

# تحلیل آکوستیکی پیشرانه‌های نوین زیر سطحی‌های بدون پروانه:

## مروری بر عملکرد و نویز

علی باقری فهرجی

پژوهشگر

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع

امام حسین (ع)

[ali.bagheri@ihu.ac.ir](mailto:ali.bagheri@ihu.ac.ir)

محمد رضا نجفی\*

استادیار

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع

امام حسین (ع)

[drmrnajafi@ihu.ac.ir](mailto:drmrnajafi@ihu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۵

### چکیده

با توجه به اهمیت فزاینده اختفای ربات‌ها و روندهای زیر سطحی در محیط‌های زیر آب، توسعه پیشرانه‌هایی با نویز آکوستیکی پایین به منظور جلوگیری از شناسایی توسط سامانه‌های سوناری، به یک نیاز راهبردی در حوزه هیدروآکوستیک تبدیل شده است. از آنجا که نویز آکوستیکی ناشی از پروانه‌ها، به عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی ربات‌های زیر سطحی شناخته می‌شود، در این مقاله به بررسی چهار نوع پیشرانش غیر پروانه‌ای رایج شامل پیشرانه‌های آکوستیکی، زیست تقلیدی، واتر جت و لیزری از منظر عملکرد، مزایا، چالش‌ها و ویژگی‌های آکوستیکی پرداخته شده است. هدف این مطالعه، ارزیابی روش‌های جایگزین برای سیستم‌های پیشرانش پروانه‌ای با نویز قابل کنترل است. پیشرانه‌های آکوستیکی، به واسطه ساختار ساده و تولید نویز ذاتی بسیار پایین، برای کاربردهای مینیاتوری و زیست محیطی مناسب هستند. پیشرانه‌های زیست تقلیدی نیز با الهام از سامانه‌های حرکتی موجودات دریایی، قابلیت مانور پذیری بالا و تولید نویز آکوستیکی کم‌تری را ارائه می‌دهند و به ویژه در کاربردهای پنهان کارانه و نظامی اهمیت ویژه‌ای دارند. در پیشرانه‌های واتر جت، به دلیل وجود مجرا، شکل‌گیری گردابه‌های قوی در نوک پره‌ها محدودتر می‌شود و حباب‌های کاویتاسیون نیز دیرتر شکل می‌گیرند یا کوچک‌تر باقی می‌مانند و بنابراین، به طور طبیعی از پروانه‌ها، بی‌صداتر عمل می‌کنند. پیشرانه‌های لیزری نیز با حذف قطعات مکانیکی متحرک، پتانسیل توسعه اختفای در زیر سطح را دارند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هر یک از این فناوری‌ها، بسته به مقیاس و سناریوی کاربرد، قابلیت به‌کارگیری مستقل یا ترکیبی در پیشرانه‌های نوین زیر سطح را دارا هستند.

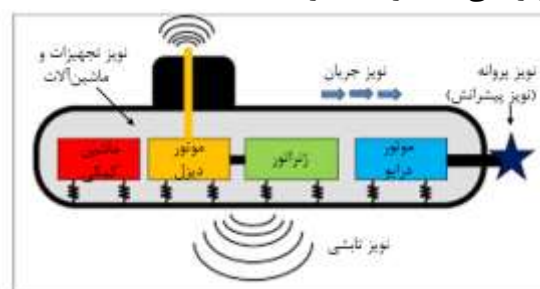
**واژگان کلیدی:** پیشرانه کم نویز، زیست تقلید، پیشرانه لیزری، نویز آکوستیکی، پروانه، واتر جت، هیدروآکوستیک

\* نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

مهم‌ترین عامل شناسایی در زیر سطح آب، نویز آکوستیکی است. امواج صوتی به دلیل ویژگی‌های خاص انتقال در محیط‌های زیر آب، به عنوان اصلی‌ترین ابزار شناسایی و موقعیت‌یابی استفاده می‌شوند. این نویز آکوستیکی به ویژه توسط سامانه‌های زیرسطحی همچون ربات‌ها و وسیله‌های خودران زیرسطحی تولید می‌شود که این امر می‌تواند موقعیت آن‌ها را نشان دهد. یکی از منابع اصلی تولیدی این نویز، سیستم‌های پیشران آن‌هاست [1]. این سیستم‌ها معمولاً امواج صوتی و ارتعاشاتی تولید می‌کنند که توسط سامانه‌های شناساگر هیدروآکوستیکی همچون سونارها قابل شناسایی است. بنابراین، مطالعه راهکارهای کاهش نویز ناشی از سیستم‌های پیشران و جایگزینی آن‌ها با سیستم پیشران‌های کم‌نویز، برای بهبود پنهان‌کاری و جلوگیری از شناسایی سامانه‌ها در محیط زیرسطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نویز زیرآبی یک شناور به طور کلی از سه منبع اصلی پدید می‌آید: نویز تجهیزات و ماشین‌آلات (مانند موتور و پمپ‌ها)، نویز هیدرودینامیکی جریان آب پیرامون بدنه و نویز ناشی از سامانه‌ی پیشران آن [2]. مطالعات نشان داده است که نویز پروانه معمولاً سهم غالب را در نویز کلی منتشرشده دارد.



شکل ۱. منابع نویز زیرآبی یک شناور [3]

با پیشرفت فناوری‌های کاهش ارتعاشات و عایق‌سازی، شدت نویز مکانیکی ماشین‌آلات تا حد مطلوبی کنترل شده و طراحی‌های نوین بدنه نیز به کاهش نویز هیدرودینامیکی کمک کرده‌اند [4]. اما نویز ناشی از

پروانه همچنان به عنوان یکی از چالش‌های اصلی باقی مانده است. به ویژه در شناورهای نظامی، نویز پروانه اغلب آشکارترین سرخ برای شناساگرهای آکوستیکی است و از این جهت، بررسی سایر سیستم‌های پیشران غیر پروانه‌ای از منظر آکوستیکی، تأثیر مستقیم بر امنیت عملیات این شناورها دارد.

با افزایش اهمیت استراتژیک توسعه دریایی، به ربات‌های زیرسطحی به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها برای اکتشاف و بهره‌برداری از منابع دریایی، توجه ویژه‌ای شده است [1]. ربات‌های زیرسطحی نه تنها باید با محیط‌های پیچیده سازگار باشند، بلکه به قابلیت پنهان‌کاری آکوستیکی و کارایی بالا نیز نیاز دارند [2-4].

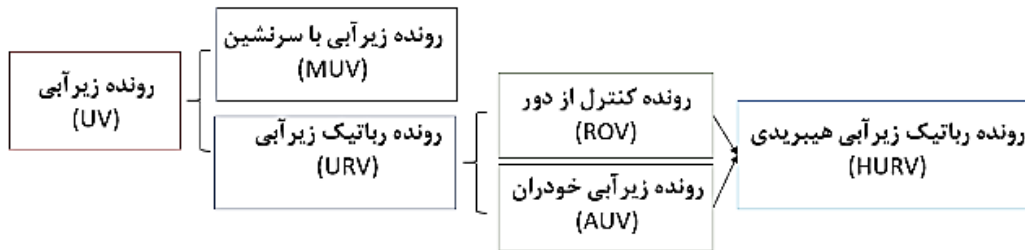
نویز زیرآب می‌تواند بر عملکرد پنهان‌کاری ربات‌های زیرسطحی اثر مستقیم بگذارد و عامل تعیین‌کننده در آشکارسازی آن‌ها باشد. همچنین نویز انتقال‌یافته به آب‌های اطراف می‌تواند به زندگی آبزیان آسیب برساند و از این‌رو مورد توجه نهادهای بین‌المللی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، سازمان بین‌المللی دریانوردی و کمیته حفاظت محیط زیست دریایی خواستار وضع مقرراتی برای محدودسازی سطح نویز در دریا شده‌اند [5].

