

# بررسی پدیده کاویتاسیون و انتشار نویز در پروانه‌های رانش دریایی

کامین صابری‌زاد<sup>۱</sup>، محمدحسین قائدشرف<sup>۲</sup>، وحید آئینی<sup>۳</sup>، سیدحسین خوش‌دل هاشمی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

۳- کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی، چابهار

## چکیده:

پروانه‌های دریایی اعضای مهم و حیاتی هستند که ارتباط میان موتور شناور و آب را برقرار می‌کنند و قسمت اعظم توان تولیدشده توسط آن‌ها به حرکت روبه‌جلو شناور تبدیل می‌شود. به دلیل افزایش مداوم اندازه کشتی‌ها، محدودیت منابع انرژی، اثرات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی و غیره، انتخاب پروانه مناسب برای شناورها که تقاضای موجود جهت تولید نیروی رانش و راندمان بیشتر را تأمین نماید و همچنین سبب صرفه‌جویی در سوخت شود؛ دارای اهمیت است. علی‌رغم آن‌که بیش از یک قرن از شروع استفاده از پروانه‌های دریایی برای رانش کشتی‌ها می‌گذرد؛ تحقیق و بررسی بر روی عملکرد و طراحی پروانه هنوز یک موضوع مهم به شمار می‌آید. پدیده کاویتاسیون یکی از مسائل مهم در طراحی پروانه شناور است و از آن می‌توان به‌عنوان معیاری جهت طراحی نام برد زیرا در صورت وقوع این پدیده ناخواسته ضمن کاهش مزایای آکوستیکی پروانه کشتی دچار فرسودگی می‌شود و در برخی موارد صدمات جبران‌ناپذیری می‌بیند. در طراحی شناورها نویز باعث ایجاد محدودیت‌های نسبتاً مختلفی می‌گردد که این محدودیت‌ها در دو حوزه مورد بحث قرار می‌گیرند؛ نخست تأثیر نویز بر روی سنسورها و سامانه‌های سلاح‌های خودی و دوم تأثیر این نویز در اطراف کشتی است که یکی از عوامل شناسایی توسط سامانه‌های شناسایی دشمن است. در شناورهای زیرسطحی مهم‌ترین پارامتر در طراحی پروانه فاکتور میزان اختفا و کاهش سطح نویز انتشاری می‌باشد. ورتکس نوک پره پروانه را می‌توان یکی از قوی‌ترین منابع تولید نویز، کاهش تراست و راندمان و عامل ارتعاشات القایی روی بدنه معرفی کرد که با بهینه‌سازی نوک پره اعمال میزان سطح نویز را می‌توان تا حد مطلوبی کاهش داد. لذا بایستی فاکتورهای هندسی تأثیرگذار بر روی هندسه نوک پره برای رسیدن به این مهم بهینه گردند. در این پژوهش سعی بر این است که پدیده کاویتاسیون معرفی و معایب آن بررسی شود.

## واژه‌های کلیدی:

پروانه، نیروی رانش، کاویتاسیون، آکوستیک، شناور

## Investigating the phenomenon of cavitation and noise emission in marine propellers

K. saberizad<sup>1</sup>, M.H. Qaed Sharaf<sup>2</sup>, V. Aeni<sup>3</sup>, S. H. Khoshdel Hashemi<sup>4</sup>

1, 2 Department of Mechanical Engineering, Malik Ashtar University of Technology, Isfahan

3 Technical and Vocational University No. 1 Pesran (Shahed Mufteh Hamadan)

4 Department of Mechanical Engineering, University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar

### Abstract

Marine propellers are important and vital members that establish a connection between the floating engine and the water, and most of the power generated by them turns into the forward movement of the floating. The phenomenon of cavitation is one of the important issues in the design of floating propellers, and it can be mentioned as a criterion for design, because if this unwanted phenomenon occurs, the acoustic benefits of the ship's propeller will be reduced, and in some cases irreparable damage will occur. Sees. In the design of vessels, noise creates relatively different limitations, which are discussed in two areas, firstly, the effect of noise on the sensors and systems of internal weapons, and secondly, the effect of this noise around the ship, which is one of the factors of identification by enemy identification systems. In subsurface floats, the most important parameter in propeller design is the amount of concealment and reduction of the emission noise level. The vortex of the tip of the propeller blade can be introduced as one of the strongest sources of noise generation, reduction of thrust and efficiency, and the cause of induced vibrations on the body. Therefore, the geometric factors affecting the blade tip geometry should be optimized to achieve this goal. In this research, an attempt is made to introduce the phenomenon of cavitation and examine its disadvantages.

### Keywords:

Propeller, thrust, cavitation, acoustics, buoyancy

## ۱- مقدمه

گردابه‌ها<sup>۱</sup> از زمان فرموله کردن قضایای گردابه پایه توسط هلمهولتز<sup>۲</sup> [۱] موضوع تحقیقات شدید در دینامیک سیالات بوده است. گردابه‌ها را می‌توان به عنوان یک منطقه سیال با قدرت گردابه بالا در مقایسه با محیط اطرافش که به‌عنوان چرخش بردار سرعت تعریف می‌شود را توصیف کرد [۲]. گردابه می‌تواند توسط جریان برشی، انحنای جریان، نیروی کوریولیس<sup>۳</sup> یا باروکلینیتته<sup>۴</sup> ایجاد شود. گردابه‌ها بر جریان آشفته از طریق مخلوطی از حرکات آشفته و ساختارهای منسجم حاکم هستند که ساختارهای با انسجام مکانی و زمانی هستند. اجسام بالابر مانند بال‌ها و پروانه‌ها از طریق جمع‌شدن صفحات گردابی که توسط اختلاف سرعت بین سمت مکش و سمت فشار بدنه ایجاد می‌شود، گرداب تولید می‌کنند. این گردابه‌ها باید در هنگام تجزیه و تحلیل نیروهای وارده بر بدنه در نظر گرفته شوند و ممکن است منجر به پدیده‌های دینامیکی سیال دیگری مانند نویز شوند. همان‌طور که توسط یانگ<sup>۵</sup> (۱۹۸۹) [۳] توصیف شد، پدیده کاویتاسیون<sup>۶</sup> اولین بار توسط نیوتن<sup>۷</sup> در سال ۱۷۰۴ توصیف شد. بین سال‌های ۱۸۹۵ و ۱۸۹۷، بررسی مسابقه توربین‌های بخار محرک پروانه‌های کشتی منجر به مقالاتی توسط بارنابی و تورنیکرافت<sup>۱</sup>، بارنابی و پارسونز<sup>۲</sup> شد که در آن کاویتاسیون برای اولین بار ذکر و مورد بحث قرار گرفت. کلمه کاویتاسیون توسط آر. ای. فرود پیشنهاد شده است. در سال ۱۸۹۵، پارسونز [۴] اولین آزمایش مدل را در یک تونل کاویتاسیون بسیار کوچک انجام داد، که برای ایجاد حباب روی پروانه باید با آب داغ پر می‌شد. در سال ۱۹۱۰، او اولین تونل کاویتاسیون واقعی را در دانشگاه نیوکاسل ساخت. قطر بخش آزمایشی دایره‌ای ۹۱ سانتی‌متر و قطر پروانه‌های آزمایش‌شده ۳۰ سانتی‌متر بود [۴]. این بررسی‌ها مربوط به رانش-شکستگی پروانه کشتی به دلیل کاویتاسیون بود. این پدیده در آن روزها ناشناخته بود اما امروزه به‌خوبی پیش‌بینی می‌شود. تحقیقات فعلی در مورد کاویتاسیون برای پروانه‌ها، پمپ‌ها و توربین‌های کشتی با فرسایش و نویز و ارتعاش مرتبط است.

## ۲- سابقه تحقیقات و مطالعات انجام گرفته

در سطح بین‌المللی ونگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی نویز تابشی زیر آب ملخ‌های دریایی پیشنهاد دادند [۵]. سیزن و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأثیر زبری رسوب زیستی بر عملکرد پروانه دریایی از جمله کاویتاسیون و نویز تابشی زیر آب را بررسی نمودند [۶]. مجددا سیزن و همکاران در ژانویه سال ۲۰۲۱ پژوهشی در مورد تأثیر مدل‌های آشفتگی ویسکوزیته گردابی و تأثیر تفکیک شبکه بر روی پروانه دریایی نویز تابشی زیر آب با استفاده از قیاس صوتی انجام دادند [۷]. کو و همکاران در آگوست سال ۲۰۲۱ بررسی عددی نویز کاویتاسیونی نوک گردابی ملخ‌های زیردریایی با استفاده از رویکرد هیدروآکوستیک محاسباتی ترکیبی را انجام دادند [۸]. نوبل و همکاران در سال ۲۰۲۱ تحقیقی در مورد کاویتاسیون پروانه DREA انجام دادند [۹]. کائو و همکاران در جون سال ۲۰۲۱ یک روش ردیابی معکوس برای حل نویز تابشی ناشی از کاویتاسیون ورق پروانه دریایی با تأییدهای تجربی انجام دادند [۱۰]. ابراهیمی و همکاران در سال ۲۰۲۱ بررسی تجربی عملکرد هیدرودینامیکی، کاویتاسیون و نویز پروانه دریایی معمولی سری بی در تونل کاویتاسیون انجام دادند [۱۱]. دوبیوسو و همکاران در سال ۲۰۲۱ تحلیل عددی پروانه‌های دریایی نویز فرکانس پایین در حین مانور را انجام دادند [۱۲]. چوی و همکاران در سال ۲۰۲۱ پیش‌بینی نویز پهنای باند زمانی برای ملخ‌های دریایی بدون کاویتاسیون با مدل‌های طیف فشار دیوار انجام دادند [۱۳]. تانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ نتایج برنامه تست دور رابین برای نویز یک پروانه کاویتینگ را منتشر نمودند [۱۴]. پارک و همکاران در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای بر روی اعتبارسنجی روش آزمایش مدل برای پیش‌بینی نویز کاویتاسیون پروانه انجام دادند [۱۵]. مجددا کائو و همکاران در سال ۲۰۲۰ بصورت تجربی نویزهای دوقطبی پروانه دریایی را پیش‌بینی نمودند [۱۶]. ابراهیمی و همکاران در سال ۲۰۱۹ بررسی جامعی بر روی روش‌های کاهش نویز ملخ‌های دریایی و روش‌های طراحی انجام دادند [۱۷].

