

در این مقاله پس از تعریف پارامترهای موثر در طراحی پروانه از قبیل هندسه پروانه، نویزهای پروانه در حالت‌های بدون کاویتاسیون و با کاویتاسیون، اثرات کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته تا اهمیت موضوع روشن‌تر گردد. سپس با تعریف روابط ریاضی مربوطه، چند نمونه از کارهای انجام شده در این خصوص بیان شده و سپس روش تحقیق به صورت مفصل و گام به گام بیان شده است. در انتها با مقایسه نویز در دوره‌های مختلف و داده‌های فیلتر شده، نتایجی ارائه شده که بیان‌گر تحلیل طیفی فرکانسی نویز مورد نظر و تاثیر آن در شناسایی شناورها است.

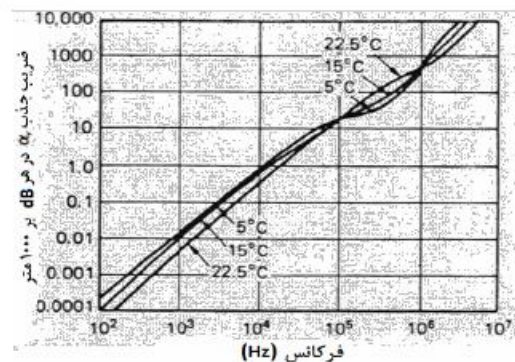
## ۲- خصوصیات هندسی پروانه

سامانه انتقال نیروی شناور، نیرو را از موتور به پروانه منتقل می‌نماید که متشکل از شافت‌ها، یاتاقان‌ها و نهایتاً خود پروانه است. فشار محوری پروانه از طریق سامانه انتقال نیرو به شناور وارد می‌گردد. خط عمود بر محور شفت، در پروانه‌های گام متغیر محور اسپیندل<sup>۱</sup> معادل با خط اصلی بکار می‌رود. مقطع ایرفویل، که پره پروانه را نیز شامل می‌شود در سطحی از استوانه هم‌مرکز با محور شافت، تعریف می‌شود [۵].

در باند یک سوم اکتاو، فرکانس مرکزی باند بالایی ۱/۲۵۹۹ برابر فرکانس مرکزی باند پایینی است [۱].



شکل (۱) نویز پس‌زمینه در آب عمیق [۱].



شکل (۲) جذب صوت در آب دریا [۱].

جدول (۱) فرکانس مرکزی و پهنای باند اکتاو و یک‌سوم اکتاو [۱].

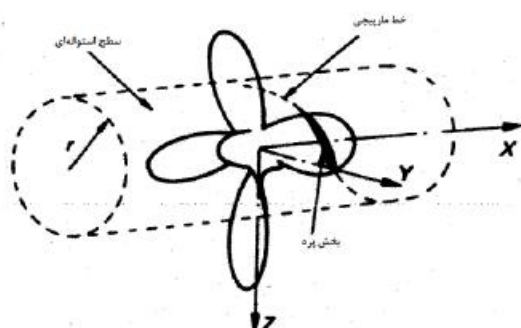
| شماره باند | فرکانس مرکزی | پهنای باند یک سوم اکتاو | پهنای باند اکتاو |
|------------|--------------|-------------------------|------------------|
| ۱          | ۱/۲۵         | ۱/۴۱-۱/۱۲               |                  |
| ۲          | ۱/۶          | ۱/۷۸-۱/۴۱               |                  |
| ۳          | ۲            | ۲/۲۴-۱/۷۸               | ۱/۴۱-۲/۸۲        |
| ۴          | ۲/۵          | ۲/۲۴-۲/۸۲               |                  |
| ۵          | ۳/۱۵         | ۲/۸۲-۳/۵۵               |                  |
| ۶          | ۴            | ۳/۵۵-۴/۴۷               | ۲/۸۲-۵/۶۲        |
| ۷          | ۵            | ۴/۴۷-۵/۶۲               |                  |
| ۸          | ۶/۳          | ۵/۶۲-۷/۰۸               |                  |
| ۹          | ۸            | ۷/۰۸-۸/۹۱               | ۵/۶۲-۱۱/۲        |
| ۱۰         | ۱۰           | ۸/۹۱-۱۱/۲               |                  |
| ۱۱         | ۱۲/۵         | ۱۱/۲-۱۴/۱               |                  |
| ۱۲         | ۱۶           | ۱۴/۱-۱۷/۸               | ۱۱/۲-۲۲/۴        |
| ۱۳         | ۲۰           | ۱۷/۸-۲۲/۴               |                  |
| ۱۴         | ۲۵           | ۲۲/۴-۲۸/۲               |                  |
| ۱۵         | ۳۱/۵         | ۲۸/۲-۳۵/۵               | ۲۲/۴-۴۴/۷        |
| ۱۶         | ۴۰           | ۳۵/۵-۴۴/۷               |                  |
| ۱۷         | ۵۰           | ۴۴/۷-۵۶/۲               |                  |

<sup>1</sup> Spindle

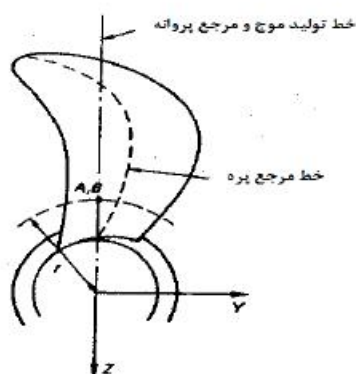
می‌شود. پره‌ی اجیوال دارای سطح تخت بوده و پشت آن بصورت گرد می‌باشد. در این مدل پره‌ها، لبه‌های جلویی و عقبی را تا حدی که ممکن است تیز می‌سازند. فاصله‌ی بین صفحات بالایی و پایینی مقطع پره وقتی که عمود بر خط کورد اندازه‌گیری می‌شود ضخامت مقطع نام دارد. در شکل (۵) خطوط مرجع پروانه<sup>۷</sup> را می‌توان مشاهده نمود.

### ۳- ماهیت نویز پروانه

صداها تولیدی در شناورهای سطحی و زیرسطحی همان نویز صوتی شناورهاست که در این مقاله مدنظر است [۶]. دلایل اهمیت کاهش نویز عبارتند از:



شکل (۴) نمایش مفاهیم اصلی پروانه [۵].



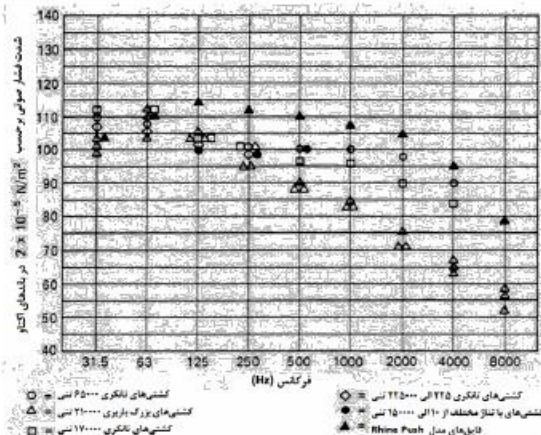
شکل (۵) خطوط مرجع پروانه [۵].

۱- هدف قرار نگرفتن از سوی سلاح‌های دشمن

۲- اختفاء

۳- بهبود وضعیت قابلیت سکونت برای خدمه<sup>۸</sup>

پروانه‌ها یکی از مهمترین متابع تولید نویز می‌باشند. چون اکثر تجهیزات ردیاب از سیستم‌های صوتی استفاده می‌کنند، لذا بایستی در طراحی پروانه هر شناور دریایی،



شکل (۳) سطح فشار صوت کشتی‌های مختلف در باند اکتاو [۱].

با توجه به شکل (۴)، در خط دید پاشنه‌ی کشتی به سمت سینه، سطح دیده شده‌ی پروانه، وجه فشاری (رخ پروانه) و سطحی که از سمت بدنه مشاهده می‌شود، پشت پروانه (قسمت مکش) نامیده می‌شود. مقدار پیشروی پروانه به ازای یک دور چرخش را گام هندسی و پیشرفت محوری پروانه به ازای یک دور چرخش را گام واقعی می‌نامند که به لزجت سیال بستگی دارد. زاویه‌ی بین خط کورد میانی<sup>۱</sup> و خط هادی، زاویه‌ی اسکیو<sup>۲</sup> نام دارد. زاویه‌ی اسکیو بزرگترین زاویه‌ی اندازه‌گیری شده در مرکز شفت است که می‌تواند از میان خطوط گذرنده از خط مرکزی شفت به مرکز طول کورد در هر مقطع رسم شود. زاویه‌ی اسکیو یکی از پارامترهای مهم طراحی پروانه است و سبب می‌شود که جریان ورودی به پروانه بصورت تدریجی بوده و بار ناگهانی روی پره وارد نشود و از پدیده‌ی کاویتاسیون<sup>۳</sup> جلوگیری می‌کند. تغییر مکان یا جابجایی از سطح پروانه تا خط مولد در امتداد محور شفت، ریک<sup>۴</sup> نام دارد. زاویه‌ی ریک در شناورها، سبب ایجاد فضای بیشتر در قسمت بالایی پروانه می‌شود. تغییرات زاویه‌ی ریک در محدوده ۰ تا ۱۵ درجه است.