بنابراین این ربات‌ها نقش مهمی در توسعه‌های آینده دریایی و فعالیت‌های مخفی زیر آب ایفا می‌کنند و از ارزش بالقوه بالایی برخوردارند [8]، [7]، [6]. در شکل ۲ انواع مختلفی از ربات‌های زیرسطحی از جمله زهپاد<sup>۱</sup> (ROV) [9] و شهپاد<sup>۲</sup> (AUV) [10] که برای مأموریت‌های زیرآب طراحی شده‌اند قابل مشاهده است.

یکی از فناوری‌های کلیدی در توسعه ربات‌های دریایی، سیستم‌های پیشران هستند که در حال حاضر، سیستم‌های پیشران با پروانه [11] بیشترین کاربرد را دارند. با این حال، این پیشران‌ها همواره با چالش‌هایی مانند کابیناسیون، خوردگی، لرزش زیاد و

در مجموع با نويز آکوستيکی بالا مواجهه اند [12]، [13]. اين محدودیت‌ها انگیزه‌ای قوی برای پژوهش در پیشرانه‌های نوین زیرسطحي ایجاد کرده و توسعه یک

سیستم پیشرانش بدون پروانه و با نويز کم، به یکی از موضوعات ویژه تحقیقات علمی تبدیل شده است.



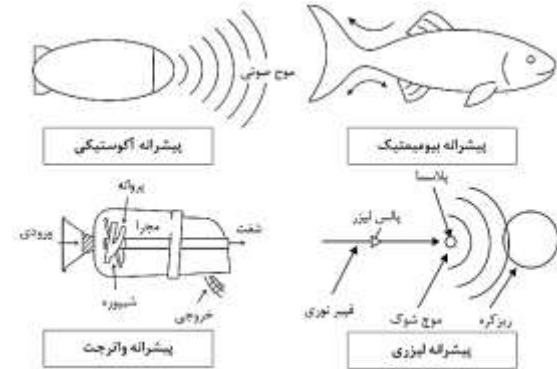
شکل ۲. انواع رونده و ربات‌های زیرسطحي [14]

چگالی توان بالا و حرکت تقریباً بی‌صدا را فراهم می‌کند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای مأموریت‌هایی با قابلیت پنهان‌کاری آکوستيکی و بصري تبدیل می‌کند. همچنین سیستم پیشرانش زیست‌تقلید، نوعی دیگر از سیستم‌های پیشرانش است که از حرکات موجودات دریایی تقلید شده است و ارگان‌های حرکتی آن‌ها را شبیه‌سازی می‌کند [22]. سرعت بالا، پنهان‌کاری زیاد، قابلیت مانور خوب و توانایی تطبیق با محیط پیچیده اقیانوسی، از ویژگی‌های پیشرانش زیست‌تقلید است [23].

در سال‌های اخیر یکی از دستاوردهای فناورانه برای بهبود عملکرد و کاهش مشکلات پروانه‌ها، طراحی پیشرانه‌های موسوم به واترجت بوده است. واترجت‌ها فناوری نوینی در رانش زیردریایی هستند که نیروی رانش آن‌ها از پرتاب آب پرفشار تامین می‌شود. این نوع رانش به دلیل ساختار ساده، تلفات انرژی کمتر در قیاس با سیستم‌های مرسوم و امکان کنترل برداری<sup>۶</sup> آسان مورد توجه است.

همچنین در زمینه پیشرانه‌های لیزری زیر آب نیز، فقدان قطعات مکانیکی متحرک می‌تواند منجر به کاهش نويز مکانیکی در مقایسه با سامانه‌های سنتی شود [24]. بنابراین مطالعه و توسعه فناوری پیشرانش لیزری، همانند پیشرانه‌های آکوستيکی، واترجت و

بدین منظور پیشرانه‌هایی بر پایه‌ی آکوستیک [15]، زیست‌تقلید<sup>۲</sup> [16]، واترجت [17] و لیزر [18] پیشنهاد شده‌اند که در این مقاله به بررسی آن‌ها از جنبه‌های مختلف آکوستيکی پرداخته می‌شود.



شکل ۳. شماتیک انواع پیشرانه زیرسطحي

پیشرانه‌های آکوستيکی زیر آب، به عنوان نیروی واکنشی ناشی از نیروی محرکه‌ی هیدروآکوستيکی مورد توجه قرار گرفته است [19]. سیستم‌های پیشرانه هیدروآکوستيکی، مبتنی بر امواج صوتی سطحی<sup>۴</sup> (SAW) و امواج صوتی حجمی<sup>۵</sup> (BAW) برای ربات‌های در مقیاس کوچک معرفی شده‌اند [20]. در سیستم‌های پیشرانه هیدروآکوستيکی، می‌توان از فرکانس‌های بالا برای دستیابی به کوچک‌سازی و چگالی توان بالا استفاده کرد [21]. به‌کارگیری فرکانس‌های بالا در این پیشرانه‌ها، امکان کوچک‌سازی،

زیست‌تقلید، نه تنها از جنبه کارایی، بلکه از منظر بررسی قابلیت پنهان‌کاری آکوستیکی نیز حائز اهمیت است.

## ۲. پیش‌رانه هیدروآکوستیکی

در ربات‌های مینیاتوری زیرسطح، تنها گزینه معمول استفاده از پیش‌رانه‌های هیدروآکوستیکی است. چرا که کارایی پروانه‌ها در این ابعاد بسیار پایین بوده و گشتاور تولیدی آن‌ها موجب عدم پایداری وسیله می‌شود [25]. همچنین موتورهای الکترومغناطیسی سنتی به دلیل نیاز به اجزای انتقال مکانیکی و حساسیت به تداخلات الکترومغناطیسی، محدودیت‌هایی دارند. در مقابل، پیش‌رانه‌های آکوستیکی به دلیل نویز آکوستیکی کم، ابعاد کوچک و ساختار ساده‌تر، گزینه‌ای جذاب برای جایگزینی هستند [26].