<sup>6</sup> cavitation

<sup>7</sup> Newton

<sup>1</sup> Barnaby and Thornycroft

<sup>2</sup> Barnaby and Parsons

<sup>1</sup> Vortices

<sup>2</sup> Helmholtz

<sup>3</sup> Coriolis force

<sup>4</sup> baroclinity

<sup>5</sup> Yang

### ۳- تئوری عملکرد دستگاه رانش

برای حرکت شناورها در یک سرعت معین نیازمند اعمال نیرویی است که بر مقاومت هوا و آب غلبه نماید. این نیرو به وسیله محرکه اصلی تأمین می‌شود. امروزه پروانه‌های معمولی کاربرد بیشتری در سیستم رانش دارند و در حالت کلی نیز مؤثرترین نوع پروانه‌ها هستند. از نظر تئوری عملکرد یک دستگاه رانش را می‌توان براساس اصول نیوتن تشریح نمود. با توجه به قانون دوم نیوتن نتیجه زیر حاصل می‌شود [۱۸]:

$$F = ma \quad (1)$$

$$F = \frac{m}{\Delta t} \Delta u \quad (2)$$

لذا جهت جابجایی مقدار معینی از آب  $\left(\frac{m}{\Delta t}\right)$ ، با سرعت مشخص  $\Delta u$  به نیروی  $F$  نیاز دارد که می‌بایست توسط سیستم رانش ایجاد گردد. این نیرو دارای عکس‌العملی برابر و در جهت عکس خواهد بود که نیروی رانش رو به جلوی شناور را تشکیل می‌دهد. چنانچه  $q$  دبی حجمی و  $\rho$  چگالی سیال باشد، مقدار نیروی رانش برابر است با:

$$Tr = \rho q \Delta u \quad (3)$$

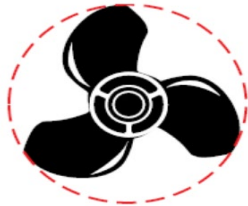
برای ایجاد نیروی رانش معین  $Tr$  با  $\rho$  معین دو حالت می‌توان در نظر گرفت،  $\Delta u$  بزرگ و  $q$  کوچک و یا بالعکس. در حالت اول که زیاد و  $\Delta u$  نسبتاً کوچک می‌باشد حجم سیستم رانش کوچکتر شده و قابل نصب در داخل شناور می‌باشد. نمونه چنین سیستم رانشی سیستم واترجت می‌باشد؛ اما در حالت دوم برای ایجاد دبی حجمی زیاد ضمن داشتن اختلاف سرعت نسبتاً کم، دستگاه رانش حجیم گردیده و حتماً باید خارج بدنه شناور جاسازی گردد. نمونه چنین سیستم رانشی سیستم پروانه می‌باشد. یک پروانه معمولی دارای دو یا تعداد بیشتری پره می‌باشد، بر روی یک توپی قرار گرفته و این توپی روی یک شفت سوار است که توسط موتور اصلی گردانده می‌شود.

#### ۳-۱- هندسه پروانه

پروانه را می‌توان مهم‌ترین قسمت در سیستم رانش یک شناور دانست که وظیفه اصلی آن ایجاد نیروی تراست مناسب جهت پیشروی شناور در دریا می‌باشد. از گذشته‌های دور طراحان همواره سعی بر بهینه نمودن

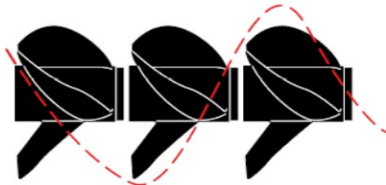
عملکرد پروانه‌های دریایی داشته‌اند. در این قسمت، پارامترهای موجود در هندسه پروانه معرفی خواهد شدند.

۳-۱-۱- قطر پروانه: به دایره‌ای گویند که شعاع آن از مرکز شفت تا انتهای لبه پروانه باشد [۱۸].

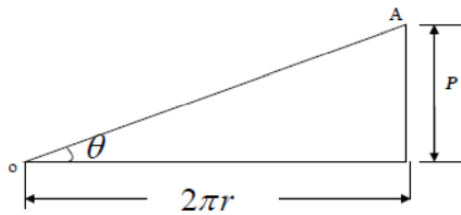


شکل ۱- شماتیکی از قطر پروانه [۱۸]

۳-۱-۲- گام پروانه: به فاصله محوری جابه‌جا شده در اثر یک دور گردش پروانه گویند (مشابه گام پیچ).



شکل ۲- نمای از گام پروانه [۱۸]



شکل ۳- زاویه گام [۱۸]

و با توجه به شکل ۳، رابطه ۴ برای زاویه گام<sup>۱</sup> وجود خواهد داشت:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{pitch}}{2\pi r} \quad (4)$$

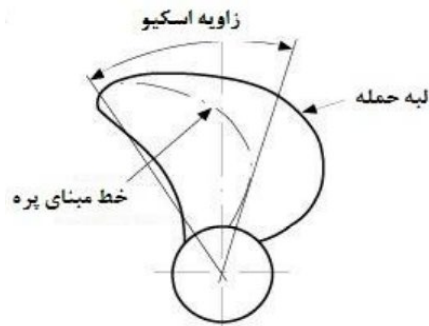
۳-۱-۳- نسبت گام: نسبت گام پروانه به قطر را نسبت گام می‌نامند و به فرم زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{pitch ratio: PR} = \frac{\text{Pitch}}{D} \quad (5)$$

۳-۱-۴- زاویه اسکیو<sup>۲</sup>: یکی از پارامترهایی که به وسیله آن فرم مارپیچی پروانه تعریف می‌گردد زاویه اسکیو است.

<sup>2</sup> Skew angle

<sup>1</sup> pitch angle



شکل ۴- نمایشی از زاویه اسکيو [۱۸]

زاویه اسکيو در یک مقطع از پره برابر است با زاویه بین خط مبنای پره (خط عبوری از قسمت میانی پره و درامتداد عمود بر محور شفت) و خطی که مابین نقطه محور شفت و نقطه لبه پره در صفحه تصاویر شده پروانه رسم می‌گردد. وجود اسکيو در پروانه سبب می‌گردد که جریان آب به‌طور ناگهانی و در یک لحظه وارد پره‌ها نشود؛ زیرا این کار سبب وارد شدن نیروهای زیادی از طرف آب بر پره و همچنین ایجاد ارتعاش در پره‌ها می‌شود. وجود اسکيو مناسب در پره سبب توزیع تدریجی نیرو بر روی سطح پره و همچنین پایین آمدن میزان ارتعاشات پره می‌شود.

### ۳-۱-۵- نسبت مساحت توسعه یافته $\left(\frac{A_E}{A}\right)$ :

این نسبت برابر است با مساحت توسعه یافته تقسیم بر مساحت دیسک، که مساحت توسعه یافته  $(A_E)$  برابر با سطح محصور شده توسط یک پره ضرب در تعداد پره‌ها و مساحت دیسک  $(A)$  برابر با مساحت دایره‌ای به قطر  $D$  که از نوک پره‌ها عبور می‌کند [۱۸].

### ۴- کاویتاسیون

پدیده کاویتاسیون یکی از مسائل مهم در طراحی پروانه کشتی است و از آن می‌توان به عنوان معیاری جهت طراحی نام برد؛ زیرا در صورت وقوع این پدیده ناخواسته، پروانه کشتی دچار فرسودگی می‌شود و در برخی موارد صدمات جبران‌ناپذیری می‌بیند. همچنین، ایجاد صدا و افت عملکرد پروانه نیاز از دیگر نتایج منفی آن هستند. در سال ۱۷۵۴ ریاضیدان سوئیسی "اولر" به پدیده کاویتاسیون [۱۹] که ممکن بود در چرخ‌های آبی رخ دهد توجه کرد. ولی تا سال‌های میانی قرن نوزدهم در صنعت دریایی منابع و مراجع کمی درباره‌ی کاویتاسیون تدوین شد تا این که "رینولدز"

مجموعه‌ای از مقالات که درباره‌ی دلایل از کارافتادگی زودرس موتورهای بخار کشتی‌های دارای پروانه نوشت. در این مجموعه وی به معرفی پدیده کاویتاسیون و اثر آن بر کارکرد پروانه کشتی‌ها پرداخته است. در ادامه به بررسی عوامل مؤثر بر پدیده کاویتاسیون پرداخته خواهد شد.