برای پروانه‌ها از دو مقطع اصلی، مقطع ایرفویلی<sup>۵</sup> و مقطع اجیوال<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. مقطع ایرفویل، مشابه مقطع بال هواپیما است و لبه‌ی حمله‌ی این مدل بصورت گرد ساخته

<sup>۱</sup> Mid-Chord

<sup>۲</sup> Skew

<sup>۳</sup> Cavitation

<sup>۴</sup> Rake

<sup>۵</sup> Airfoil section

<sup>۶</sup> Ogival section

<sup>۷</sup> Propeller Reference Lines

<sup>۸</sup> Habitability

می‌گیرد، بسیار پیچیده است. چون ارتعاش خمشی و ارتعاش پیچشی پیش می‌آید. در بررسی ارتعاش شافت بایستی نامیزانی در مرکز ثقل و مرکز دوران، نامیزانی در راستای ضربه با محور شافت، وزن شافت و پروانه و ... به دقت مورد مطالعه قرار گیرند. چون پروانه در حالت غوطه‌ور تحت تأثیر سه نیروی خطی و سه گشتاور دورانی کار می‌کند که از بین آنها نیروی تراست و گشتاور در راستای شفت بسیار مهم است و باید تأثیر آن در تولید نویز بررسی شود. در این راستا انجام فعالیت‌های زیر ضروری است:

۱- آنالیز ارتعاش پره پروانه و تحلیل آن در اثر نیروهای وارده.

۲- بررسی ارتعاش شفت و پروانه و تأثیر شفت در نویز.

#### ۴- کاونتاسیون

کاونتاسیون پدیده‌ای است که مکانیزم آن شامل سه بخش است:

۱- کیفیت آب (شامل هسته اصلی و ابعاد آن)

۲- رشد لایه مرزی روی مقطع تیغه

۳- نوع کاونتاسیونی که باید توسعه یابد.

در پشت پره‌های پروانه، به دلیل شکل انحنا پره‌ها، سرعت نسبی افزایش می‌یابد. بنابراین در بخش قابل توجهی از آن، فشار متغی بوجود می‌آید در حالیکه فشار جلوی پروانه مثبت است. نیروی پیشران، متناسب با سطح زیر متحنی فشار است.

#### ۵- عوامل مؤثر در کاونتاسیون و کاهش آن

عمق شناوری: با افزایش آن، احتمال وقوع کاونتاسیون کم می‌شود. هر چه  $h$  زیادتر شود مقدار  $P_0$  افزوده می‌گردد. فشار اتمسفر برابر است با:

$$\rho g h + P_0 = P_a \quad (2)$$

درجه حرارت: در صورت ثابت ماندن عمق شناوری و توزیع جریان، افزایش دما احتمال وقوع کاونتاسیون را زیاد می‌کند.

سرعت جریان اطراف جسم: با افزایش سرعت جریان، مقدار ضریب پیشروی افزایش پیدا می‌کند و امکان وقوع کاونتاسیون زیاد می‌شود. عوامل مؤثر در افزایش سرعت عبارتند از زاویه حمله (هر چه بیشتر باشد به سرعت نسبی سیال افزوده می‌شود) و شکل مقطع هیدروفویل (با افزایش ضخامت یا انحنا مقطع، احتمال وقوع کاونتاسیون به

دقت شود که نویز ایجاد شده کمترین مقدار ممکن باشد. چهار مکانیزم اصلی تولید امواج فشاری توسط یک پروانه در آب عبارتست از:

۱- جابجایی آب به وسیله پروفیل تیغه‌های پروانه.

۲- اختلاف فشار میان سطوح فشاری و مکشی تیغه پروانه.

۳- تغییر پرودیک حجم‌های کاونیتی به وسیله عمل کردن تیغه در فضای موجی پشت شناور.

۴- پروسه انفجار ناگهانی حباب‌ها.

دو دلیل نخست مرتبط با هر دو حالت کاونتاسیونی و غیر کاونتاسیونی پروانه، و دو دلیل دوم پدیده‌های وابسته به کاونتاسیون هستند و بنابراین تنها زمانی رخ می‌دهند که پروانه در حال کاونتاسیون باشد. در مواقعی که اثر نویز یک شناور پیش از شروع کاونتاسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد، تمامی اجزاء به وجود آوردنده نویز از ماشین آلات گرفته تا بدنه و پروانه حائز اهمیت می‌باشند. بعد از شروع کاونتاسیون، عموماً نویز پروانه را به عنوان فاکتور غالب مدنظر است.

عدم بالانس در پروانه، تفاوت بین گام پره‌ها، عیوب پره‌ها در ساخت، خوردگی پره‌ها در حین کارکرد، تغییرات ضخامت پره‌ها، عدم تقارن نیروهای هیدرودینامیکی، وجود میدان فشاری نامتقارن در اطراف بدنه و ... موجب افزایش نویز و ارتعاش می‌شوند. با توجه به توضیحات بالا و اینکه یک پروانه تحت هیچ شرایطی نمی‌تواند بدون نویز باشد، طراحی باید طوری انجام شود که نویز حاصل در پروانه کمینه باشد. می‌توان منابع ایجاد نویز در پروانه را به دو دسته اصلی تقسیم کرد:

۱- نویز ناشی از عوامل هیدرودینامیکی و کاونتاسیون (نویز کاونتاسیونی و غیر کاونتاسیونی)

۲- نویز ناشی از عوامل سازه‌ای (ارتعاش در شفت و پروانه) از آنجا که عوامل هیدرودینامیکی (منبع تولید نویز اول) عمده بحث را تشکیل می‌دهد و نیازمند بسط و گسترش می‌باشد، در ابتدا به توضیح اجمالی عوامل نیروهای سازه‌ای می‌پردازیم.

مهمترین عامل سازه‌ای که در تولید نویز ارتباط مستقیم دارد، سیستم شافت و پروانه است. چون شافت پروانه در حالت دینامیکی و در هر لحظه تحت تأثیر نیروهای محوری، ممان خمشی و ممان پیچشی قرار دارد، ارتعاش در محورهای دوار که تحت تأثیر این نیروها و ممان‌ها قرار

- تست پروانه مدل در تونل آب (تونل کاویتاسیون).
- بررسی نرم‌افزاری کاویتاسیون پره پروانه.
- بررسی خوردگی و ارتعاش پروانه در اثر کاویتاسیون.

#### ۷- آثار فرسایشی کاویتاسیون

یکی از تأثیرات نامطلوب پدیده کاویتاسیون، وقوع فرسایش در پروانه می‌باشد. این پدیده بر روی پروانه‌ها، بالک‌های کنترل، پوشش پروانه و پوشش بدنه در محل مکانیزم تولید نیرو و همچنین پایه‌های نگهدارنده، اثر می‌گذارد. مباحث تئوری و تحقیقات انجام شده اثبات نموده‌اند که میزان فشار در محل پیدایش حباب‌های ناشی از کاویتاسیون تا مقادیر ۱۰-۱۲ هزار اتمسفر نیز می‌رسد. تحت تأثیر فرسایش، جنس پره در محل کاویتاسیون، دچار ساختار اسفنجی می‌گردد. این امر در ابتدا منجر به کاهش کیفیت سطح پره‌ها، افزایش مقاومت پروفیلی، کاهش ضریب تکیه‌گاهی (تراست) و ضریب عملکرد مفید پروانه و در نهایت ضعف استحکام پروانه می‌گردد. بیشترین تخریب‌های فرسایش در مقاطع ریشه‌ای پروانه که در آنها نامطلوب‌ترین شرایط برای حرکت جریان وجود دارد، مشاهده می‌گردند. روش‌های مختلفی برای مقابله با پدیده فرسایش در پروانه‌ها، از قبیل بهیته کردن ابعاد هندسی پره‌ها، استفاده مواد با پایداری بالا در مقابل رسایش و یکسان‌سازی قطب‌های سرعتی عملکرد، وجود دارد.

#### ۸- نویز پروانه بدون حضور کاویتاسیون

در موقعیت بدون کاویتاسیون، پروانه، نویزی مشابه با آنچه که در شکل (۷) نمایش داده شده است تولید می‌نماید. با توجه به شکل، ضربه‌های فرکانسی به همراه یک نویز باند پهن در فرکانس‌های بالا (شامل مؤلفه نویز جریان داخل پروانه، اثرات مختلف لبه از قبیل ایجاد گردابه (ورتکس) و نویز در لبه فرار، وجود دارند [۳]. پروانه دریایی، هنگامی که حاصلضرب عدد موج در شعاع آن کمتر از مقدار واحد باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

علت افزایش تغییرات سرعت، زیاد می‌شود [۱۱]. از آنجایی که تغییرات سرعت از پایه تا نوک پره زیاد است، فاصله  $r=0/YR$  به عنوان مقدار متوسط در نظر گرفته می‌شود.

در شناور، مهم‌ترین بخش عامل کاویتاسیون، پروانه است. از دیدگاه تغییرات جریانی، دو نوع کاویتاسیون روی جسم اتفاق می‌افتد، کاویتاسیون ثابت، حرکتی یا ارتعاشی.

#### ۶- کنترل کاویتاسیون در طراحی پروانه

برای کنترل کاویتاسیون راه‌های زیادی وجود دارد که در دو بخش زیر به آنها اشاره می‌شود:

#### ۶-۱- روابط ریاضی و تئوری:

- باید عدد کاویتاسیون کمتر از ضریب فشار باشد:

$$S_v < |C_p| \quad (3)$$

- رابطه کلر نیز برای کنترل کاویتاسیون بکار می‌رود:

$$\frac{A_p}{A_0} \geq \frac{(1/3 + 0/3Z)T}{(P_0 - P_v)D^3} - K \quad (4)$$

$K$ : ثابتی است که از صفر تا ۰/۲ برای انواع شناورها تغییر می‌کند.  $K$  برای زیردریایی‌ها بین  $0 \leq K \leq 0.1$  است.

#### ۶-۲- عوامل هیدرودینامیکی و سازه‌ای کنترل کاویتاسیون

برای کنترل کاویتاسیون و جلوگیری از ایجاد آن، می‌توان به پارامترهای زیر اشاره کرد [۱۰]:

جریان: باید جریان موجی، یکتواخت گردد.