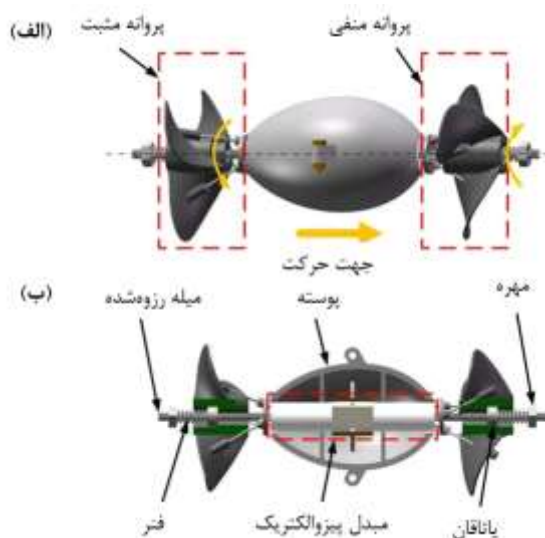
این روش‌ها، به جای پروانه مکانیکی، موج صوتی در سیال ایجاد می‌شود تا جریان پیش‌ران ایجاد کند [27]. این مکانیزم به دلیل فقدان قطعات متحرک، پتانسیل بالایی در کاهش نویز مکانیکی دارد و از این رو برای ربات‌های کوچک و اهداف پنهانی زیرسطحی، بسیار مناسب است [18].

## ۲-۱. طبقه‌بندی فناوری‌های پیش‌رانه آکوستیکی

پیش‌رانه‌های آکوستیکی زیرآبی عموماً بر اصل جریان آکوستیکی<sup>۷</sup> در سیال متکی هستند که طی آن میرایی انرژی صوتی در یک سیال ویسکوز، سبب ایجاد جریان پایای سیال می‌شود. اگر یک منبع صوتی پرفشار در داخل آب قرار گیرد، نیروی پسای ناشی از این جریان آکوستیکی می‌تواند ماده مولد صوت را طبق قانون سوم نیوتن، در جهت مخالف جریان به جلو براند. در پیش‌رانه‌های آکوستیکی از همین اصل برای ایجاد نیروی رانش استفاده می‌شود و چند رویکرد مختلف را می‌توان برشمرد:

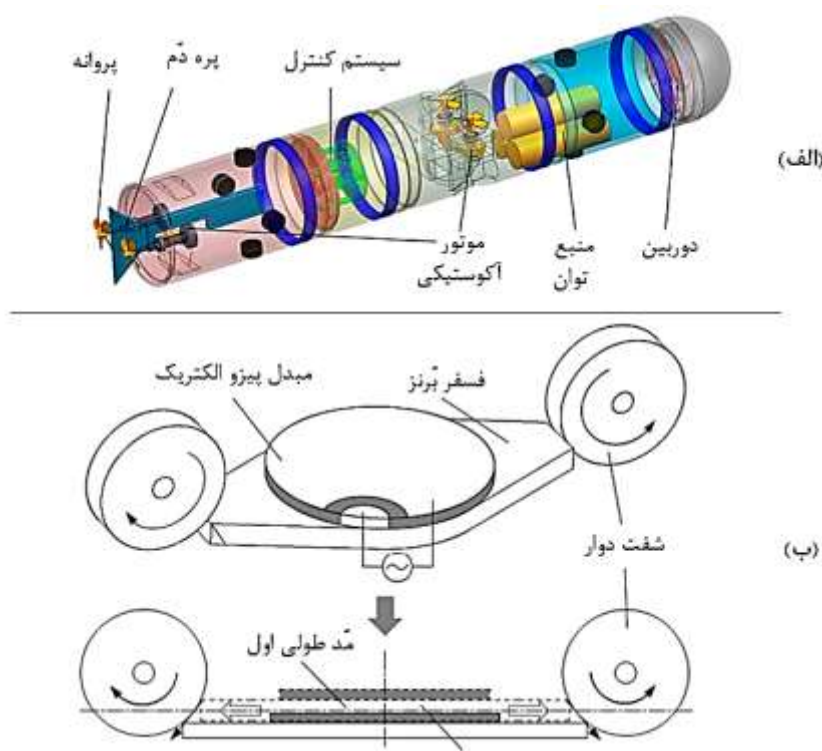
## ۲-۱-۱. پیش‌رانه پیزوالکتریک با پروانه

در این روش، از عنصر پیزوالکتریک مانند PZT برای ایجاد ارتعاش استفاده می‌شود که به یک پروانه کوچک متصل است. در این حالت می‌توان نشان داد که یک دیسک پیزوالکتریک را در مود تشدید تک‌حالته به کار انداخت تا پروانه‌ای را در زیرآب به حرکت درآورد و نیروی پیش‌ران<sup>۸</sup> ایجاد کند<sup>۹</sup> [28].

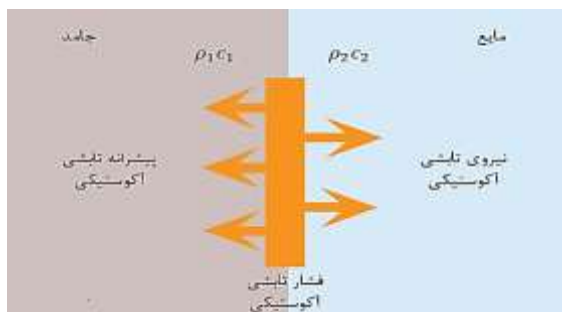


شکل ۴. پیکربندی یک نمونه پیش‌رانه پیزوالکتریک با پروانه (الف) پیکربندی (ب) نمایش برش خورده [28]. این سیستم به عنوان یک پیش‌رانه پیزوالکتریک زیرسطحی معرفی می‌شود. اما ترکیب بازده محدود مبدل PZT با بازده پایین پروانه در ابعاد کوچک، منجر به اتلاف انرژی قابل توجه و راندمان کلی پایین می‌شود [29]. به عبارتی، این روش هنوز مشکلات پروانه (بازده کم در مقیاس کوچک و نویز ناشی از پروانه) را کاملاً حذف نکرده است و صرفاً منبع انرژی چرخش پروانه را تغییر داده است.

اخیراً یک موتور آکوستیکی فراصوت دو روتوره نوین، طراحی، ساخته و آزمایش شده است که برای پیش‌ران ربات‌های زیر آب کوچک<sup>۱۰</sup> مناسب است. این موتور به دلیل داشتن دو شفت خروجی و ساختار فشرده، می‌تواند نیروی پیش‌ران مؤثرتری را برای ربات‌های زیر آب فراهم کند [30].



شکل ۴. الف) ساختار شماتیک و ب) اصول عملکرد یک ربات زیرسطحی با موتور اولتراسونیک دو روتوره [30]



شکل ۵. تابش نیروی محرکه آکوستیکی از سطح

مرزی به داخل مایع [32]

به موازات آن، نیروی عکس‌العمل این نیرو، به طور هم‌زمان بر خود مبدل جامد اعمال می‌گردد. این دو نیرو در مرز جامد- مایع به عنوان یک زوج کنش و واکنش عمل کرده و اساس تولید رانش در این نوع پیشرانه را تشکیل می‌دهند [33].

پژوهش‌های متعددی برای ساخت پیشرانه‌ای بدون پروانه، با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک صورت

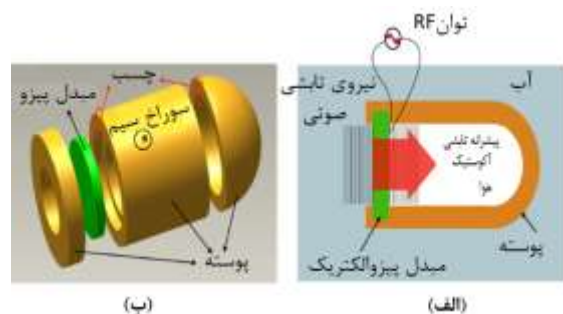
این نوع از پیشرانه هیدروآکوستیکی در حال حاضر بیشتر در مقیاس کوچک و برای کاربردهایی مانند ربات‌های کاوشگر کوچک یا ماهیچه‌های مصنوعی زیرآبی در دست توسعه پژوهشی است [31].