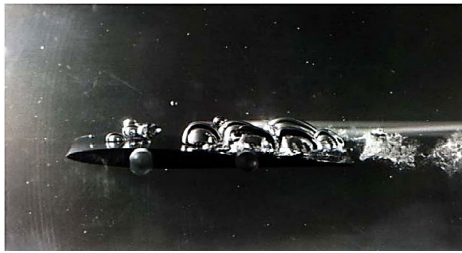
### ۴-۱- عوامل مؤثر بر پدیده کاویتاسیون

اگر فشار جریان آب در ناحیه‌های کاهش یابد به‌طوری که به فشار بخار اشباع برسد، سبب ایجاد حباب‌های بخار آب در نقاط کم‌فشار می‌شود؛ بنابراین، حجم مخصوص افزایش پیدا می‌کند و جرم مخصوص کم می‌شود. در چنین حالتی، شرایط حاکم بر جریان سیال تغییر می‌کند و با وقوع کاویتاسیون سیال دچار اغتشاش می‌شود. به‌طور کلی عواملی که مؤثر در کاویتاسیون هستند، عبارت‌اند از: عمق شناوری که با افزایش آن فشار استاتیک پیرامون پروانه افزایش یافته و احتمال وقوع کاویتاسیون کم می‌شود. درجه حرارت سیال که در صورت ثابت ماندن عمق شناوری و رژیم جریان افزایش دما، احتمال وقوع کاویتاسیون را زیاد می‌کند. شکل مقطع هیدروفویل که با افزایش ضخامت یا انحنای مقطع احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد می‌شود؛ زیرا تغییرات سرعت سریع‌تر و بیشتر می‌شود عوامل فوق در پروانه کشتی‌ها نیز مؤثرند علاوه بر این که سرعت دوران پروانه نیز روی تغییرات سرعت نسبی اثرگذار است و عمق کارکرد پره‌های آن به‌صورت پریودی تغییر می‌کند. کاویتاسیون معمولاً به‌صورت تشکیل حباب‌های پر شده با بخار یا گاز یا ترکیبی از آن‌ها و عملکردهای متعاقب آن (مانند رشد، جدا شدن از سطح و فروپاشی) در سیال تعریف می‌شود. کاویتاسیون دارای اثرهای کاهش کارکرد پروانه، خوردگی سطح پره‌ها، تولید صدا و ارتعاش در بدنه کشتی است؛ اما وجود بارگذاری‌های سنگین در پروانه‌های دریایی جدید وقوع کاویتاسیون را در سیستم‌های پیش‌رانش اجتناب‌ناپذیر ساخته است. بنابراین، پیش‌بینی کاویتاسیون امری حیاتی می‌باشد. پدیده کاویتاسیون به‌خاطر پیچیدگی‌های جریان و هندسه پروانه به‌سادگی قابل پیش‌بینی نیست و روش متداول برای کنترل کاویتاسیون استفاده از روابط تجربی یا تست مدل پروانه است. پدیده کاویتاسیون را بر اساس شکل ظاهری به‌صورت‌های زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

### ۴-۱-۱- کاویتاسیون نوک پره و محور شفت<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Tip and hub vortex cavitation

کاویتاسیون ظاهر می‌شود. حباب‌های ایجاد شده بسیار پرسر و صدا فرو می‌پاشند؛ بنابراین این پدیده پرسر و صدای خورنده و بسیار مضر می‌باشد.



شکل ۷- کاویتاسیون حبابی [۲۲]

#### ۴-۱-۴- کاویتاسیون ریشه‌ای<sup>۴</sup>

این نوع کاویتاسیون در ریشه پروانه رخ می‌دهد؛ ظاهری شبیه گوه را داراست و مرتبط با گردابه‌های توسعه‌یافته در ریشه به واسطه اثرات ویک و یا شفت شیب‌دار و عواملی از این قبیل است.



شکل ۸- کاویتاسیون ریشه‌ای [۲۳]

#### ۴-۱-۵- کاویتاسیون ابری<sup>۱</sup>

کاویتاسیون ابری معمولاً در ادامه کاویتاسیون صفحه‌ای پایدار و به شدت توسعه‌یافته نمایان می‌شود و سیال به‌طور ملایم و به‌صورت گردابه‌های کوچک از مرکز حباب‌های کوچک جدا می‌شود. این نوع کاویتاسیون به‌صورت ماه یا ابری از حباب‌های بسیار کوچک ظاهر می‌شود. از طرفی باتوجه به شکل زیر با ثابت نگه‌داشتن سرعت ورودی و افزایش سرعت دورانی پروانه الگوی کاویتاسیون ایجاد شده تغییر می‌کند.



شکل ۹- کاویتاسیون ابری [۲۴]

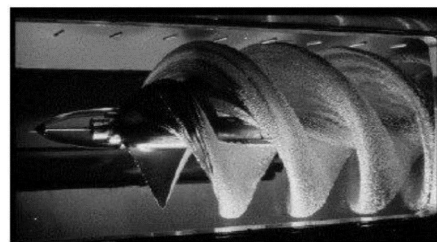
مرکز گردابه‌هایی که در نزدیکی نوک پره و محور شفت وجود دارند چنانچه دارای فشار کمتر از فشار بخار سیال شوند؛ سبب ایجاد این نوع کاویتاسیون می‌شوند. در ابتدا حباب‌های تشکیل شده در فاصله‌ای دور از پشت نوک پره‌های پروانه دیده می‌شوند و در اصطلاح به آن‌ها ورتکس‌های چسبیده‌نشده گفته می‌شود اما هنگامی که این ورتکس‌ها در اثر بارگذاری بالا یا کاهش عدد کاویتاسیون قوی‌تر می‌شوند به سمت نوک پره حرکت نموده و در نهایت به آن می‌چسبند.



شکل ۵: کاویتاسیون نوک پره [۲۰]

#### ۴-۱-۲- کاویتاسیون صفحه‌ای<sup>۲</sup>

این نوع کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که شاهد گردان فشار قوی بوده و حباب از سطح پره جدا می‌شود. کاویتاسیون صفحه‌ای وقتی پره دارای زاویه حمله مثبت باشد ابتدا در لبه حمله پره پروانه ظاهر می‌شود. حباب‌های کاویتاسیون صفحه‌ای عموماً پایدار هستند؛ اگرچه در برخی موارد ناپایداری نیز رخ می‌دهد و در پروانه‌های تجاری معمولاً با گردابه‌های نوک پره ادغام می‌شوند.



شکل ۶- کاویتاسیون صفحه‌ای [۲۱]

#### ۴-۱-۳- کاویتاسیون حبابی<sup>۳</sup>

کاویتاسیون حبابی در ابتدا به توزیع فشار ناشی از مکش بالا در منطقه میانی وتر در سطح پره برمی‌گردد. لذا خمیدگی و ضخامت پره نقش مهمی در مستعدبودن آن در برابر کاویتاسیون حبابی دارد. زمانی که سطح پره نسبتاً ضخیم است و در زاویه حمله کوچک کار می‌کند این نوع

<sup>4</sup> Root cavitation

<sup>1</sup> Cloud cavitation

<sup>2</sup> Sheet cavitation

<sup>3</sup> Bubble cavitation

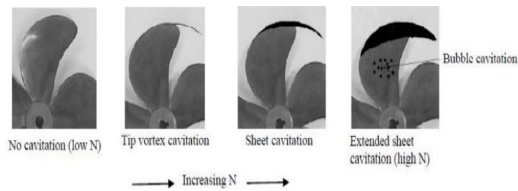
از بخار به مناطق پرفشار سیال می‌روند؛ اندازه حباب کاهش می‌یابد در حالی که فشار داخل آن ثابت می‌ماند. پس از مدتی حباب‌ها کوچک می‌شوند و کشش سطحی به واسطه فروپاشی حباب منجر می‌گردد. هنگامی که این اتفاق در نزدیکی سطح پره رخ دهد سبب بروز آسیب مکانیکی به سطح پره و خوردگی خواهد شد.