تعداد پره: با افزایش تعداد پره، کاویتاسیون کاهش می‌یابد.

زاویه اسکیو: کاویتاسیون با افزایش زاویه اسکیو کم می‌شود.

سطح گسترش‌یافته: کاهش نسبت  $A_p/A_0$  موجب کاهش کاویتاسیون می‌شود.

نوع سطح: سطح پره صاف موجب کاهش کاویتاسیون می‌شود.

شرایط باری سنگین: کاویتاسیون زیاد در بار سنگین.

پدیده کاویتاسیون در طراحی پروانه به عنوان یک معیار اساسی است بنابراین در ساخت پروانه فعالیت‌های زیر انجام می‌گیرد:

هیدرودینامیکی اهمیت کمتری نسبت به نویز پروانه و ماشین آلات دارد.

#### ۹- نویز پروانه در اثر وقوع کاویتاسیون

ترکیدن حباب‌های کاویتاسیون باعث ایجاد امواج ضربه‌ای و در نتیجه نویز سفید بابلاند فرکانسی یک مگاهرتزی می‌گردد. بعد از ترکیدن حباب، انرژی صوتی به عنوان نویز منتشر می‌شود. با فرض تصادفی بودن ایجاد حباب‌ها، چگالی توان طیفی حباب‌ها، از تعداد حباب‌ها در واحد زمان و چگالی انرژی طیفی، نیز در اثر ترکیدن یک حباب تنها حاصل می‌شود. انجام آزمایشات روی مدل پره صاف و خشن، نشان می‌دهد که نویز کاویتاسیون، در ابتدا با افزایش تعداد حباب‌ها افزایش یافته و بعد از تشکیل تعداد زیاد حباب، تغییرات نامحسوس می‌شود.

از آنجا که پیش‌بینی نویز کاویتاسیون پروانه به وسیله روش‌های تئوری پیچیده‌تر از پیش‌بینی رفتار نویز غیر کاویتاسیونی پروانه می‌باشد، با ساخت پروانه‌های مدل و آزمایش آنها در تونل کاویتاسیون، طیف نویز حاصل از بار مختلف، برای پروانه مشابه مقایسه می‌گردد.

#### ۱۰- عدد کاویتاسیون

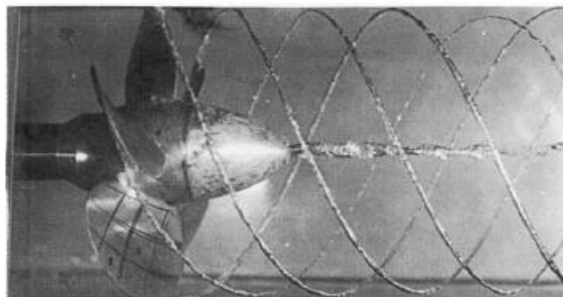
عدد کاویتاسیون  $\sigma$  و ضریب جلوبرندگی  $K_t$  طبق روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌گردد که در این روابط  $P_{atm}$  فشار اتمسفر ( $N/m^2$ )،  $H_{st}$  فشار استاتیکی تونل در مانومتر ( $N/m^2$ )،  $g$  شتاب گرانیگاه ( $m/s^2$ )،  $\rho_{Hg}$  چگالی جرمی تونل در مانومتر ( $Kg/m^3$ )،  $\rho_w$  چگالی جرمی داخل تونل،  $P_v$  فشار بخار اشباع در تونل ( $N/m^2$ )،  $n$  سرعت چرخش پروانه (RPM)،  $D$  قطر پروانه مدل (m) و  $T$  تراست پروانه مدل (N) است [1].

$$\sigma = \frac{P_{atm} + H_{st}g(\rho_{Hg} - \rho_w) - P_v}{\frac{1}{2}\rho_w n^2 D^2} \quad (5)$$

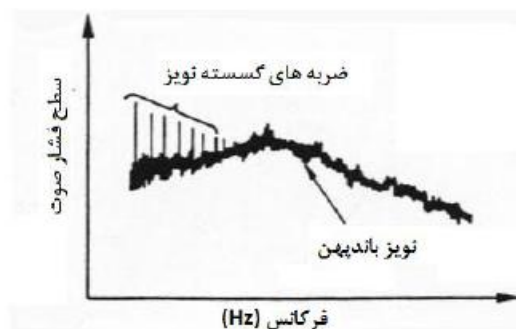
$$k_t = \frac{T}{\rho_w n^2 D^2} \quad (6)$$

معمولاً تاثیر فشار استاتیکی بر عدد کاویتاسیون ناچیز است که در محاسبات تجربی از رابطه ساده شده (۷) استفاده می‌شود.

$$\sigma = \frac{P_{atm} - P_v}{\frac{1}{2}\rho_w n^2 D^2} \quad (7)$$



شکل (۶) کاویتاسیون در پروانه [۱]



شکل (۷) طیف نویز پروانه بدون حضور کاویتاسیون [۱۰].

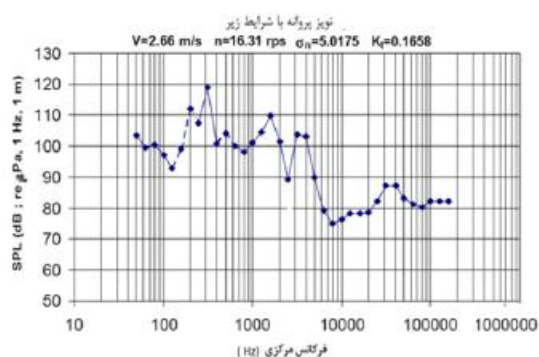
این امر ارزیابی تحلیلی خصوصیات نویز را به نحو قابل ملاحظه‌ای تسهیل می‌نماید. با توجه به نویز ناشی از فرکانس‌های نسبی پروانه، به‌طور نرمال در پشت یک کشتی یا زیردریایی، پروانه در یک میدان موج متغیر دایره‌ای کار می‌کند. در نتیجه جریان موج، تابعی از زمان بوده و لزوماً تابعی از موقعیت تحلیلی دیسک پروانه نمی‌باشد. نقش لزجت آب در لایه مرزی، یک پارامتر قطعی در تخمین سطوح نویز منتشر شده بوده و در حال حاضر موضوع تحقیقات بسیاری می‌باشد. تئوری بهینه‌سازی پروانه‌های دریایی به منظور کاهش سطح نویز در شرایط غیر کاویتاسیون<sup>۱</sup>، نیازمند محاسبه تفصیلی جریان ویسکوز در بالای پره‌های پروانه و یافتن راه حلی کامل در خصوص طیف نویز داده‌های یک موج معمولی است. علاوه بر این، باید اثرات هیدرواستاتیکی و رسوبی‌ای، در ترم‌های نویز غیر کاویتاسیونی نیز بررسی گردند. دو مکانیزم تولید صوت توسط نویز وجود دارد:

۱- انتشار مستقیم نوسانات فشار.

۲- انتشار صوت از سازه‌ها.

نوع اول یک منبع صوت کم دوام بوده و دومی را می‌توان در طراحی سازه‌ای کاهش داد. روی هم رفته نویز

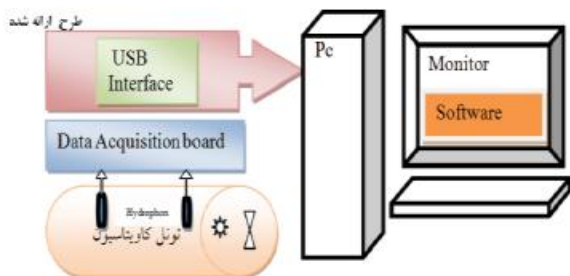
<sup>1</sup> Sub-Cavitation



شکل (۹) فشار نویز پروانه تونل کاویتاسیون انگلستان [۱۵]. ستاریوی تحقیق به صورت شکل (۱۰) است. سرعت پیشروی پروانه در آب‌های آزاد بصورت عددی بدون بعد  $J$  متناسب با سرعت چرخش (RPM)  $N$  و با سرعت چرخش در ثانیه  $n$  (RPS) و قطر پروانه  $D$  (m) و سرعت جریان آب بیان می‌شود [۱۹].

$$J = \frac{V}{nD} \quad (۸)$$

در کلیه آزمایشات فشار اتمسفر 100Kpa و فشار داخل تونل برابر 90Kpa و سرعت جریان آب در داخل تونل 4m/s است. در محاسبه  $\sigma$ ، مقدار  $P_v$  با درجه حرارت آب تغییر خواهد کرد.



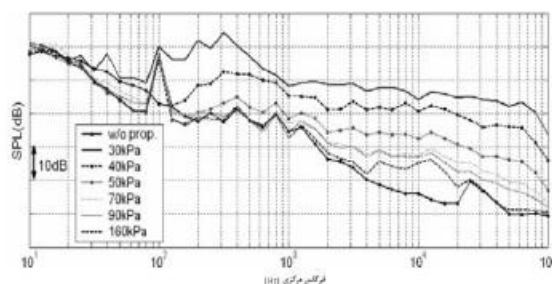
شکل (۱۰) نمایی از ستاریوی پیشنهادی.

عدد کاویتاسیون شرط لازم برای وقوع کاویتاسیون است و شرط کافی آن وجود مقدار کافی حباب‌های بسیار ریز در جریان سیال می‌باشد. در تونل کاویتاسیون مرکز تحقیقات اقیانوسی کره MOERI، برای اندازه‌گیری نویز پروانه از ده عدد هیدروفن آرایه‌ای با فاصله ۵ سانتی‌متری استفاده شده است. فرکانس نویز دریافتی در حدود ۳ الی ۱۵ کیلوهرتز، سرعت جریان آب در در ۳m/s و دور پروانه در 20Rps ثابت و فشار بین ۳۰ الی ۱۶۰ کیلوپاسکال با پله‌های ۱۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است [۱۴].