### ۲-۱-۲- پیشرانه‌های فراصوتی بدون قطعه متحرک

در سامانه‌های هیدروآکوستیکی، هنگامی که یک مایع بر روی مبدل اولتراسونیک قرار می‌گیرد، در مرز بین جامد (مبدل) و مایع، فشار تابشی آکوستیکی ایجاد می‌شود. این پدیده به دلیل تفاوت در امپدانس آکوستیکی دو محیط رخ می‌دهد [21]. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نیروی محرکه آکوستیکی از سطح مرزی به داخل مایع تابش می‌کند.

گرفته است. برای نمونه، آلیسون و همکاران مفهوم پیشرانش التراسونیک را معرفی کردند [34]. این پیشرانه‌ها معمولاً از دیسک‌های پیزوالکتریک استفاده می‌کنند که در یک فرکانس فراصوت مرتعش شده و امواج صوتی در آب منتشر می‌کنند. تضعیف این امواج در نزدیکی منبع، باعث ایجاد جریان پایدار در آب می‌شود که نقش نیروی رانش را دارد. مزیت این رویکرد، حذف کامل پروانه و قطعات مکانیکی است [21]. بدین ترتیب این پیشرانه اساساً یک پمپ آکوستیکی است. نمونه دیگر، پمپ مکش التراسونیک بدون قطعه متحرک است که هاسگاوا و همکاران توسعه دادند [35]. آن‌ها نشان دادند که می‌توان تنها با نیروی صوت، سیال را جابجا کرد. با این حال، چالش عمده پیشرانه‌های آکوستیکی مبتنی بر مبدل‌های پیزوالکتریک، دستیابی به راندمان بالا و نیروی رانش کافی است و به همین دلیل، کاربردشان را محدود به ربات‌های کوچک می‌کند.

برای ایجاد نیروی پیشرانه جهت‌دار، نمونه‌ای اولیه از ربات زیرسطحی طراحی شده که شامل یک حفره‌ی هوایی در یک سمت مبدل است. این طراحی به ایجاد شرایط نامتعادل در اعمال فشار تابشی کمک می‌کند و حرکت در جهت خاصی را ممکن می‌سازد (شکل ۶).



شکل ۶. نمونه اولیه یک رونده با پیشرانه

آکوستیکی [20]

## ۲-۱-۳. پیشرانه موج صوتی سطحی

فناوری موج آکوستیکی سطحی یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای ایجاد امواج فراصوت با فرکانس بسیار بالا از مرتبه مگاهرتز است. در این فناوری از کریستال‌های پیزوالکتریک مانند نیوبات لیتیم<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود که می‌توانند موج صوتی را در سطح کریستال ایجاد کنند. در چنین سیستم‌هایی، نیروی محرکه آکوستیکی توسط مبدل‌های اولتراسونیک تولید می‌شود و از منظر دینامیکی، به صورت نیروی تابشی صوتی یا جریان آکوستیکی تفسیر می‌گردد [36]. این موج سطحی هنگام ورود به آب، به علت فرکانس بسیار بالا، یک جریان آکوستیکی قوی ایجاد می‌نماید. یکی از ویژگی‌های کلیدی SAW این است که می‌تواند شتاب‌های بسیار بزرگی به سیال بدهد که با هیچ روش دیگری در این ابعاد قابل عملیاتی نیست [37]. این قابلیت، غالباً در حوزه میکروفلوئیدیک برای پمپاژ سیالات، مخلوط‌سازی و جداسازی ذرات به کار گرفته می‌شود [38]. کاربرد SAW در پیشرانش زیرسطحی، اولین بار توسط بورکن و کوپر [39] بررسی شد که توانستند با چسباندن یک تراشه SAW به یک قایق کوچک، آن را روی آب به حرکت درآورند و نشان دادند که اصل جریان آکوستیکی می‌تواند به حرکت ماکروسکوپی منجر شود.

اخیراً ژانگ و همکاران [40] جزئیات یک پیشرانه SAW زیرسطحی را کمی‌سازی کرده‌اند. آن‌ها یک تراشه نیوبات لیتیم با فرکانس کاری ۴۰ مگاهرتز ساختند و آن را درون آب معلق کردند تا نیروی رانش آن را اندازه‌گیری کنند. به کمک این روش، آونگ برای توان ورودی ۵ وات، نیروی رانشی در حدود ۱/۵ میلی‌نیوتن اندازه‌گیری شد. اگرچه این نیرو کوچک به نظر می‌رسد، اما با توجه به حجم بسیار کوچک تراشه، قابل توجه بوده و معادل چگالی نیرویی در حدود 60 کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد. شکل طرح این سیستم را نشان می‌دهد.

بدون پروانه اصولاً تنها نویزی که تولید می‌کند، نویز ناشی از ارتعاش خود در سیال است [41].

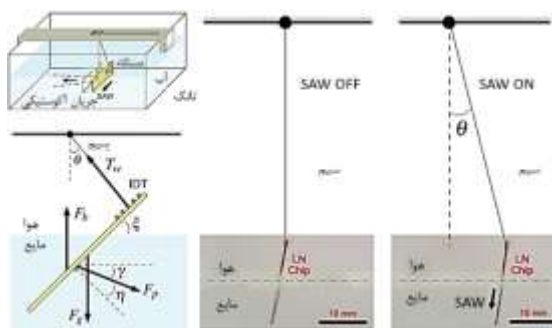
### ۲-۲-۲. فرکانس تولیدی فراصوت

پیشراندهای آکوستیکی در فرکانس‌های فراصوت کار می‌کنند و بسیاری از آن‌ها در محدوده ده‌ها تا صدها کیلوهرتز هستند. هرچند برخی هیدروفون‌ها توانایی تشخیص امواج تا صدها کیلوهرتز را دارند، اما شدت سیگنال با افزایش فاصله کاهش چشمگیری می‌یابد.

پیشرانه SAW با فرکانس در حد مگاهرتز، یک گام فراتر می‌گذارد. در این فرکانس بسیار بالا، چندین مزیت از دیدگاه آکوستیکی حاصل می‌شود. اول آن‌که طول موج صوت در آب بسیار کوچک و در حد چند ده میکرون است و موج در فاصله کوتاهی از سطح منبع نویز میرا می‌شود. ژانگ و همکاران [40] نیز بیان می‌کنند که به علت آنکه مکانیزم تولید نیرو در این دستگاه‌ها اتلاف موج صوتی است، در فاصله‌ای بیش از حدود یک متر از دستگاه، دیگر نویزی برای آشکارسازی باقی نمی‌ماند. ثانیاً آن‌که حتی در فاصله نزدیک نیز فرکانس ۴۰ مگاهرتز بسیار فراتر از محدوده عملکرد اغلب حسگرهای هیدروآکوستیکی مرسوم بوده و بنابراین عملاً قابل شنود نیست [42]. به بیان ساده، پیشرانه SAW از نظر آکوستیکی صامت است.