شکل ۱۱- اثر خوردگی پره به سبب کاویتاسیون [۲۵]

### ۶- شروع کاویتاسیون

شروع کاویتاسیون یک فرآیند پیچیده است که نیاز به حضور هسته در سیال دارد. مروری بر مکانیسم‌های آغازین توسط رود (۱۹۹۱) و اخیراً فقط برای کاویتاسیون صفحه‌ای توسط ون ریجسبرگن (۲۰۱۶) ارائه شده است [۲۶]. بیشتر تحقیقات در مورد کاویتاسیون گردابی در آغاز آن متمرکز شده‌است. در ادامه مکانیسم‌های دخیل در ایجاد کاویتاسیون نوک با تمرکز بر حداقل فشار در مرکز گرداب و تأثیر هسته‌ها به اختصار مورد بحث قرار می‌گیرند. اگرچه ذرات جامد نیز می‌توانند باعث ایجاد کاویتاسیون شوند؛ بیشتر تحقیقات در مورد هسته‌ها بر روی حباب‌های گاز آزاد متمرکز شده است. برای اولین بار توسط مک کورمیک (۱۹۶۲) نشان داده شد که شروع کاویتاسیون یک گرداب نوک پروانه به ضخامت لایه مرزی در سمت فشار نوک پروانه بستگی دارد [۲۷]. مشخص شد که عدد شروع کاویتاسیون  $\sigma_i$  با افزایش عدد رینولدز  $Re$  و افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد و مشخص شد که به طور قابل توجهی به محتوای گاز حل‌نشده بستگی دارد. مک کورمیک دریافت که اندازه حباب تولیدی توسط کشش القایی کنترل نمی‌شود و کاویتاسیون صفحه‌ای کاملاً رول شده نشان دهنده شرایط اولیه نیست و یک رابطه نیمه‌تجربی ابداع شد که رابطه‌ای بین عدد آغاز کاویتاسیون و عدد رینولدز را بیان می‌کند. این رابطه بین عدد شروع کاویتاسیون و عدد رینولدز توسط دیگران تایید شده است. رابطه اولیه برای یک پروانه به صورت رابطه ۶ است [۲۸]:



شکل ۱۰- افزایش دور و تغییر الگوی کاویتاسیون [۲۴]

### ۵- اثرات کاویتاسیون بر پروانه‌ها

پدیده کاویتاسیون می‌تواند در هر قسمتی از شناور که فشار محلی خیلی پایین است رخ دهد. پروانه شناور به سبب افزایش زیاد در سرعت موضعی (کاهش فشار) اطراف پره‌ها به تنهایی منبع بزرگی برای کاویتاسیون است. هنگام وقوع کاویتاسیون بسته‌به گسترش و شدت آن، پروانه متحمل خسارات زیر می‌شود:

#### ۱-۵- کاهش عملکرد

کاویتاسیون جزئی روی پره پروانه اثری بر نیروی تراست نداشته و حتی مقدار کمی حباب می‌تواند آن را افزایش دهد. وقتی ۲۰ الی ۲۵ درصد سطح پره توسط حباب‌ها<sup>۲</sup> پوشانده شود سبب کاهش تراست و گشتاور خواهد شد. نیروی تراست خیلی سریع‌تر از گشتاور کاهش یافته لذا راندمان کاهش می‌یابد. در پروانه‌های تجاری این اتفاق در بارگذاری سبک<sup>۳</sup> و سرعت دورانی پایین به ندرت رخ می‌دهد. با این وجود در پروانه‌ها با بارگذاری بالا<sup>۴</sup> و به خصوص در پروانه‌های دارای سرعت دورانی بالا اثرات کاویتاسیون در مشخصات عملکردی پروانه‌ها مشهود است.

#### ۵-۲- ارتعاش

کاویتاسیون صفحه‌ای روی سطح پره حجم قابل توجهی داشته و رفتار دینامیکی این حجم بزرگ از بخار تولیدشده به واسطه نوسانات فشار، ارتعاش نامیده می‌شود. افزایش مساحت سطح پره به خصوص در نوک و افزایش زاویه اسکویو دو را مؤثر جهت کاهش ارتعاش می‌باشد.

#### ۳-۵- خوردگی

تولید حباب بخار در سیال یک فرآیند سریع است. وقتی حباب به سمت مناطق فشار پایین در سیال حرکت می‌کند اندازه آن گسترش می‌یابد در حالی که فشار داخل آن نزدیک به فشار بخار باقی می‌ماند. زمانی که این حباب‌های پر شده

<sup>4</sup> High loading

<sup>2</sup> bubbles

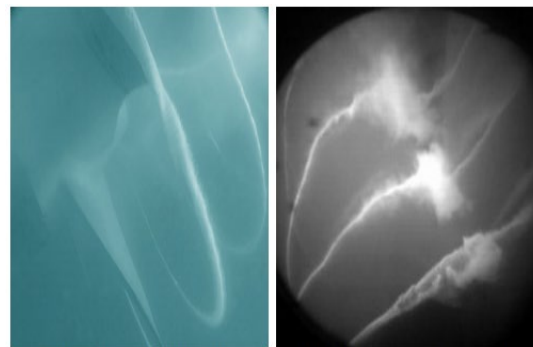
<sup>3</sup> Low loading

$$\sigma_i = KC_L^2 Re^m \quad (6)$$

که در آن  $\sigma_i$  عدد شروع کاویتاسیون،  $K$  یک ثابت تناسب،  $C_L$  ضریب لیفت ایرفویل و  $Re^m$  عدد رینولدز براساس طول وتر و سرعت جریان آزاد و مقدار پارامتر  $m$  را می‌توان با رشد یک لایه مرزی آشفته مرتبط دانست؛ اما اغلب با برازش داده‌های تجربی تعیین می‌شود. این رابطه همچنین برای تصحیح سرعت شروع کاویتاسیون پروانه‌های در آزمایش‌های مدل با عدد رینولدز که با مقیاس اصلی متفاوت است استفاده می‌شود. مروری بر مقادیر نیمه‌تجربی منتشر شده برای  $m$  توسط بیست و یکمین کمیته کاویتاسیون ITTC در ۱۹۹۶ ارائه شده است. شن و همکاران (۲۰۱۸) مدلی را پیشنهاد کرده‌اند که در آن  $m$  به عدد رینولدز وابسته است. در MARIN،  $m = 0.35$  استفاده می‌شود [۲۸].

## ۷- کاویتاسیون گردابی

از آنجایی که انواع بسیاری از گرداب‌ها در جریان اطراف پروانه‌های دریایی وجود دارد؛ انواع مختلفی از کاویتاسیون گردابی نیز وجود دارد. برخی از این کاویتاسیون‌های گردابی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



a) Single-screw bulk carrier      b) Single-screw container vessel

شکل ۱۲- تصاویر ویدئویی پرسرعت ساخته شده توسط MARIN از گردابه‌های کاویتاسیونی در مقیاس کامل

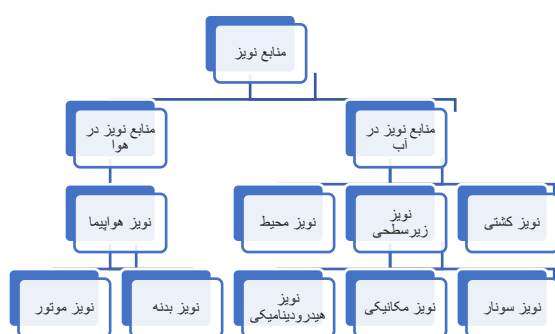
گردابه‌های کاویتاسیونی ایجاد شده در تیغه پروانه‌های دریایی در میدان نزدیک پروانه در غیاب کاویتاسیون ورقه‌ای ساختارهای گردابی پایدار هستند. همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شده فقط در پایین دست پروانه، ممکن است یک ناپایداری کلی رخ دهد. با این حال شکل گرداب کاویتاسیون ممکن است از شکل استوانه‌ای منحرف شود و می‌تواند یک مقطع بیضی داشته باشد یا ممکن است وجود گره‌هایی را نشان دهد که در [۲۹] بحث شده است.

کاویتاسیون نوک گرداب یک ایرفویل در شرایط ثابت می‌تواند نوساناتی را نشان دهد که می‌تواند منجر به نویز قوی شود [۳۰]. پنینگز (۲۰۱۶) نیز از همین ایرفویل برای تولید کاویتاسیون گرداب نوک استفاده کرد که آشفتگی‌های آن با استفاده از ویدئوی پرسرعت مشاهده شد [۳۱].

## ۸- نویز و دسته بندی منابع نویز

نویز عبارت است از انحراف متناوب فشار موضعی از فشار تعادل و ایجاد یک ناحیه پرفشار و کم‌فشار که باعث تولید امواج صوتی می‌گردد [۲۰]. هرگونه ناهمگنی در محیط سیال و یا ارتعاش جسم، منبع تولید نویز است. آلاینده‌های صوتی یا نویز به دودسته نویز بالای سطح آب و درون آب تقسیم‌بندی شده است. نویز بالای سطح آب شامل صدای نامطلوب را می‌توان به دو منبع اصلی (موتور و بدنه) مربوط دانست [۲۰]. منابع تولید نویز در دریا نیز به دودسته اساسی تقسیم‌بندی می‌شود:

- ۱- نویزی که توسط وسایل نقلیه دریایی تولید می‌شود
  - ۲- نویز پس‌زمینه.
- بنابراین با توجه به مطالب بیان شده شناخت منابع تولید صوت و نحوه انتشار آن اولین قدم در شناخت نحوه شناسایی در زیر آب است و از طریق این شناخت و دسته‌بندی آن می‌توان در جهت شناسایی و کاهش نویز قدم برداشت [۲۳].