در تونل کاویتاسیون انگلستان، نویز پروانه در تونل کاویتاسیون با هیدروفن B&K ۸۱۰۳ اندازه‌گیری و در اعداد کاویتاسیون و سرعت جریان‌های مختلف آب داخل تونل مقایسه و مطابق شکل (۹) ترسیم شده است [۱۵].

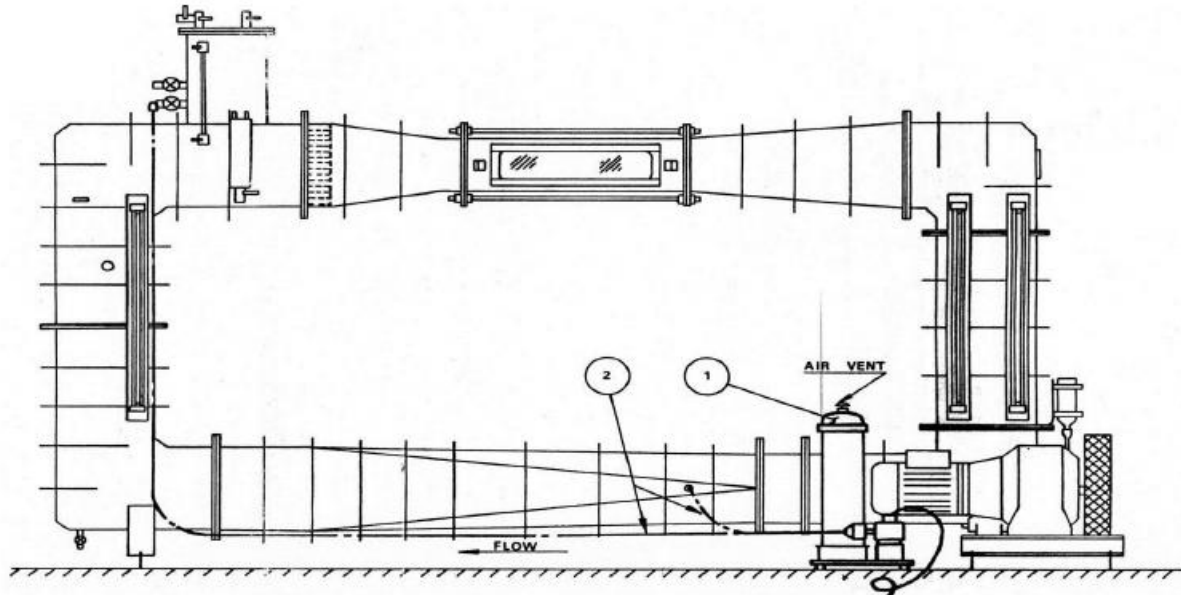
### ۱۱- روش تحقیق و دریافت داده‌ها

در این مقاله، در تونل کاویتاسیون موجود در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ه) نوشهر مطابق شکل (۱۱)، در دورهای مختلف پروانه، نویز آن توسط هیدروفن و برد دیتا در رایانه ذخیره و پس از پردازش‌های مختلف، طیف آن رسم شده است.



شکل (۸) سطح نویز یک سوم اکتاو پشت پروانه با سرعت آب 3m/s بوده و پروانه در حال چرخش [۱۵].

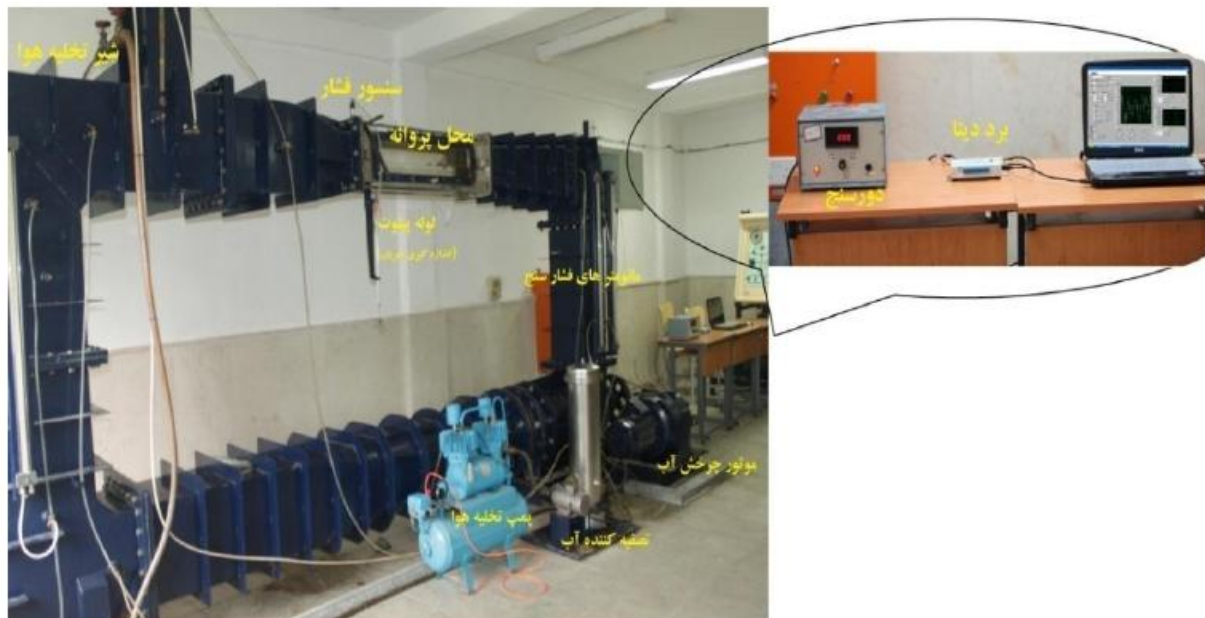




شکل (۱۱) نمایی کلی از تونل گاویتاسیون [۱۰].

جدول (۲) مشخصات تونل گاویتاسیون [۱۹].

| مدل تونل و دینامومتر   | مدل NA10-ساخت انگلستان                     | ابعاد تونل     | ارتفاع ۲۷۵۰-طول ۴۹۰۰ عرض ۱۱۰۰ میلیمتر |
|--|--|----------------|---------------------------------------|
| ابعاد مقطع شیشه ای <td>ارتفاع ۲۰۰- عرض ۲۰۰ و طول ۷۵۰ میلی متر</td> <td>ضریب پیشروی</td> <td>حداقل ۰/۱ الی ۰/۹</td> | ارتفاع ۲۰۰- عرض ۲۰۰ و طول ۷۵۰ میلی متر     | ضریب پیشروی    | حداقل ۰/۱ الی ۰/۹                     |
| سرعت آب در تونل  | ماکزیمم ۴/۸ و حداقل ۰/۶۵ متر بر ثانیه      | عدد گاویتاسیون | ۲ الی ۵                               |
| گشتاور موتور پروانه  | صفر الی ۱۴۰ NM                             | محدوده فشار    | ۵۰ الی ۲۰۰ کیلو پاسکال                |
| سرعت چرخش پروانه   | حداکثر ۲۰۰۰ دور بر دقیقه (۵۰ دور بر ثانیه) | پمپ اصلی       | ۵/۵ کیلووات ۴۴۰ ولت، ۳ فاز، ۵۰ هرتز   |

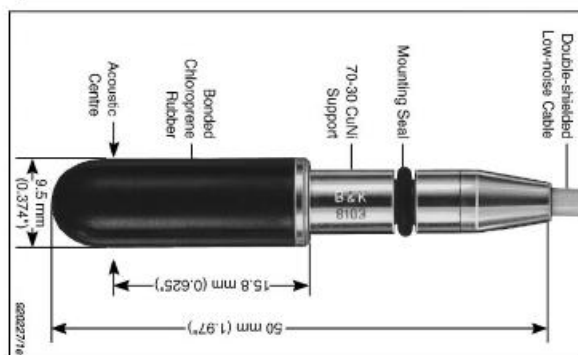


شکل (۱۲) تجهیزات آزمایش موجود در محل تونل گاویتاسیون [۱۹].

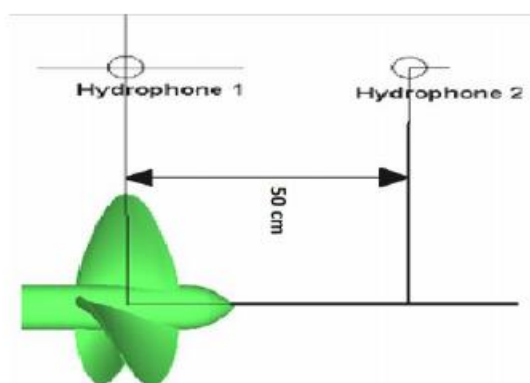
کامپیوترهای شخصی را دارد. قابلیت ارتباط با انواع پروتکل‌های شبکه فیلدباس، انعطاف در تعداد ورودی و خروجی، هزینه مناسب و قابلیت برنامه‌ریزی از مزایای این سیستم می‌باشد.

### ۱۳- برد جمع‌آوری داده

این سیستم با تلفیقی از سخت‌افزار پیشرفته و نرم‌افزار قابل انعطاف در عین نمایش اطلاعات بر روی مونیتورهای محلی، امکان نمایش، ذخیره‌سازی و ویرایش اطلاعات بر روی



شکل (۱۴) نما و ابعاد هیدروفون 8103 K&B



شکل (۱۵) موقعیت نصب هیدروفن‌ها.