### ۲-۳. سنجش نویز پیشراندهای هیدروآکوستیکی

با توجه به موارد بالا، پیشراندهای هیدروآکوستیکی به ویژه نوع SAW از قیاس تولید نویز، بسیار برتر از پروانه‌های سنتی می‌باشند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی، تلفیق نیروی پیشرانه مؤثر با فرایند کوچک‌سازی در سیستم‌های زیرآبی است [43]. از آنجا که سرعت ارتعاش مبدل اولتراسونیک حاصل ضرب دامنه و فرکانس است، می‌توان با افزایش فرکانس و کاهش دامنه، اندازه سیستم را بدون کاهش محسوس در توان، کوچک نگه داشت [44]. به همین دلیل، چگالی توان در این سیستم‌ها با سرعت ارتعاش سطح



شکل ۸. شماتیک و نمای واقعی روش آونگ برای اندازه‌گیری نیروی پیشرانه SAW در آب [40].

ژانگ و همکاران دریافتند که بازده الکترومکانیکی پیشرانه آن‌ها بین ۴۰ تا ۶۰ درصد متغیر است. این بازده با راندمان بهترین پروانه‌های مرسوم قابل مقایسه است که علت این بازده بالا را می‌توان کیفیت بالای جفت‌سازی<sup>۱۲</sup> موج سطحی در کریستال به جریان سیال دانست، به خصوص که در کریستال نیوبات لیتیم، تلفات مکانیکی اندک است و هیستریزیس یا اتلاف داخلی زیادی وجود ندارد [40]. در مجموع، پیشرانه SAW به دلیل فرکانس بسیار بالا و عدم وجود قطعات متحرک، پتانسیل بالایی برای پیشراندهای مقیاس کوچک و با نویز بسیار کم دارد.

### ۲-۲. تحلیل نویز تولیدی

یکی از اهداف اصلی توسعه پیشراندهای آکوستیکی، کاهش نویز آکوستیکی در مقایسه با پروانه‌های سنتی است. پیشراندهای مبتنی بر امواج صوتی به چند دلیل می‌توانند بی‌صداتر باشند:

#### ۲-۲-۱. حذف کاویتاسیون و نویز مکانیکی

در روش‌های آکوستیکی با حذف پروانه، کاویتاسیون ناشی از تیغه‌های پروانه نیز از بین می‌رود. کاویتاسیون عمده‌ترین منبع نویز در پروانه‌هاست. همچنین ارتعاشات و صداهای مکانیکی موتورهای محرک در این سیستم‌ها حضور ندارد. بنابراین، نویز مکانیکی مستقیم کاهش می‌یابد. یک دیسک پیزوالکتریک التراسونیک

مبدل رابطه مستقیم دارد. بنابراین، انتظار می‌رود سیستم‌های پیش‌رانه آکوستیکی در مقیاس‌های کوچک مانند میکروشناگرها کارآمد باشند. همچنین برای ربات‌های کوچک، اگرچه اصول حاکم بر عملکرد سیستم ثابت می‌ماند، اما تأثیرات سطحی و

ویسکوزیته نسبت به نیروهای حجمی مانند اینرسی غالب می‌شوند [45]. از این‌رو، بهینه‌سازی شکل بدنه ربات می‌تواند به طور مؤثر مقاومت سیال را کاهش داده و راندمان هیدرودینامیکی و نیز هیدروآکوستیکی را افزایش دهد [46].

جدول ۱. مقایسه‌ی انواع فناوری‌های پیش‌رانه هیدروآکوستیکی

مولفه / نوع پیش‌رانه	پیزوالکتریک با پروانه	فراصوتی بدون قطعه متحرک	موج سطحی صوتی
مکانیزم تولید نیرو	ارتعاش دیسک پیزوالکتریک متصل به پروانه	فشار تابشی آکوستیکی در مرز جامد- مایع	تابش امواج سطحی با فرکانس بالا از کریستال
وجود قطعه متحرک	دارد (پروانه)	ندارد	ندارد
فرکانس عملکرد	ده‌ها تا صدها کیلوهرتز	ده‌ها تا صدها کیلوهرتز	ده‌ها مگاهرتز
بازده الکترومکانیکی	پایین (اتلاف مضاعف در مبدل و پروانه)	متوسط	بالا (نزدیک پروانه‌های راندمان بالا)
سطح نویز	متوسط (نویز پروانه و ارتعاش مکانیکی)	پایین (بدون کاویتاسیون، نویز در فراصوت)	بسیار پایین (تقریباً بی‌صدا، فراتر از دامنه هیدروفون‌ها)
پتانسیل کوچک‌سازی	محدود (نیاز به چرخش مکانیکی)	بالا	بسیار بالا
کاربردهای اصلی	میکروروبات‌ها، ربات‌های داخل عروقی و لوله‌رو [40] [41]		
چالش‌های کلیدی	بازده پایین، تلفات مکانیکی	کنترل جهت، نیروی محدود	محدودیت توان خروجی، نیاز به مواد پیشرفته

### ۳. پیش‌رانه‌های زیست‌تقلید در زیر آب

پیش‌رانه‌های زیست‌تقلید زیرسطحی به پیش‌رانه‌هایی اطلاق می‌شود که با الگوبرداری از طبیعت و الگوهای حرکتی موجودات دریایی طراحی شده‌اند [50], [49]. با الهام از روش پیش‌رانش ماهی‌ها، اولین ربات زیرآبی زیست‌تقلید به نام روبو تونا<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۹۴ معرفی

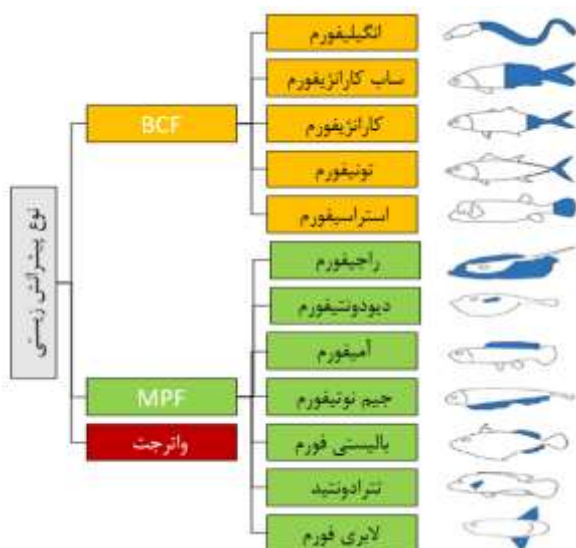
شد [51] و انواع مختلفی از ربات‌های زیرسطحی زیست‌تقلید همچنان در حال ظهور هستند. این ربات‌ها با بهره‌گیری از اصول هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی، به طور مداوم در جهت افزایش کارایی، پایداری، کاهش نویز و تطبیق‌پذیری با محیط بهینه‌سازی می‌شوند [52].

در ادامه به بررسی پارامترهای کلیدی در تولید نویز پیشرانه‌های زیستی پرداخته می‌شود.