شکل ۱۳- نمودار دسته بندی منابع نویز

### ۸-۱- منابع تولید نویز در دریا

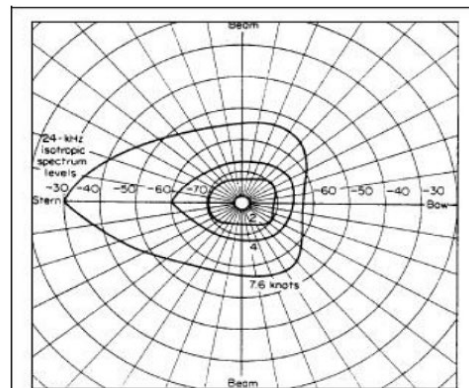
#### ۸-۱-۱- منابع نویز کشتی

نویز شناورها بسیار چشمگیر است [۱۸]. در لنگرگاه‌ها و معابر ورودی بندر، نویز غالب، از سوی کشتی‌ها مخصوصاً شناورهای کوچک است که فرکانس نویز آن‌ها از چندین

کیلوهرتز فراتر می‌رود. به‌طور کلی منابع تولید نویز صوتی در کشتی را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد:

۱- موتورخانه (منبع اصلی حرکت، محور و قطعات متحرک موتور کشتی) ۲- پروانه (یا هر سیستمی که باعث پراکندگی آب شود) ۳- هیدروآکوستیک که در اثر عبور بدنه کشتی در آب ایجاد می‌شود. ۴- منابع مختلف تولید صدا در کشتی.

هر یک از این منابع دارای باند فرکانسی مخصوصی هستند و رفتارهای مختلفی را در شرایط مختلف از خود بروز می‌دهند [۲۳]. بیشترین اطلاعات در بازه ۱۰ هرتز تا ۲ کیلوهرتز وجود دارد (شکل ۱۳) البته در بقیه باندهای فرکانسی نیز اطلاعاتی وجود دارد. خصوصیات و شدت نویز صوتی که به‌وسیله کشتی تولید می‌شود به جهت شنیدن صدا نیز وابسته است. به‌طور معمول جهت انتشار از پاشنه یعنی محل قرار گرفتن پروانه به سمت دماغه است. (شکل ۱۳)

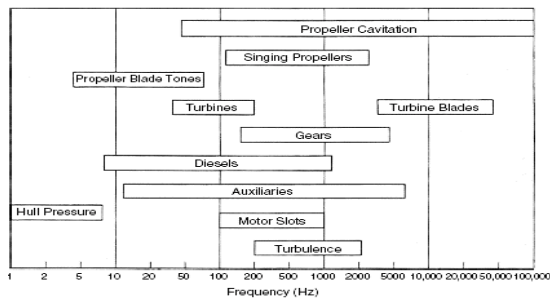


شکل ۱۳- جهت انتشار نویز صوتی شناور

### ۲-۱-۸- منابع نویز زیر سطحی

برای زیردریایی متحرک در دریا عوامل متعددی موجب ایجاد امواج آکوستیکی می‌شود. در زیردریایی‌ها دو مکانیزم تولید نویز وجود دارد که شامل این موارد است: نویزهای مکانیکی: موتور دیزل، ماشین‌های کمکی مثل پمپ و ژنراتور، جعبه دنده و سیستم انتقال قدرت، ارتعاش بدنه ناشی از عوامل مکانیکی. نویزهای هیدرودینامیکی: نویز تولیدی حاصل از تداخل بدنه شناور و سیال متحرک اطراف آن، نویز تولیدی حاصل از چرخش پروانه، نویز ناشی از ورتکس‌ها و گردابه‌های پشت جسم متحرک، نویز ناشی از تشکیل کاویتاسیون و انفجار حباب‌های آن، نویز ناشی از جریان‌های حباب‌دار مانند گازهای خروجی، ناحیه آشفته اطراف بدنه شناور این موارد غالب نویز را تولید می‌کنند.

منبع اصلی تولید نویز مکانیکی در آب، ارتعاش پوسته بدنه شناور است و عامل نویز هیدرودینامیکی حرکت جسم در سیال و نوسانات فشار سیال در اطراف شناور متحرک است. در نمودار شکل زیر دسته‌بندی عوامل مهم تولید نویز و محدوده فرکانسی هر یک نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۱۴- دسته بندی عوامل مهم تولید نویز و محدوده فرکانسی هر کدام

### ۸-۲- نویزهای هیدرودینامیکی

همان‌طور که اشاره شد نویزهای هیدرودینامیکی بیشتر بواسطه کاویتاسیون، جریان‌های حباب‌دار، گردابه‌های پشت جسم و جریان آشفته ایجاد می‌گردند. در صورت نبودن کاویتاسیون و جریان‌های حباب‌دار، نویز حاصل از جریان آشفته نسبت به نویز حاصل از ارتعاش بدنه از اهمیت کمتری برخوردار است. نویزهای حاصله در این قسمت بنا به دو دلیل ایجاد می‌گردند. اول به دلیل شکل هندسی جسم متحرک در سیال: در این حالت به دلیل رانده شدن سیال توسط جسم، فشار یکنواخت سیال اولیه به هم خورده و اختلاف فشار در قسمت‌های مختلف سیال ایجاد می‌گردد. دوم به دلیل نوع رژیم جریان در اطراف جسم: بسته به سرعت جریان و میزان آشفتگی آن، مقادیر نویز تولیدی متفاوت خواهد بود. همچنین بنا به شدت گردابه‌های پشت جسم یا میزان جدایش روی داده در بدنه، این مقدار متفاوت است. بنابراین بسته به خواص سیال، سرعت و مشخصات هندسی جسم می‌توان انتظار رفتارهای گوناگونی داشت. در این دسته یک جزء بسیار با اهمیت دیگر نیز وجود دارد و آن نویز مربوط به پروانه می‌باشد. نویزهای حاصل از حرکت پروانه در آب اثر غالب را در میان سایر منابع نویز شناور دارد. منبع اصلی تولید این نویز، جریان پیچیده در پشت پروانه است. این جریان‌ها که همراه ورتکس، رشد و انفجار کاویتاسیون می‌باشد، شناسایی نویزهای تولیدی را دشوار می‌کند [۱].

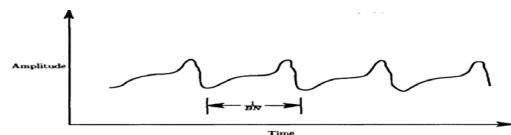


### ۸-۳- پروانه‌ها

پروانه‌ها از جنبه‌های مختلف از قبیل تعداد پره، شرایط عملکرد، شکل و مقطع پره و ... با یکدیگر تفاوت‌های بسیاری دارند؛ اما در حالت کلی از دید کیفی فرآیند تولید نویز در آنها تقریباً مشترک و یکسان است. اجزای اصلی نویز در پروانه‌ها عبارتند از نویز ضخامت (به دلیل جابجایی حجمی تیغه)، نویز بارگذاری پایا (به دلیل نیروی پایا روی تیغه‌ها)، نویز بارگذاری ناپایا (به دلیل بارگذاری غیر یکنواخت دایروی)، نویز غیرخطی یا چهارقطبی و آخرین منبع نیز نویز طیف گسترده است. میزان اهمیت هر یک از این منابع بستگی به شرایط عملکرد و طراحی دارد. البته مدلسازی عددی تا حدی با نتایج واقعی تفاوت دارد؛ زیرا به هر حال اعمال شرایط عملکردی واقعی مثل نوع جریان متلاطم و غیریکنواخت در نتایج نویز تاثیر دارد [۳].

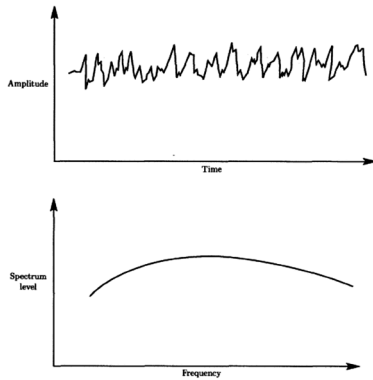
### ۸-۴- خصوصیات نویز پروانه

طیف فرکانسی در پروانه‌ها به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند: طیف هارمونیک - طیف گسترده - طیف باریک تصادفی. نویز هارمونیک یک منبع نویز تکرار شونده در زمان است و نرخ آن ثابت است. فرکانس نویز هارمونیک یک پروانه با تعداد  $B$  پره و با دور چرخش  $N$  با عدد  $BN$  و پیروید آن با  $1/BN$  مرتبط است. در شکل زیر نمودار این نوع برای یک پروانه به صورت شماتیک نشان داده شده است.



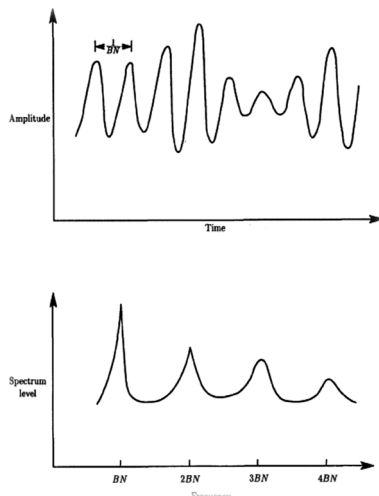
شکل ۱۵- خصوصیات نویز هارمونیک پروانه

نویز طیف گسترده شامل تمام فرکانس‌ها می‌تواند باشد. در شکل ۱۶ یک نمونه از این طیف نشان داده شده است. از خصوصیات این نوع طیف پیوسته بودن آن است.