#### ۱۵- روش اجرا بدون کابیناسیون

اندازه‌گیری نویز پروانه ۴ مرحله دارد:

- در مرحله اول بعد از آرام شدن جریان آب، نویز هیدروفون توسط نرم افزار متلب دریافت و ذخیره می‌شود. این مرحله نیز یکبار لامپ‌های فلورسنت آزمایشگاه روشن و بار دیگر خاموش شده تا مقایسه‌ای بین نویز محیط داشته باشیم.

- در مرحله دوم، با روشن نمودن موتور رانش پروانه، بدون چرخ پروانه، در چندین مرحله نویز موتور را نیز دریافت شده تا بتوان سطح دسیبل قابل قبولی از این نویزها داشته باشیم.

- در مرحله سوم، پروانه در دورهای مختلف از دور 200 RPM الی 1600 RPM (قبل از ایجاد کابیناسیون) به چرخش درآمده و نویزهای داخل تونل در دورهای مختلف اندازه‌گیری شده است.

- در مرحله چهارم، ابتدا با روشن نمودن پمپ چرخش آب و پمپ تخلیه، حباب‌های درون تونل تخلیه و سپس موتور پروانه فعال و در دورهای صفر الی 1600 RPM (نویز جریان آب) نویزهای هیدروفون ۱ (فاصله ۱۰ سانتی‌متر) توسط برد جمع‌آوری داده و نرم‌افزار متلب در رایانه ذخیره نمودیم.

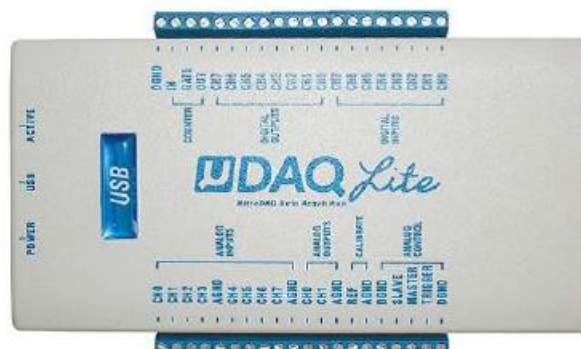
در این تحقیق از برد دیتا اکوزیشن مدل UDAQ\_Lite ساخت شرکت Eagle Technology کشور آفریقای جنوبی شکل (۱۳) استفاده شده است. این برد از طریق پورت USB، به کامپیوتر متصل می‌گردد. با توجه به تنظیمات دستگاه می‌توان کانال‌های آنالوگ را به صورت تک‌<sup>۱</sup> و یا تفاضلی<sup>۲</sup> استفاده نمود [۲۰].

مشخصات کلی این دستگاه عبارتند از:

- ۸ کانال ورودی آنالوگ (۴ کانال در حالت دیفرانسیلی)
  - ۲ کانال خروجی آنالوگ با قابلیت کنترل توان.
  - ۸ ورودی دیجیتال و ۸ خروجی دیجیتال.
  - یک کانال تایمر/کانتر با کلاک خارجی.
  - ۱۲ بیت دقت تفکیک‌پذیری<sup>۳</sup> ورودی و خروجی آنالوگ.
- ۱۴- مشخصات هیدروفون

هیدروفن‌های نصب شده در تونل کابیناسیون مدل 8103K&B، شکل (۱۴)، با مشخصات زیر است:

- اندازه‌گیری نویزهای صوتی در زیر آب.
- اندازه‌گیری‌های نویز کابیناسیون.
- اندازه‌گیری‌های صنعتی در مایعات و گازها.
- اندازه‌گیری صوتی در جوی آلوده و مرطوب.
- کابل سنسور در حدود ۶ متر.
- پاسخ فرکانسی تخت در بازه ۱۸۰-۰/۱ KHz.
- قابلیت کارکرد تا ۴۰ اتمسفر (۱۰۶\*۹/۸ پاسکال).
- حساسیت 211dB- بر حسب  $1V/\mu Pa$  کارکرد.
- یکی از هیدروفن‌ها در کنار پروانه در فاصله ۱۰ سانتی‌متری و دیگری در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از هیدروفن اول مطابق شکل (۱۵) نصب شده است.



شکل (۱۳) تصویر برد دیتا UDAQ\_lite [۲۰].

<sup>1</sup> Single  
<sup>2</sup> Differential  
<sup>3</sup> Resolution

## ۱۶- روش اجرا با کابیناسیون

در مرحله کابیناسیون، ابتدا با روشن نمودن پمپ چرخش آب و پمپ تخلیه، حباب درون تونل را تخلیه، سپس موتور پروانه را فعال و در دورهای صفر (نویز جریان آب) الی 2000RPM، نویز هیدروفن (۱ در فاصله ۱۰ سانتی متری) و هیدروفن ۲ را توسط برد دیتا و نرم افزار متلب در رایانه ذخیره شده است.

در تمامی مراحل داده‌های واقعی بدون تقویت مقادیر، در نرم افزار ذخیره شده تا در مراحل بعدی از این مقادیر استفاده شود. دور، گشتاور و تراست پروانه، در تمامی مراحل توسط دستگاه اندازه‌گیری کالیبره شده تونل کابیناسیون ثبت شده است. در جداول (۴) و (۵) تراست، گشتاور و ضریب پیشروی، در دورهای مختلف ثبت شده است.

جدول (۳) مشخصات پروانه مدل B [۱۹].

| مدل پروانه | P127   | تعداد پره ها    | ۴    |
|------------|--------|-----------------|------|
| قطر پروانه | 83mm   | نسبت سطح دیسک   | ۰/۴۵ |
| گام پروانه | 85/4mm | نسبت سطح برجسته | ۰/۳۷ |

جدول (۴) تراست و گشتاور پروانه در دورهای مختلف (جریان آب صفر).

| سرعت پروانه (RPM) | سرعت پروانه (RPS) | ضریب پیشروی | گشتاور (N/m <sup>2</sup> ) | تراست (N) |
|-------------------|-------------------|-------------|----------------------------|-----------|
| 200               | ۲/۳               | ۰           | ۱۳۳                        | ۲۳۴       |
| ۴۰۰               | ۶/۶۶              | ۰           | ۱۳۰                        | ۲۴۲       |
| 600               | ۱۰                | ۰           | ۱۲۹                        | ۲۴۳       |
| ۸۰۰               | ۱۳/۳۳             | ۰           | 127                        | 244       |

جدول (۵) تراست و گشتاور پروانه دورهای مختلف (جریان آب 4m/s).

| سرعت پروانه (RPM) | سرعت پروانه (RPS) | ضریب پیشروی | گشتاور (N/m <sup>2</sup> ) | تراست (N) |
|-------------------|-------------------|-------------|----------------------------|-----------|
| 200               | ۲/۳               | ۱۴/۶        | 105                        | 271       |
| ۴۰۰               | ۶/۶۶              | ۷/۲         | 107                        | 260       |
| 600               | ۱۰                | ۴/۸         | 107                        | 249       |
| 800               | ۱۳/۳۳             | ۳/۶         | 107                        | 21        |
| 1800              | ۳۰                | ۱/۵۱        | 103                        | 247       |
| 2000              | ۳۳/۳۳             | ۱/۴۴        | 99                         | 230       |

ضریب پیشروی در جدول (۵) به علت وجود سرعت جریان آب 4m/s و قطر پروانه ۸۳ میلی متر بزرگتر از یک می‌باشند.

## ۱۷- ترسیم منحنی‌های نویز پروانه بدون جریان آب و بدون کابیناسیون

با توجه استاندارد مراجع [۱، ۴، ۸، ۱۵] توان برحسب dB به نسبت توان مرجع صوتی آب (1μPa) محاسبه می‌گردد. از طرفی حساسیت هیدروفن برحسب uV/Pa بیان شده است که برای رسیدن به توان نسبی فشار خروجی هیدروفن، مقادیر در ۱۰<sup>-۶</sup> ضرب شده‌اند. شکل (۱۶) منحنی نویز واقعی و نسبی و شکل (۱۷)، تبدیل فوریه و طیف توان نویز بر حسب دسی بل دور 600RPM را نمایش می‌دهد.

## ۱۸- ترسیم منحنی‌های نویز پروانه با جریان آب و بدون کابیناسیون

شکل (۱۸) منحنی نویز واقعی و نسبی و شکل (۱۹) تبدیل فوریه و طیف توان نسبی نویز پروانه را نمایش می‌دهند. مقایسه شکل (۱۷) و (۱۹) نشان می‌دهد که جریان آب داخل تونل، سطح طیف توان نویز پروانه را افزایش می‌دهد.

## ۱۹- ترسیم منحنی نویز پروانه با جریان آب و کابیناسیون

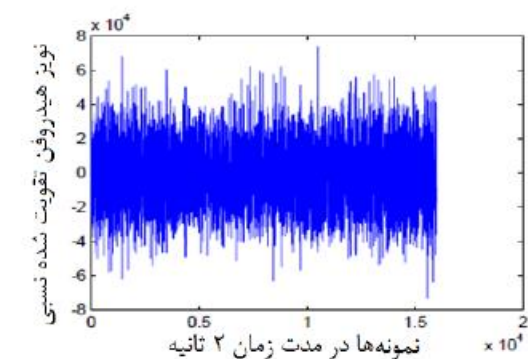
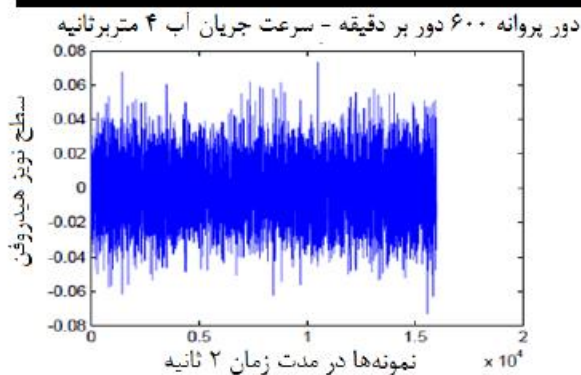
بعد از ایجاد کابیناسیون، همچنان نویزهای ضربه‌ای مشاهده می‌شود. شکل (۲۰) نویز واقعی و طیف توان نویز پروانه در دور ۲۰۰۰ (شروع کابیناسیون) را نمایش می‌دهد.