### ۳-۱-۱. الگوی حرکتی

الگوهای متنوعی از پیشرانش در میان موجودات دریایی یافت می‌شود که هر یک با ویژگی‌های مورفولوژیکی خاص خود منطبق هستند. معتبرترین طبقه‌بندی این الگوها نخستین بار توسط بردر و وب [55] ارائه شد و بر اساس نوع اندام پیشرانشی، سیستم‌های زیست تقلید به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [56] که عبارتند از:

- پیشرانش بدن و باله دمی<sup>۱۴</sup> (BCF)
- پیشرانش باله میانی و جفتی<sup>۱۵</sup> (MPF)
- پیشرانش واترجت زیستی<sup>۱۶</sup>



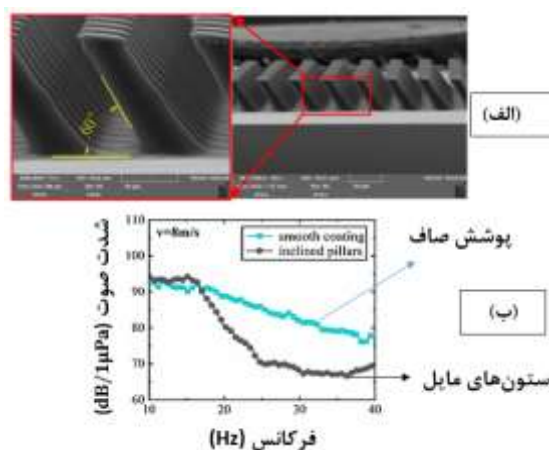
شکل ۱۰. انواع سیستم‌های پیشرانشی زیست تقلید

در مدل BCF نیروی پیشران از طریق نوسانات هماهنگ بدن و به ویژه دم تأمین می‌شود. این نوسانات جریان آب را در اطراف بدن هدایت کرده و نیروی پیشران تولید می‌کنند. این مدل دارای قدرت رانشی بالا، پایداری حرکتی مناسب و مانورپذیری قابل قبول است [57]. از مزایای بارز این نوع پیشرانش می‌توان به بازده انرژی بالا و قابلیت تولید سرعت زیاد اشاره کرد.

یکی از مزیت‌های مهم پیشرانه‌های زیست تقلید در مقایسه با پروانه‌های سنتی، کاهش قابل ملاحظه‌ی نویز حاصل از حرکت است. این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌های جذاب برای کاربردهایی مانند ربات‌های زیرسطحی کم نویز تبدیل کرده است [53].

### ۳-۱-۲. عوامل مؤثر بر نویز آکوستیکی

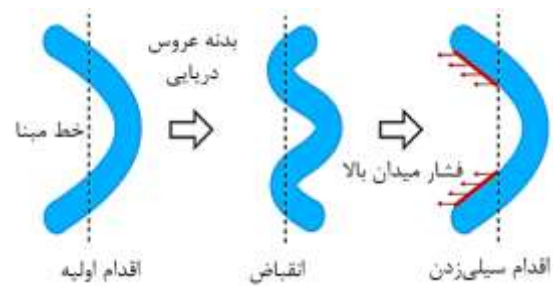
در سال‌های اخیر، محققان به بررسی عوامل مؤثر بر نویز ناشی از ربات‌های زیست تقلید پرداخته‌اند. در پژوهش تجربی ژانگ و همکاران [54]، اثر پوشش‌های زیست تقلید الهام گرفته از ساختار پوست کوسه بر کاهش نویز جریان زیرآبی بررسی شده است. هدف این مطالعه، ارزیابی پتانسیل پوشش‌های میکروساختار در کنترل نویز لایه مرزی متلاطم و بهبود عملکرد آکوستیکی سامانه‌های زیرسطحی بوده است. نتایج تجربی نشان داد که پوشش بیومیمتیک در تمامی سرعت‌های جریان آزمایش شده (۶، ۷ و ۸ متر بر ثانیه) باعث کاهش معنادار نویز در محدوده فرکانس‌های بالا (۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز) شد. بیشینه کاهش فشار صوتی معادل ۱۵ دسی‌بل در سرعت ۸ متر بر ثانیه به دست آمد.



شکل ۷. الف) پوشش بیومیمتیک الهام گرفته از پوست کوسه و ب) کاهش قابل توجه نویز در فرکانس‌های بالا [54]

مدل MPF از طریق حرکت ترکیبی باله‌های میانی و جفتی یا با نوسانات باله پشتی عمل می‌کند. این روش، قابلیت مانور بسیار دقیق در جهات مختلف را فراهم می‌آورد و اغلب برای شنا با سرعت پایین و در فضای محدود مناسب است. این مدل، علاوه بر پایداری حرکتی خوب، راندمان پیشرانش بالا در سرعت‌های پایین دارد [58].

برخی از موجودات دریایی مانند ماهی مرکب و عروس دریایی نیز، با بهره‌گیری از ساختارهای انعطاف‌پذیر و کنترل عضلانی، قادر به ایجاد نیروی رانش از طریق مکانیسم جت آب یا واترجت هستند [59]. در این روش، ابتدا آب به داخل یک حفره انعطاف‌پذیر کشیده می‌شود. سپس، با انقباض ناگهانی دیواره‌های محفظه یا استفاده از یک مکانیزم محرک، آب با فشار بالا از یک نازل به بیرون رانده می‌شود. این پالس‌های پیوسته باعث حرکت مؤثر و بدون نویز ربات زیرسطحی می‌شود و در کاهش شدت نویز سامانه‌ها تأثیر قابل توجهی دارد [60].



شکل ۸. نحوه عملکرد پیشرانش عروس دریایی با

عملکرد کم‌نویز [61].

در مدل پیشرانش BCF، الگوی موجی حرکت ماهی ممکن است تمام طول بدن را دربرگیرد یا عمدتاً به ناحیه دم محدود شود.

برای مثال، در حالت انگیلیفورم<sup>۱۷</sup>، موج حرکتی تقریباً سرتاسر بدن ماهی را طی می‌کند (مانند مارماهی)، در حالی که در حالت کارانژیفورم<sup>۱۸</sup> عمده‌ی نوسان به دم و بخش پشتی بدن محدود است [62]. این تفاوت در الگوی حرکتی می‌تواند بر آرایش گردابه‌های

تشکیل‌شده در پشت ماهی و در نتیجه بر نویز تولیدی اثرگذار باشد.

در حالت انگیلیفورم، گردابه‌های دنباله تمایل به تشکیل آرایش کارمن معمولی (گردابه‌های مثبت در پایین و منفی در بالا) دارند. این پدیده باعث می‌شود انتشار جریان به عقب کاهش یافته و در نتیجه انتقال صدا به دوردست میرا شود [63]. به بیان دیگر، کاهش طول موج حرکتی نزدیک به حالت انگیلیفورم دو اثر دارد: از یک سو شدت و گستره گردابه‌ها را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر با برهم‌کنش الگوی گردابه‌ای، انتشار صدای تولیدی را محدود می‌کند [63].

همچنین با کاهش طول موج، میزان نویز تولیدی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در صورتی که حداکثر نیروی پیشرانش مدنظر نباشد می‌توان با کوتاه کردن طول موج حرکتی، نویز ایجادشده را به میزان زیادی کاهش داد.