شکل ۱۶- خصوصیات نویز با طیف گسترده

طیف باریک تصادفی نیز تقریباً پیرویدیک است. البته در این طیف فرکانس پیک کاملاً تصادفی است و در یک فرکانس قابل پیش‌بینی روی نمی‌دهد. همانطور که در (شکل ۱۷) نشان داده شده طیف ممکن است پیرویدیک به نظر برسد؛ اما مشخصات مهم طیف با زمان به طور معینی تکرار نمی‌شود.



شکل ۱۷- خصوصیات نویز با طیف باریک تصادفی

### ۹- تئوری و معادلات حاکم بر جریان سیال و نویز

معادلات ناویر-استوکس، یکی مدل ریاضی کامل برای سیال ارائه می‌دهند. به دلیل پیچیده بودن این معادلات در فرم کامل ناویر-استوکس، حل تحلیلی غیرممکن است، بنابراین روش‌های عددی به کمک رایانه بهترین گزینه برای حل بخشی از این معادلات می‌باشند. امروزه پیشرفت سریع در زمینه تکنولوژی رایانه سبب استفاده گسترده دینامیک سیالات محاسباتی در حل عددی مسائل جریان سیال شده است. با توجه به اینکه تمامی حل‌کننده‌های معادلات ساده‌سازی شده ناویر-استوکس نیازمند زمان

پردازش و حافظه زیادی می باشند؛ بنابراین مقداری ساده سازی در حل این معادلات برای کاهش منابع محاسباتی مورد نیاز، لازم است.

معادله بقای جرم

$$\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho U) \partial \quad (7)$$

معادله بقا مومنتوم

$$(\partial(\rho U))/\partial t + \nabla \cdot (\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (8)$$

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - 2/3 \delta \nabla \cdot U) \quad (9)$$

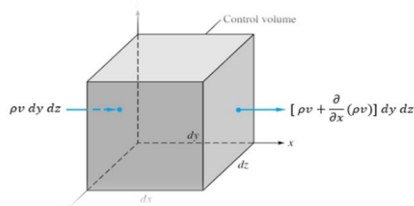
جهت مدل سازی سیال زمانی که چند فاز همزمان در مسئله وجود دارد روش های مختلفی موجود است. چند نمونه از مدل های پر کاربرد به شرح زیر می باشند:

مدل لاگرانژی: در این روش حباب ها با استفاده از مدل سازی مورد بررسی قرار می گیرند. این کار با محاسبه نیروهای وارد شده بر هر حباب انجام می شود. به همین دلیل، محاسبات عددی در هر گام زمانی بسیار طولانی می شود. در واقع در این روش برای سیال همان معادلات ناوراستوکس حل شده و برای حباب ها پس از محاسبه نیروهای وارده، معادلات حرکت آن در طول زمان انتگرال گیری و حل می شود. مدل اویلری: این مدل از روش های کلاسیک ریز کردن مش برای حل معادلات حاکم بر جریان و به دست آوردن شکل حباب ها و نحوه حرکت آنها می پردازد. در این روش مرز مشترک بین از مایع و گاز با استفاده از روش های *volume of fluid* و یا *level-set* استفاده می شود. مدل های هیبریدی: در مدل های هیبریدی، هر دو روش لاگرانژی و اویلری ادغام شده تا روش جدید ابداع شود.

### ۱-۹- معادله لایتهیل

انتشار صوت نیز همانند سایر پدیده های فیزیکی دارای معادلاتی هستند که به کمک آنها می توان نحوه انتشار صوت را با توجه به پارامترهای مختلف مشخص کرد. محققین همواره در تلاش بوده اند تا معادلات حاکم بر صوت و انتشار آن را استخراج نموده و با حل این معادلات، شدت صوت را در مکان و زمان مورد نظر محاسبه نمایند. از نخستین تحقیقاتی که در زمینه تولید و انتشار امواج آکوستیکی انجام شده است، تحقیقات رایلی- استوکس در

قرن ۱۹ میلادی است. آنها در تحقیقات خود با فرض ایده آل بودن جریان و منابع نوسانی جرم و نیرو، روابط خطی آکوستیکی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیقات بعدها توسط لایتهیل در سال ۱۹۵۴ ادامه یافت و نخستین روابط کاربردی برای انتشار صوت استخراج شد. لایتهیل با استفاده از روابط اصلی حاکم بر جریان سیال یعنی روابط پیوستگی و مومنتوم، معادله کلی تولید صوت ناشی از تنش برشی سیال را استخراج کرد [۲۸]. او در این تحقیق تئوری تولید صوت آیرودینامیکی را برای نویز حاصل از انتشار جت در هوا ارائه کرد و نشان داد که صوت تولیدی توسط آشفتگی سیال را می توان با توجه به نوسانات سرعت سیال بدست آورد. این روابط بعنوان مبنای آیروآکوستیک مدرن شناخته می شوند. با توجه به اهمیت و کاربرد این روابط، در این بخش به نحوه استخراج این روابط از معادلات پیوستگی و مومنتوم پرداخته می شود [۲۹]. جریان عمومی  $v_i$  از حجم کنترل مکعب شکلی بصورت زیر عبور می کند.



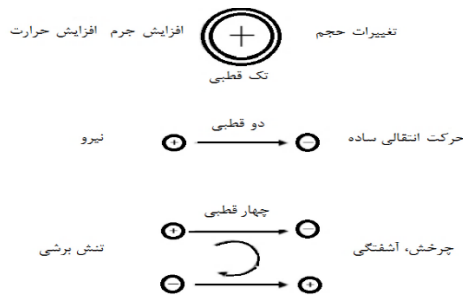
شکل ۱۸- دبی جرمی عبوری از حجم کنترلی در جهت محور  $x$

که دبی جرمی عبوری از آن در جهت محور  $x$  در شکل نشان داده شده است. با نوشتن این دبی جرمی در هر سه راستا و جمع کردن آنها به معادله پیوستگی یا بقای جرم رسیده می شود. برای ناحیه ای از سیال که شامل منبع تولید صوت است. رابطه پیوستگی به شکل زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (10)$$

این معادله شکل عمومی معادله بقای جرم بوده و برای هر دو جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر اعتبار دارد. جمله اول در سمت چپ، نرخ تغییرات چگالی در واحد زمان را بیان می کند و جمله دوم هم بیانگر جریان خالص عبوری از مرزهای المان است که عبارت جابجایی نامیده می شود. در

برای منابع تک قطبی می‌توان به نوسانات حبابهای موجود در سیال و کاویتاسیون اشاره کرد. انتشار صوت از تک قطبی‌ها در همه جهات یکسان است. ترم دوم  $\nabla \cdot \mathbf{f}$  دیورژانس نیروی ناپایای اعمالی به سیال است که در بعضی از شرایط مرزی به سیال بر می‌گردد و به عنوان منبع نويز دو قطبی<sup>۲</sup> عمل می‌کند. منابع دو قطبی به صورت حرکت انتقالی ساده در سیال تغییر مکان می‌دهند. ترم سوم در بردارنده تنش توربولانس در داخل خود سیال است که توسط لایت هیل بدست آمد. وی نشان داد که این نوع منبع دارای خاصیت چهار قطبی<sup>۳</sup> است. چهار قطبی‌ها علاوه بر حرکت انتقالی حرکت چرخشی نیز دارند (شکل ۱۹). تقسیم بندی منابع تک قطبی، دو قطبی و چهار قطبی را به شکل شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۱۹- نمایی از منابع پایه‌ای تولید صوت

در پروانه، نويز حاصل از جابجایی حجم آب و ناشی از برخورد پره‌های پروانه در سیال که به نويز ضخامتی نیز معروف است از نوع تک قطبی است. این نويز که حاصل جابجایی حجمی در سیال است در حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی وجود دارد. کاویتاسیون روی سطح پروانه مانند یک حباب بزرگ در حال نوسان عمل می‌نماید که با نوسانات خود منجر به تغییر در حجم سیال می‌شود. کاویتاسیون نیز از نوع منبع تک قطبی است که با نوسانات در سیال منجر به تولید نويز می‌شود. همچنین اختلاف فشار در قسمت فشاری و مکش پروانه مانند یک چشمه و چاه عمل می‌کند. این اختلاف فشار در قسمت جلو و پشت پروانه که به صورت چشمه و چاه است تحت عنوان یک منبع دو قطبی شناخته می‌شود. منبع دو قطبی نیز در دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی وجود دارد. در حالت

رابطه فوق،  $\rho$  چگالی سیال و  $v$  بردار سرعت در محیط سیال است. همچنین در صورتی که نیروی خارجی به سیال اعمال گردد معادله بقای مومنتوم برای سیال به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma \quad (11)$$

در این رابطه،  $p$  فشار ترمودینامیکی و  $\sigma$  مولفه ویسکوز تنسور تنش کوشی است. سرعت صوت در سیال با  $c$  نمایش داده می‌شود. با در نظر گرفتن یک سری فرضیات دیگر و صرفنظر از ترم گرانش و فرض آکوستیکی کوچک بودن پارامترهای آکوستیک در مقابل پارامترهای سیال رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\rho t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial^2 x_i} = \frac{\partial q'}{\partial t} + \frac{\partial f'_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (12)$$

طرف چپ این رابطه نشان دهنده رابطه خطی انتشار موج برای محیط همگن با سرعت صوت  $c$  بوده و طرف راست آن بیان‌کننده منابع تولید نويز در محیط سیال است. همچنین در این رابطه  $\tau_{ij}$  نمایش دهنده تانسور تنش رینولدز حاصل از جریان توربولانس است. رابطه (۱۲) به رابطه لایت هیل معروف است که دربرگیرنده منابع شار جرم، نرخ نیروی اعمالی و تنش برشی در سیال است. در آکوستیک دریایی بیشتر به جای استفاده از نوسانات چگالی از نوسانات فشار استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان رابطه (۱۳) را با فرض خطی بودن رابطه تنش- کرنش، ثابت بودن سرعت صوت در سیال و صرف نظر کردن از تغییرات مکانی کمیت‌های سیال (فشار، چگالی و دما) به دلیل کوچک بودن آنها به رابطه معادل فشار آکوستیکی تبدیل کرد که در این صورت:

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \ddot{p}' = \dot{q}' + \nabla \cdot \mathbf{f}' + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (13)$$

هر یک از ترم‌های تنسور تنش لایتهیل نشان دهنده یکی از منابع تولید صوت است یعنی ترم اول  $\dot{q}'$  بیان‌کننده تزریق جریان جرمی و یا حجمی غیر پایا به داخل سیال می‌باشد که به عنوان منبع نويز تک قطبی<sup>۱</sup> عمل می‌کند.