## ۲۰- ترسیم منحنی‌های نویز پروانه برحسب شدت فشار صوتی (SPL)

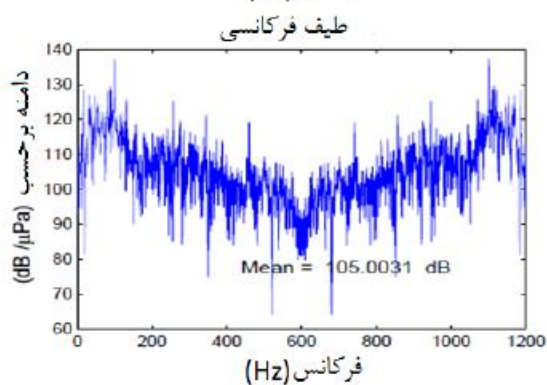
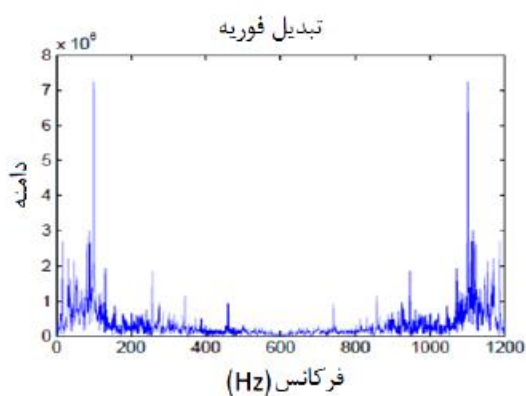
بدین منظور بعد از محاسبه تبدیل فوریه نویزها با استفاده از روابط FFT در مطلب، از رابطه (۹) مقدار سطح فشار صوتی پروانه را محاسبه نموده ایم.

$$SPL1 = SPLm - 10 \log \Delta f \quad (9)$$

در رابطه فوق سطح SPLm مقدار فشار صوتی در فرکانس m و Δf بازه فرکانسی m تا فرکانس یک هرتز می‌باشد. در ادامه با توجه به اینکه هیدروفن در فاصله ۱۰ سانتی متری پروانه قرار دارد باید نسبت به فاصله واحد (1m)، طبق رابطه (۱۰) نرمال گردد.



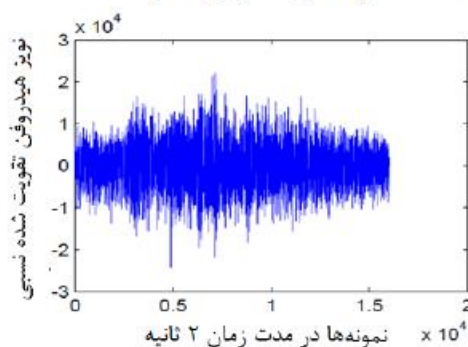
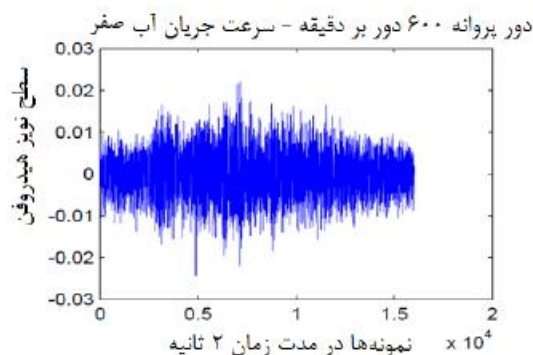
شکل (۱۸) سطح نویز واقعی و نسبی (برحسب میکرو پاسکال) پروانه دور 600RPM و جریان آب 4m/s



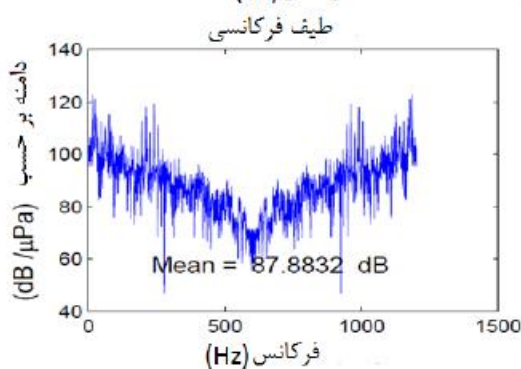
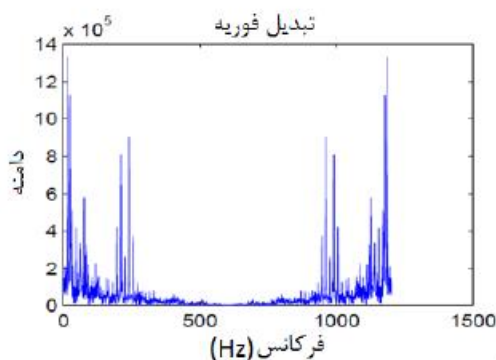
شکل (۱۹) تبدیل فوریه و طیف توان نویز  $L_p$  دور 600RPM و جریان آب 4m/s

$$SPL = SPL1 + 20 \log(r) \quad (۱۰)$$

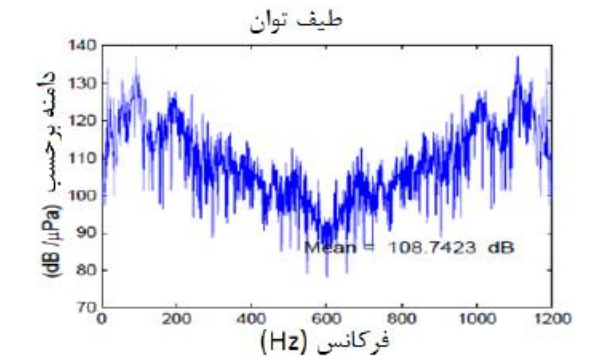
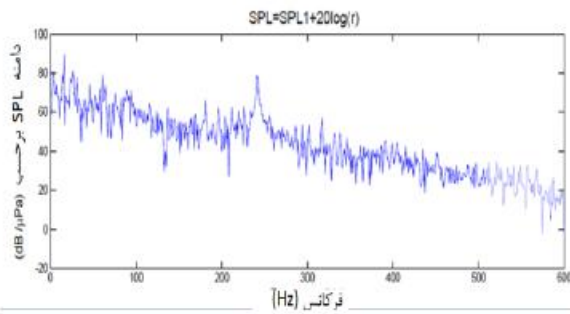
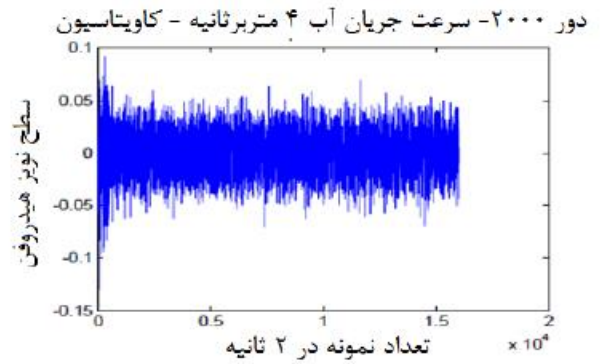
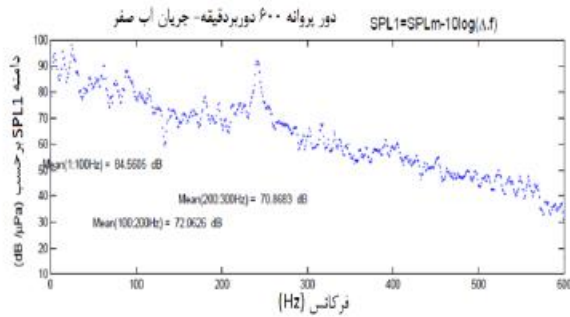
در رابطه فوق  $r$  فاصله هیدروفون از پروانه است که در این آزمایش مقدار آن 10cm (0.1m) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۶) سطح نویز واقعی و نسبی (برحسب میکرو پاسکال) پروانه با دور 600RPM و جریان آب صفر.

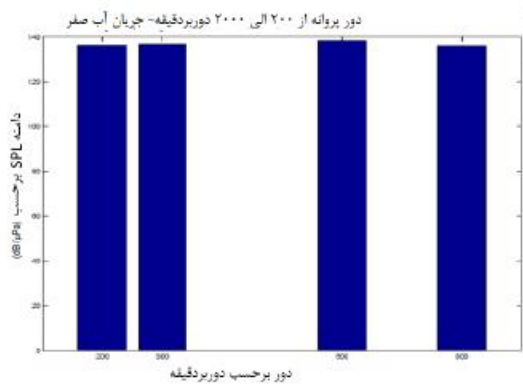


شکل (۱۷) تبدیل فوریه واقعی و طیف توان نویز واقعی پروانه با دور 600RPM و جریان آب صفر.



شکل (۲۱) طیف توان SPL، دور 600RPM و جریان آب صفر.