در شکل ۹ الگوی پخش صوت در میدان دور برای طول موج‌های مختلف نمایش داده شده است. در همه موارد، انتشار صوت الگوی دو قطبی دارد و با افزایش طول موج، شدت صدای منتشرشده به ویژه در راستای نیروی بالابرنده (۹۰ درجه نسبت به مسیر حرکت) به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که بسیاری از گونه‌های آبزیان نیازمند کاهش صوت تولید شده جهت بالابردن کارایی در شکار هستند. به عنوان مثال شناگران با طول موج کوتاه‌تر مانند انگیلیفورم می‌توانند نویز کمتری تولید کنند و در نتیجه برای مأموریت‌های مخفیکارانه مناسب‌تر باشند [64].

### ۳-۱-۲. عدد استروهاال و فرکانس نوسان

عدد استروهاال<sup>۱۹</sup>، یک پارامتر بدون بُعد است که نسبت مشخصه‌های فرکانسی حرکت، مانند فرکانس نوسان و دامنه به سرعت پیشروی را بیان می‌کند. این عدد نقش کلیدی در توصیف ویژگی‌های شنا ایفا می‌کند و کارایی پیشرانش ماهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیشتر

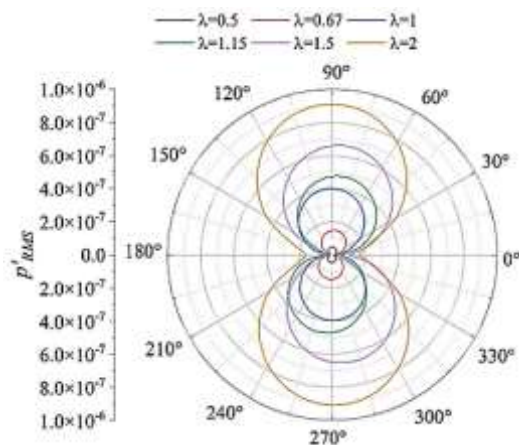
### ۳-۱-۳. عدد رینولدز و رژیم جریان

به طور کلی، با افزایش عدد رینولدز، شدت اغتشاشات جریان بالا رفته و سهم نویز توربولانسی در صدای کلی بیشتر می‌شود [69]. هرچه عدد رینولدز بالاتر می‌رود، روند افزایش نویز شتاب بیشتری می‌گیرد (در عدد رینولدزهای زیاد، با اندکی افزایش سرعت یا اندازه، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در نویز مشاهده می‌شود). الگوی جهت‌یابی صدای تولیدی نیز نشان می‌دهد که در جهت عمود بر حرکت، افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش محسوس فشار صوت می‌شود.

بررسی میدان گردابه‌ای نیز تأیید می‌کند که با افزایش عدد رینولدز، شدت گردابه‌های دنباله به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد و در فواصل دورتری از شناگر همچنان پایدار می‌مانند. در عدد رینولدزهای پایین (حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰)، گردابه‌های مثبت و منفی تشکیل شده، تقریباً روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده فقدان پیشران مؤثر و آشفتگی کمتر جریان است [70]. اما برای عدد رینولدزهای بالاتر، گردابه‌های دنباله آزاد، به شکل الگوی کارمن معکوس در می‌آیند که علامت وجود نیروی پیشران قوی‌تر است. در همین حال، نازک‌تر شدن لایه مرزی روی سطح فویل در عدد رینولدز بالا و اثر اینرسی قوی‌تر سیال موجب می‌شود نویز توربولانسی تبدیل به منبع غالب صدا شود [71]. در مجموع افزایش سرعت حرکت یک ربات زیست‌تقلید و به عبارتی افزایش عدد رینولدز، اگرچه توان پیشران را بالا می‌برد، ولی می‌تواند امضای صوتی آن را به میزان زیادی افزایش دهد.

### ۳-۱-۴. شکل هندسی پیشرانه

شکل بدنه تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های جریان و صوت پیرامون آن دارد. یکی از مشخصه‌های مهم هندسی، نسبت ضخامت به طول وتر فویل یا باله نوسانی است. برای بررسی اثر این پارامتر، لی و همکاران از چندین پروفیل متقارن ناکا<sup>۲</sup> با ضخامت‌های متفاوت استفاده



شکل ۹. الگوی پخش صوتی میدان دور برای طول

موج‌های مختلف [65]

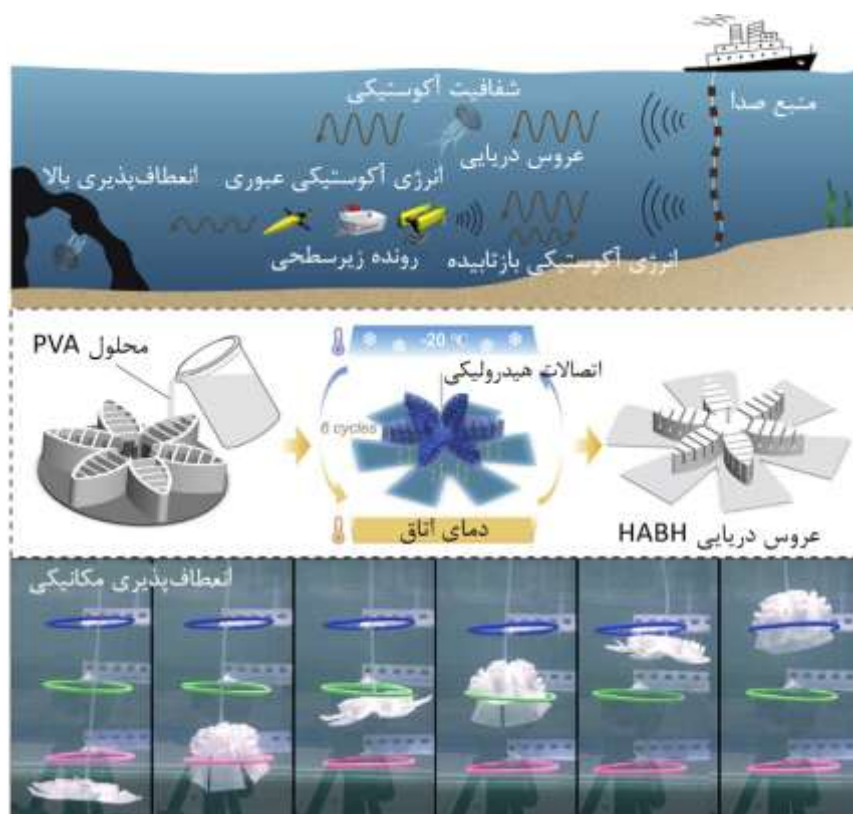
ماهیان در طی شنا محدود به باریکی از عدد استروهال بهینه (معمولاً حدود ۰/۲ تا ۰/۴) را حفظ می‌کنند تا راندمان حرکتشان بیشینه باشد [66]. لذا انتظار می‌رود که با افزایش فرکانس نوسان (استروهال بالا)، شدت صوت ناشی از جریان نیز تغییر کند.