<sup>3</sup> Quadruple source

<sup>1</sup> Monopole source

<sup>2</sup> Dipole source

غیرکاویتاسیونی مهمترین منبع تولید نویز پروانه، اختلاف فشار در جلو و عقب پروانه است. نوع دیگر نویز پروانه که به‌خصوص در ماخ‌های کمتر از ۰/۸ قابل صرف‌نظر است [۲۹]، نویز ناشی از اغتشاشات و تنش برشی در سیال است که در واقع به‌صورت دو، دو قطبی که در مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند عمل می‌نماید و به چهار قطبی معروف است.

### ۹-۱-۱- حل معادله لایتهیل

معادله لایتهیل اگرچه مقدار فشار آکوستیکی را بطور دقیق برحسب مشخصه‌های جریان و سیال بیان می‌کند اما حل این معادله جز در موارد خاص قابل دسترس نیست. محققانی که در زمینه آکوستیک فعالیت می‌کرده‌اند همواره سعی در حل کامل این معادله داشته‌اند. یکی از حل‌های ساده تحلیلی که برای معادله لایتهیل ارائه شده است، حل انتگرالی آن است. این روش حل نخستین بار توسط فاکس ویلیامز<sup>۱</sup> و دیوید هاوکینگز<sup>۲</sup> پیشنهاد شد و برای بدست آوردن فشار آکوستیکی در میدان دور دست قابل استفاده است. برای حل انتگرالی معادله (۱۴) که به معادله لایتهیل مشهور است از تابع گرین در دامنه آزاد استفاده می‌شود. بر اساس این روش، حل انتگرالی معادله لایتهیل بصورت زیر نوشته می‌شود:

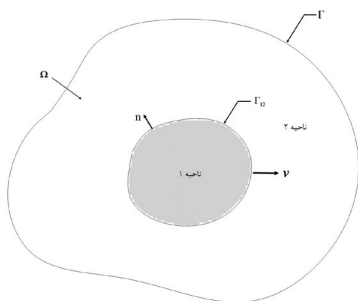
$$\rho(x, t) = \frac{1}{4\pi c^2} \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{|x-y|} \quad (14)$$

که در این رابطه دامنه انتگرال گیری روی حجم است که آشفتگی در آن باعث ایجاد نویز می‌گردد. این دامنه باید دربرگیرنده تمامی منابع تولید نویز باشد. همچنین  $x$  و  $y$  به ترتیب بردارهای مکان گیرنده نویز و منبع نویز می‌باشند. عبارت درون انتگرال معادله فوق باید در زمان چشمه<sup>۴</sup> محاسبه شود. از آنجا که فواصل بین منابع صوت و گیرنده یعنی  $|x-y|$  متفاوت است، زمان رسیدن صوت به گیرنده از منابع مختلف با هم یکسان نیست. به همین دلیل مقدار زمانی  $\frac{|x-y|}{c}$  به اندازه  $t$  از زمان کم می‌شود. با حل این انتگرال، تغییرات چگالی در مکان  $x$  و زمان  $t$  بدست می‌آید. معادله انتگرالی که در این بخش برای معادله

لایتهیل ارائه شد با این فرض بدست آمده است که هیچ گونه صفحه صلبی در مسیر جریان وجود ندارد [۲۹]. لذا برای حل آکوستیک پروانه، از معادله بهبود یافته‌ی لایت هیل استفاده می‌شود که در بخش بعد به این موضوع پرداخته شده است.

### ۹-۲- معادله FW-H

در اکثر مسائل آکوستیک، صفحات صلب واقع شده در مسیر جریان سیال اثرات بسیار مهمی بر روی نویز تولید شده دارند. درک این واقعیت در تحلیل صحیح نویز پروانه‌ها و فن‌ها بسیار مهم و حیاتی است. با توجه به این موضوع، ویلیامز و هاوکینگز روابط ساده شده بخش قبل را برای حالت وجود صفحات صلب توسعه دادند. معادلات ارائه شده توسط این محققین در علم آکوستیک به مدل FW-H 1 معروف شده است. اولین گام در رسیدن به مدل FW-H، توسعه معادله لایتهیل برای فضای نامحدودی است که توسط یک سری از صفحات ریاضی به بخشهای مختلف تقسیم شده است. مطابق شکل (۲۰) میدان  $\Omega$  که با صفحه  $\Gamma$  احاطه شده، توسط صفحه  $\Gamma_{12}$  به دو ناحیه ۱ و ۲ تقسیم شده است. فرض می‌شود صفحه  $\Gamma_{12}$  با سرعت  $v$  درون ناحیه ۲ حرکت می‌کند که در واقع شبیه به حرکت پروانه در آب است [۳۰].



شکل ۲۰- تقسیم ناحیه  $\Omega$  به دو ناحیه ۱ و ۲ [۳۰]

به دلیل ناپیوستگی که در محل صفحه  $\Gamma_{12}$  بوجود آمده است معادلات پیوستگی و مومنوم به ترتیب به صورت زیر بازنویسی می‌گردد [۳۰]:

<sup>1</sup> Ffowcs Williams- Hawkins (FW-H)

<sup>1</sup> Ffowcs Williams

<sup>2</sup> David Hawkings

### ۱-۲-۹- حل معادله FW-H

برای حل معادله FW-H، فراست و همکاران روشی را ارائه کردند که می‌تواند نویز ناشی از حرکت یک جسم با هندسه دلخواه را پیش بینی کند [۳۲]. این فرمولاسیون به  $1A$  معروف است. آنها در این روش با بردن مشتق زمانی به داخل انتگرال، رابطه قبل را ساده‌تر کردند و با فرض ثابت بودن مکان گیرنده، مشتق زمانی را بصورت زیر تغییر دادند:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Big|_x = \left( \frac{1}{1-M_r} \frac{\partial}{\partial \tau} \Big|_x \right)_{ret} \quad (19)$$

در این رابطه،  $M$  بردار عدد ماخ،  $r$  بردار بین منبع و گیرنده صوت و  $M_r$  تصویر بردار  $M$  بر روی بردار  $r$  و همچنین  $ret$  نشان دهنده زمان لازم برای انتشار نویز است. با صرفنظر کردن از منابع چهار قطبی، فشار آکوستیکی کل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\hat{P}(x, t) = P'_T(x, t) + P'_L(x, t) \quad (20)$$

در واقع، فشار آکوستیکی کل به دو مؤلفه فشار ضخامت<sup>۱</sup>  $P'_T$  و فشار بارگذاری<sup>۲</sup>  $P'_L$  تقسیم می‌شود. این مؤلفه‌ها از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$(21)$$

$$4\pi P'_T(x, t) = \int \left[ \frac{\rho v_n}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int \left[ \frac{\rho v_n (r M_i r_i + c M_r - c M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS$$

$$4\pi P'_L(x, t) = \int \left[ \frac{\dot{p} \cos \theta}{cr(1-M_r)^2} + \frac{\dot{r} i M_i \rho \cos \theta}{r(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS + \int \left[ \frac{p(\cos \theta - M_i n_i)}{r^2 (1-M_r)^2} + \frac{(M_r - M^2) \rho \cos \theta}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (22)$$

دو معادله (۲۰ و ۲۱) در معادله (۲۱) برای بدست آوردن فشار آکوستیکی قرار می‌گیرند.