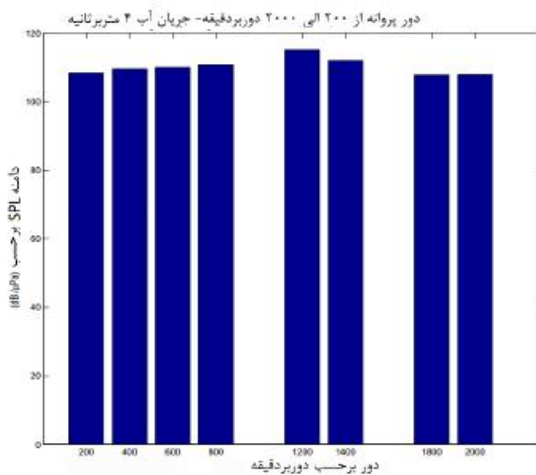
شکل (۲۰) سطح نویز و طیف توان نویز ( $L_p$ )، دور 2000RPM (کاویتاسیون) و جریان آب 4m/s.



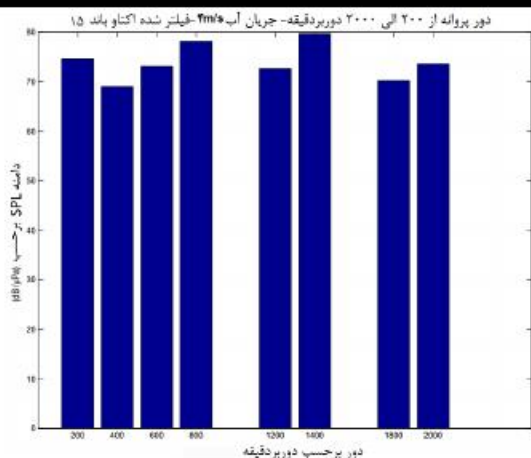
شکل (۲۱) نویز پروانه در دور 600RPM را با استفاده از روابط فوق نمایش می‌دهد. مقادیر متوسط سطح نویز در بازه‌های فرکانسی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ هرتزی، نشان می‌دهد که طیف فرکانسی با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد.

شکل (۲۲) نمودار میله‌ای شدت نویز دریافتی در دورهای مختلف در تست اول بدون فیلتر (دورهای ۲۰۰ لی ۸۰۰).

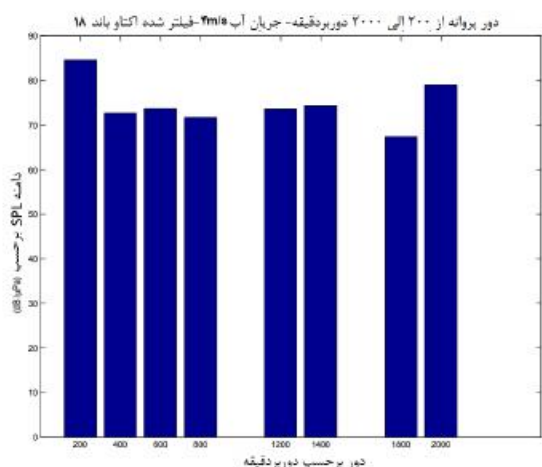
۲۱- تجزیه و تحلیل داده‌ها و نمودارها بدون فیلتر با توجه به نمودارهای ارائه شده با نرم افزار متلب و داده‌های دریافتی در دورهای مختلف از نویز هیدروفن شماره یک (نصب شده در فاصله ۱۰ سانتی متری از پروانه)، سطوح نویز متناسب با دور تغییر می‌نماید. شدت سطح نویزهای پروانه پس از محاسبه بر حسب میکرو پاسکال (سطح مرجع اندازه گیری نویز در داخل آب) بر حسب تبدیل FFT ترسیم شده‌اند. چگالی طیف توان این نویزها نشان‌دهنده این است که تغییرات دور که باعث افزایش برخورد لبه‌های پروانه به آب می‌گردد، شدت نویز را افزایش داده است. در شکل (۲۲) نمودار مقایسه این نویزها بر حسب چگالی طیف توان و شدت نویزهای واقعی ترسیم شده است. مشخص است که در تمامی گستره طیفی، شدت نویز دور 200RPM همواره پایین تر از دور 300RPM و به ترتیب تا دور ۸۰۰ می‌باشد.



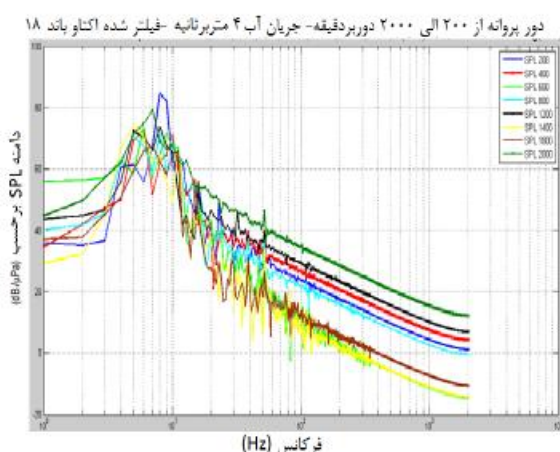
شکل (۲۳) نمودار میله‌ای حداکثر شدت نویز دورهای مختلف با جریان آب 4m/s



شکل (۲۵) نمودار میله‌ای شدت SPL دور 200RPM الی ۲۰۰۰. جریان آب 4m/s. فیلتر اکتاو باند ۱۵.



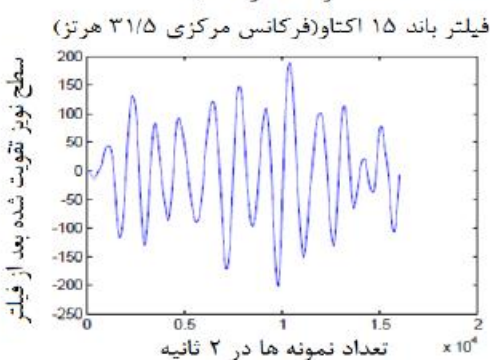
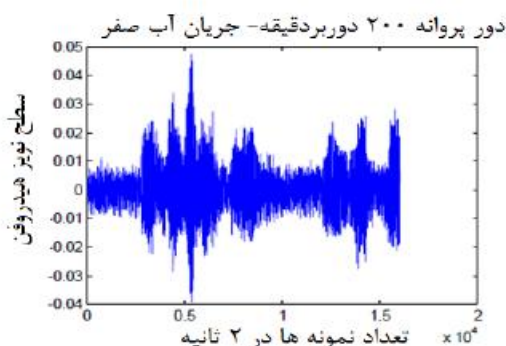
شکل (۲۶) نمودار میله‌ای شدت SPL دور 200RPM الی ۲۰۰۰. جریان آب 4m/s. فیلتر اکتاو باند ۱۸.



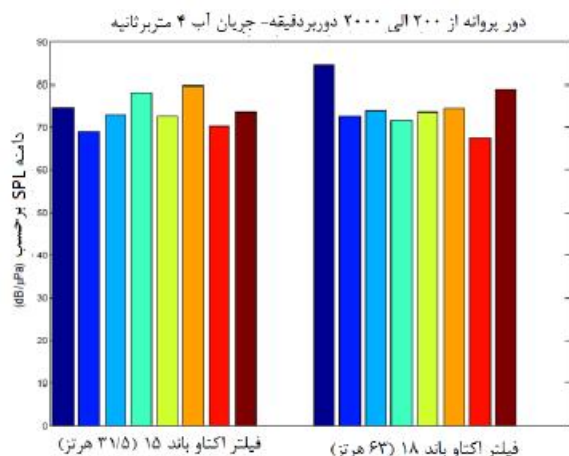
شکل (۲۷) شدت فشار نویز (SPL) در دور 200RPM الی ۲۰۰۰. با عبور از فیلتر اکتاو باند ۱۸ (فرکانس مرکزی ۶۳).

یکی دیگر از مراحل، تعیین شدت نویز پروانه با وجود جریان آب با سرعت جریان 4m/s در تونل است که شدت این نویزها (دوره‌های ۲۰۰ الی ۲۰۰۰) در شکل (۲۳) ترسیم شده است.

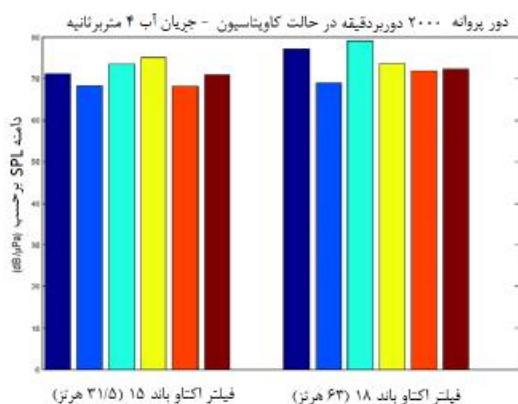
۲۲- ترسیم منحنی‌های نویز پروانه بر حسب شدت فشار صوتی (SPL) با استفاده از تحلیل اکتاو یکی دیگر از روش‌های ارائه شدت نویز صوتی، استفاده از فیلتر Octave (اکتاو یک، یک دوم اکتاو و یک سوم اکتاو، مطابق جدول (۱)) و فیلتر کردن نویز دریافتی است. سپس SPL نویز بر حسب فرکانس مرکزی هر باند محاسبه می‌گردد. در شکل (۲۴) نمونه‌ای از داده‌های اصلی و فیلتر شده اکتاو (باند ۱۵ فرکانس ۳۱/۵) مشخص شده است. در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) نمودار میله‌ای شدت نویز SPL دوره‌های ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ (آزمون دوم)، پس از عبور از فیلترهای اکتاو باند ۱۵ و ۱۸، نمایش داده شده است. در شکل (۲۷) شدت SPL داده‌های فیلتر شده از باند ۱۸، برای دوره‌های ۲۰۰ الی ۲۰۰۰ ترسیم شده است.