در این روابط،  $v_n$  مشتق زمانی  $v_n$ ،  $M_i$  مشتق زمانی عدد ماخ مربوط در یک نقطه ثابت،  $\theta$  زاویه محلی بین بردار عمود بر سطح و جهت انتشار،  $p$  فشار نسبی روی سطح،  $\dot{p}$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \rho v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j + \bar{P}_{ij})}{\partial x_i} = P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (16)$$

در رابطه فوق،  $v_i$  سرعت صفحه و  $f$  تابع نمایش‌دهنده وجود صفحه است. طبق قرارداد، ناحیه داخل صفحه با  $f < 0$ ، ناحیه خارج از صفحه با  $f > 0$  و خود صفحه با  $f=0$  مشخص می‌شود. همچنین  $\delta(f)$  تابع دلتای یک بعدی است که بر روی صفحه  $f=0$  مقدار آن ۱ و خارج از صفحه مقدار آن صفر است. برای رسیدن به معادله FW-H، از معادلات پیوستگی و مومنتوم به ترتیب نسبت به زمان و مکان مشتق گرفته و معادلات حاصل از هم کسر می‌شود. با تغییر متغیر به نوسانات چگالی  $\rho'$ ، معادله FW-H به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$(17)$$

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\rho t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial^2 x_i} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]$$

حل انتگرالی این معادله برای نوسانات چگالی بصورت زیر بدست می‌آید [۳۱]:

$$(18)$$

$$\begin{aligned} \rho(x, t) &= \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{|x-y|} dy \\ &- \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{P_{ij} n_j(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{|x-y|} dy \\ &+ \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\rho_0 v_n}{|x-y|} dy \end{aligned}$$

همانگونه که مشخص است این معادله علاوه بر اثرات آشفته‌گی جریان، نوسانات فشار و اثرات حرکت صفحات صلب را نیز بعنوان منابع تولید صوت در نظر می‌گیرد. جملات سمت راست این معادله به ترتیب از چپ به راست، منبع نویز چهارقطبی، دوقطبی و تک‌قطبی می‌باشند. در اعداد ماخ کمتر از ۱، منبع چهارقطبی مقدار بسیار کمتری نسبت به منابع دوقطبی و تک‌قطبی دارد و می‌توان از آن صرفنظر کرد [۳۰].

<sup>2</sup> Loading Pressure

<sup>1</sup> Thickness Pressure

[7] S. Sezen, T. Cosgun, A. Yurtseven, and M. Atlar, "Numerical investigation of marine propeller underwater radiated noise using acoustic analogy Part 2: The influence of eddy viscosity turbulence models," *Ocean Engineering*, vol. 220, p. 108353, 2021.

[8] G. Ku, J. Cho, C. Cheong, and H. Seol, "Numerical investigation of tip-vortex cavitation noise of submarine propellers using hybrid computational hydro-acoustic approach," *Ocean Engineering*, vol. 238, p. 109693, 2021.

[9] D. Noble, N. Sponagle, and L. Leggat, "DREA propeller cavitation research," UNCLASSIFIED L1~\* Rb~ t I, p. 421, 1987.

[10] J.-H. Kao, "An inverse tracing method (ITM) to solve the radiating noise induced by the marine propeller sheet cavitation with experimental verifications," *Ocean Engineering*, vol. 234, p. 109240, 2021.

[11] A. Ebrahimi, A. Razaghian, A. Tootian, and M. Seif, "An experimental investigation of hydrodynamic performance, cavitation, and noise of a normal skew B-series marine propeller in the cavitation tunnel," *Ocean Engineering*, vol. 238, p. 109739, 2021.

[12] G. Dubbioso, R. Muscari, F. Ortolani, and A. Di Mascio, "Numerical analysis of marine propellers low frequency noise during maneuvering," *Applied Ocean Research*, vol. 106, p. 102461, 2021.

[13] W.-S. Choi et al., "Time domain broadband noise predictions for non-cavitating marine propellers with wall pressure spectrum models," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 13, pp. 75-85, 2021.

[14] G. Tani et al., "Noise measurements of a cavitating propeller in different facilities: Results of the round robin test programme," *Ocean Engineering*, vol. 213, p. 107599, 2020.

[15] C. Park, G. Do Kim, G.-T. Yim, Y. Park, and I. Moon, "A validation study of the model test method for propeller cavitation noise prediction," *Ocean Engineering*, vol. 213, p. 107655, 2020.

[16] J.-H. Kao and Y.-J. Lin, "Predicting the dipole noises of the marine propeller with verifications by experimental measurements," *Ocean Engineering*, vol. 209, p. 107451, 2020.

[17] A. Ebrahimi, A. Razaghian, M. Seif, F. Zahedi, and A. Nouri-Borujerdi, "A comprehensive study on noise reduction methods of marine propellers and design

مشفق فشار نسبت به زمان  $\dot{p} = \frac{\partial p}{\partial \tau}$  و  $n_i$  کسینوس جهت است.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

پدیده‌کاویتاسیون یکی از مسائل مهم در طراحی پروانه شناور است زیرا در صورت وقوع این پدیده ناخواسته ضمن کاهش راندمان، نیروی تراست و مزایای آکوستیکی پروانه، کشتی دچار فرسودگی می‌شود و در برخی موارد صدمات جبران‌ناپذیری می‌بیند. ورتکس نوک پره پروانه را می‌توان یکی از قوی‌ترین منابع تولید نویز، کاهش تراست و راندمان و عامل ارتعاشات القایی روی شدت معرفی کرد که با بهینه‌سازی نوک پره اعمال میزان سطح نویز را می‌توان تا حد مطلوبی کاهش داد. لذا بایستی فاکتورهای هندسی تأثیرگذار بر روی هندسه نوک پره برای رسیدن به این مهم بهینه گردند. با توجه به اینکه پروانه‌ها و پیشران‌های دریایی در سطح دنیا دوران رشد و تکامل خود را می‌گذرانند تحقیق و پژوهش بر روی آنها به جهت بهینه‌سازی هندسه آنها به‌منظور حذف یا کاهش پدیده‌کاویتاسیون و بهبود خواص آکوستیکی کارساز خواهد بود.

#### ۱۱- مراجع

[1] H.v. Helmholtz, "Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen," 1858.

[2] D. Ross and W. Kuperman, "Mechanics of underwater noise," Ed: Acoustical Society of America, 1989.

[3] G.V. Frisk, "Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends," *Scientific reports*, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, 2012.

[4] E. Weitendorf, "On the history of propeller cavitation and cavitation tunnels," in *Fourth International Symposium on Cavitation*, 2001: California Institute of Technology Pasadena.

[5] Y. Wang, K. Wang, and M. Abdel-Maksoud, "noiseNet: A neural network to predict marine propellers' underwater radiated noise," *Ocean Engineering*, vol. 236, p. 109542, 2021.

[6] S. Sezen, D. Uzun, R. Ozyurt, O. Turan, and M. Atlar, "Effect of biofouling roughness on a marine propeller's performance including cavitation and underwater radiated noise (URN)," *Applied Ocean Research*, vol. 107, p. 102491, 2021.

cavitating tip-vortical flows around an elliptical hydrofoil: Interplay of cavitation, vortices, and turbulence," *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 9, p. 093316, 2021.

[30] P. Pennings, J. Bosschers, J. Westerweel, and T. Van Terwisga, "Dynamics of isolated vortex cavitation," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 778, pp. 288-313, 2015.

[31] L. Davidson, "Transport equations in incompressible URANS and LES," in *Publication 2006/01*, Chalmers University of Technology, 2006.

[32] P. Pennings, J. Westerweel, and T. van Terwisga, "Cavitation tunnel analysis of radiated sound from the resonance of a propeller tip vortex cavity," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 83, pp. 1-11, 2016.

procedures," *Applied Acoustics*, vol. 150, pp. 55-69, 2019.

[18] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann, 2018.

[19] S.R. Bistafa, "Investigation of a water turbine built according to Euler's proposals (1754)," *arXiv preprint arXiv: 2108.12048*, 2021.

[20] R. M. C. Pty, *Reducing underwater noise pollution from large commercial vessels*. International Fund for Animal Welfare, 2009.

[21] G. Zhang, D. Zhang, M. Ge, M. Petkovšek, and O. Coutier-Delgosha, "Experimental investigation of three distinct mechanisms for the transition from sheet to cloud cavitation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 197, p. 123372, 2022.

[22] P. Rosales-Pelaez, I. Sanchez-Burgos, C. Valeriani, C. Vega, and E. Sanz, "Seeding approach to nucleation in the NVT ensemble: The case of bubble cavitation in overstretched Lennard Jones fluids," *Physical Review E*, vol. 101, no. 2, p. 022611, 2020.

[23] M. Fukushima, K. Fukuda, and T. Tachikawa, "Research of Root Cavitation Erosion," in the 9th Conference on Computational Methods in Marine Engineering (Marine 2021), 2022.

[24] E. Kadivar, M. V. Timoshevskiy, M. Y. Nichik, O. El Moctar, T. E. Schellin, and K. S. Pervunin, "Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 5, p. 052108, 2020.

[25] A. Peters, "Numerical Modelling and Prediction of Cavitation Erosion Using Euler-Euler and Multi-Scale Euler-Lagrange Methods," *Dissertation*, Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, 2019, 2020.

[26] M. van Rijsbergen, "A review of sheet cavitation inception mechanisms," in 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 2016.

[27] B. Aktas et al., "Propeller cavitation noise investigations of a research vessel using medium size cavitation tunnel tests and full-scale trials," *Ocean engineering*, vol. 120, pp. 122-135, 2016.

[28] H. Yang, S. Shen, X. Yao, M. Sheng, and C. Wang, "Competitive deep-belief networks for underwater acoustic target recognition," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 952, 2018.

[29] C. Xie, J. Liu, J.-W. Jiang, and W.-X. Huang, "Numerical study on wetted and