شکل (۲۴) نویز پروانه در دور 200RPM با عبور از فیلتر اکتاو باند ۱۵ (فرکانس مرکزی ۳۱/۵).



شکل (۳۰) مقایسه شدت فشار نویز (SPL) دورهای 200RPM الی ۲۰۰۰، جریان آب 4m/s، با عبور از فیلتر اکتاو باند ۱۵ و ۱۸.



شکل (۳۱) نمودار میله‌ای مقایسه شدت فشار منبع (SPL) در دورهای کاویتاسیون (2000RPM)، جریان آب 4m/s، فیلتر اکتاو باند ۱۵ و ۱۸.

### ۲۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل شده و تحلیل‌های طیفی متفاوت داده‌ها، موارد زیر نتیجه‌گیری می‌گردد:

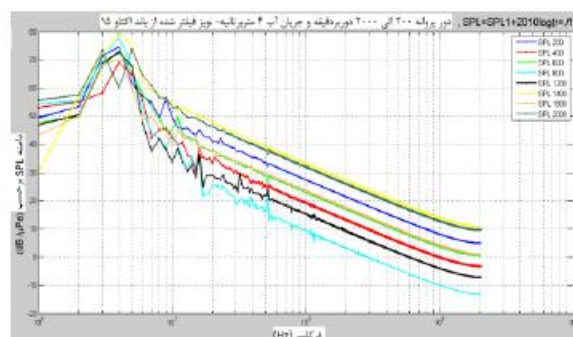
- ۱- با توجه به شکل‌های (۱۶) الی (۱۹)، افزایش دور پروانه باعث افزایش شدت دامنه نویز پروانه می‌گردد.
- ۲- جریان آب تونل شدت دامنه نویز پروانه را افزایش می‌دهد.
- ۳- باند فرکانسی موثر نویز پروانه در محدوده بین ۱ الی ۱۰۰۰ هرتز است که در سامانه‌های آکوستیکی یک نویز قوی و با شدت بالا محسوب می‌گردد.
- ۴- با توجه به این‌که بیشترین تماس پروانه با آب در 0/7R بوجود می‌آید زاویه پروانه تاثیر زیادی در ایجاد نویز پروانه دارد.

### ۲۳- بررسی سطح فشار نویز با فیلتر اکتاو (بدون کاویتاسیون)

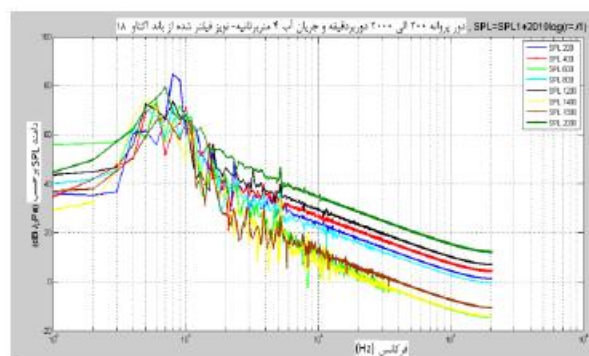
فیلتر اکتاو باند ۱۵ و ۱۸ در نرم افزار مطلب طراحی و داده‌های دریافتی دوره‌های مختلف فیلتر شده که شکل‌های (۲۸) و (۲۹) طیف توان داده‌های فیلتر شده دوره‌های ۲۰۰ الی ۲۰۰۰ را نمایش می‌دهد. سطح نویز باند ۱۸، به این دلیل که سیگنال‌های کم‌توان محدوده فرکانس ۲۲ تا ۴۴ هرتز (باند ۱۵) حذف شده است، کمی افزایش یافته است. شکل (۳۰) نمودار میله‌ای دو باند را نمایش می‌دهد.

### ۲۴- بررسی سطح فشار نویز کاویتاسیون فیلتر اکتاو

در حالت نهایی، با افزایش دور پروانه، در پشت پره‌های پروانه، کاویتاسیون اتفاق افتاده است. در این حالت در چند مرحله نویز پروانه دریافت شده و نمودار میله‌ای شدت نویز آن از چپ به راست (شروع کاویتاسیون و مرحله نهایی) در شکل (۳۱) ترسیم شده است.



شکل (۲۸) شدت فشار منبع (SPL) در دور 200RPM الی ۲۰۰۰، با عبور از فیلتر اکتاو باند ۱۵ (فرکانس مرکزی ۳۱/۵).



شکل (۲۹) شدت فشار منبع (SPL) در دور 200RPM الی ۲۰۰۰، با عبور از فیلتر اکتاو باند ۱۸ (فرکانس مرکزی ۶۳).

دومین همایش ملی علوم و فناوری زیردریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۲.

[۱۰] حامد مختاری، "تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌های دریایی" انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۵.

[۱۱] مهندس محمد مونسان، "آشنایی با زیردریایی‌های نظامی"، انتشارات دانشگاه امام حسین ۱۳۸۳.

[۱۲] پرچر روی، "اصول طراحی زیردریایی"، ترجمه مهندس مونسان، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۱۳۸۳.

[13] Lisbon - "Unsteady Effects in 2D Modelling Of Partial Cavitations Using Bem"., Methods Computations, 2004 .

[14] Gaggero S. , Savio L., Brizzolara S. , Viviani M., Ferrando M. and Conti F., "An Experimental Study On Measuring and Localzating Propeller Noise Behind A Body In A Cavitations Tunnel" First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009.

[15] Report, "Cavitation unnel Tests Or Propeller Noise Of FRV And Comparisons With Full-scale Measurements"-CAV 2001- SESSION B8.007.

[۱۶] مهدی دادخواه، "طراحی بهینه زیردریایی به منظور کاهش نویز انتشاری"، هشتمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۵.

[۱۷] احسان یاری، حسن قاسمی و امین مردان، "تحلیل نویز هیدرودینامیکی پروانه با در نظر گرفتن نویز ناشی از بارگذاری و ضخامت و تاثیر هاب ورتکس"، دوازدهمین همایش صنایع دریایی (MIC2010) ایران، ۱۳۸۹.

[۱۸] یهادرموسوی، امیرعباس پاکزاده و محمد سیف، "شییه‌سازی هیدروآکوستیکی یک پروانه زیرسطحی در شرایط کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی"، بیستمین همایش سالانه بین المللی مکانیک ایران، دانشکده مکانیک دانشگاه شیراز، ۱۳۹۱.

[۱۹] "کتاب راهنمای تونل کاویتاسیون"، مدل NA10- ساخت کشور انگلستان.

[20] Report, "Udaq\_lite DATA MANUAL", EAGLE Technology-Kept Town- South Africa. 2007.

۵- با مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج تحقیقات تونل کاویتاسیون دانشگاه مرجع (۹)، مشاهده می‌شود که آشفتگی فرکانسی در این نتایج نیز غیر قابل انکار است.

۶- شدت نویز، به جنس و قطر پروانه نسبت مستقیم دارد. در تونل دانشگاه انگلستان، از پروانه‌های فلزی با قطر ۳۰۰ میلی‌متر (در مقایسه با پروانه ۸۳ میلی‌متری) استفاده شده که این عامل باعث افزایش شدت نویز پروانه شده است.

متوسط سطح SPL پروانه مورد آزمایش ما مطابق شکل (۲۷) 110dB و متوسط سطح SPL پروانه تونل انگلستان در بازه فرکانسی مشابه مطابق شکل (۹) برابر 130dB است.

۷- طیف فرکانسی نویز پروانه‌ها با هر قطری، تغییر نمی‌کند. مقایسه تحلیل داده‌های اصلی و داده‌های فیلتر شده نشان می‌دهد که بیشترین شدت نویز در پهنای باند نویز صوتی بین ۱۰ الی ۳۰۰ هرتز است.

۸- لنگ و ارتعاشات شافت پروانه تاثیر شدیدی در ایجاد نویزهای با توان بالا داشته باشد.

## ۲۶- مراجع

[1] Carlton J., "Marine Propeller and Propulsion", Section 10, Butterworth-Heinemann, 3rd Edition. 2012.

[2] Jhon.j., "Strategic Antisubmarine Warfare and Naval Strategy", International Security, Vol.11, No.2, pp. 312-331, 1986.

[3] Kuiper, G., "New Developments Around Sheet And TipVortex Cavitation on Ships Propellers", Fourth International Symposium on Cavitation, pp. 1-11, 2001.

[4] Cavity.Ce.Utexas.edu. "Cavitation Home Page at the University of Austin", Ocean Engineering Group, EWRE, Civil, Architectural and Environmental Engineering, UT Austin.

[5] Carlton J., "Marine Propeller and Propulsion" section3, Butterworth-Heinemann, 3rd edition, 2012.

[۶] علی امیری، "طراحی هیدرودینامیکی پروانه تکی برای شناورهای زیرسطحی"، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۳.

[۷] محمدسعید سیف، مهدی عسگری، "کاویتاسیون و روش‌های آزمون مدل پروانه شناورها"، چهارمین همایش ملی صنایع دریایی، انجمن مهندسی دریایی ایران، سال ۱۳۸۱.

[۸] احمد فخار - منوچهر راد "بررسی نسل جدید پوشش‌ها بر عملکرد پروانه کشتی‌های با سرعت زیاد"، ششمین همایش صنایع دریایی، تهران- انجمن مهندسی دریایی ایران ۱۳۸۳.

[۹] روزبه موسوی، محسن حاتم، محمد مهدی علیشاهی، "تحلیل جریان سیال مغشوش دو فازی شامل کاویتاسیون طبیعی"