همچنین با افزایش عدد استروهال، نیروی رانش افزایش می‌یابد اما همراه با آن، سطح فشار صوت مؤثر نیز بیشتر می‌شود. در اعداد استروهال بسیار کم، عملکرد جلوبردنگی سامانه ضعیف بوده و حتی نیروی رانش خالص منفی مشاهده شده است. در این حالت‌ها آرایش گردابه‌های پشت فویل شبیه حالت پسای یک جسم ثابت است و نویز تولیدی در سطح پایین باقی می‌ماند [67]. در استروهال‌های بزرگ‌تر (نزدیک ۱) آشفتگی شدیدتری در سیال ایجاد شده و نویز بیشتری تولید می‌شود. نتایج کمی حاکی از آن است که مؤلفه‌های نیرو و صوت، هر دو روند افزایشی مشابهی با عدد استروهال دارند. به علاوه، با زیاد شدن آن، شدت صوت در جهت عمود بر حرکت به شکل محسوس بالا می‌رود و در جهت پیشران نیز اندکی افزایش می‌یابد [68]. همچنین فرکانس‌های صوت تولیدشده به سمت مقادیر بالاتر میل می‌کند و در نتیجه امکان انتشار دوربرد این اصوات کاهش می‌یابد.

### ۳-۱-۵. نوع ماده سازنده

علاوه بر موارد فوق، نوع ماده نیز تأثیر فراوانی در میزان نویز منتشره از ربات زیرسطحی دارد. به عنوان مثال مواد نرم مثل هیدروژل‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که آن‌ها را برای ساخت ربات‌های انعطاف‌پذیر و بی‌صدا بسیار مناسب می‌کند [74]. ربات‌های زیرسطحی معمولاً از مواد سخت ساخته می‌شوند که از منظر آکوستیکی با آب ناسازگارند و همین موضوع توانایی عملکرد آن‌ها را در زیر آب محدود می‌کند. محققان با الهام از بدن ژله‌ای عروس دریایی، یک ربات هیدروژلی ساختند که این ربات نسبت به ربات‌های زیرسطحی معمول، حدود ۲۷۰ برابر انرژی صوتی بازتابی کمتری دارد و به عبارتی در دامنه وسیعی از امواج صوتی (از ۱۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز)، تقریباً به صورت نامرئی عمل می‌کند [75].

کردند. نتایج نشان داد که هر چه فویل ضخیم‌تر باشد، نیروی رانش تولیدی کمتر می‌شود، به طوری که برای فویل‌های بسیار ضخیم، نیروی رانش متوسط تقریباً به صفر رسیده یا حتی منفی می‌شود [72]. در مقابل، سطح فشار صوت القاشده توسط جریان با افزایش ضخامت به شدت زیاد می‌شود. به بیان دیگر، فویل‌های ضخیم‌تر گرچه ممکن است سازه مستحکم‌تری داشته باشند، ولی رانش اندک و نویز زیادی تولید می‌کنند [73]. این رابطه معکوس بین تراست و نویز بدان معناست که طراحی یک بدن کشیده و باریک برای یک وسیله زیست‌تقلید می‌تواند مزیت دوگانه افزایش کارایی جلوبرندگی همراه با کاهش نویز در بر داشته باشد.



شکل ۱۳. شفافیت آکوستیکی عروس دریایی و ساخت ربات HABH از هیدروژل PVA، همراه با نمایش انعطاف‌پذیری مکانیکی در آب [76]

در حال حاضر، به دلیل محدودیت‌های فناوریانه، سیستم‌های پیش‌رانه جت آبی زیست‌تقلید هنوز قادر نیستند به سطح عملکرد زیستی واقعی موجودات دریایی برسند [77].

### ۳-۲. سنجش نويز پيش‌رانه‌های زیست‌تقلید

به صورت خلاصه، یک شناگر زیست‌تقلید برای کاهش نويز باید تا حد امکان به سمت ویژگی‌های الگوی موجی انگلیفورم (طول موج حرکتی کوتاه)، فرکانس نوسان پایین (عدد استرومال کوچک)، بدن کشیده و باریک (نسبت ضخامت به وتر کم) و سرعت متوسط رو به پایین (عدد رینولدز کنترل‌شده) حرکت کند.

جدول 1. عوامل مؤثر بر نويز در پيش‌رانه‌های

زیست‌تقلید

مؤلفه	راهکارهای کاهش نويز
الگوی حرکتی	استفاده از انگلیفورم (طول موج حرکتی کوتاه)
فرکانس نوسان	کاهش فرکانس در مأموریت‌های پنهان کارانه و نظامی
عدد استرومال	نگهداشتن استرومال در بازه بهینه (عدد استرومال کوچک)
عدد رینولدز	کنترل سرعت و گردابه پایدار
شکل فویل	بدن کشیده و باریک (نسبت ضخامت به وتر کم)
پوشش سطحی	استفاده از ساختار پوست کوسه
طول موج حرکتی	طراحی سازه نرم و کنترل‌پذیر
جنس بدنه	استفاده از مواد پیشرفته مانند هیدروژل‌ها

### ۴. پيش‌رانه‌های واترجت در زیر آب

یک پیش‌رانه‌ی واترجت از یک روتور درون یک مجرای حلقوی همراه با مجموعه‌ای از پره‌های ثابت هدایت‌کننده‌ی جریان یا استاتور تشکیل شده است

[78]. در این پیکربندی، پروانه داخل یک مجرا یا کانال قرار می‌گیرد و استاتور که معمولاً در بخش عقبی پروانه نصب می‌شود، جریان چرخشی خروجی از پروانه را تا حدی مستقیم کرده و گشتاور واکنشی ناشی از چرخش پروانه را خنثی می‌کند [79]. این ترکیب مزایایی از جمله تعادل بهتر نیروها و کاهش احتمال کاویتاسیون در نوک پره‌ها و به تبع آن، نويز کمتر به همراه دارد. پیش‌رانه‌های واترجت به دلیل مزایایی همچون کارایی بالا، عدم وجود اجزای برون‌بدنه‌ای و قابلیت کنترل جهت رانش، در سامانه‌های دریایی مدرن به کار گرفته می‌شوند و بنابراین یکی از پیش‌رانه‌های نوین در زیر آب هستند [80]. اما با وجود این مزایا، پیش‌رانه‌های واترجت همچنان عاری از نويز نیستند و بنابراین بررسی نويز آکوستیکی حاصل از آن به یک ضرورت مهم تبدیل شده است که نیاز به مطالعه و آزمایش‌های تکمیلی را ایجاب می‌کند.

### ۴-۱. نويز واترجت زیر آب

نويز واترجت می‌تواند از بخش‌های مختلفی ناشی شود. نويز مکانیکی پمپ به دلیل ارتعاشات و پالس‌های فشار در پمپ، نويز جریان جت خروجی ناشی از آشفتگی‌های جریان آب پس از خروج از نازل و نويز شدید حاصل از تشکیل و انفجار حباب‌ها یا کاویتاسیون، همگی در نويز کلی سهم دارند [81]. خصوصیات طیفی نويز واترجت‌ها نیز بسته به منبع آن متفاوت است: نويز حاصل از تلاطم جریان معمولاً پهن باند است و در فرکانس‌های پایین، انرژی بیشتری دارد، در حالی که نويز ناشی از اجزای مکانیکی ممکن است در فرکانس‌های تونال<sup>۲۱</sup> ظاهر شود [82].

### ۴-۱-۱. بررسی فنی نويز واترجت‌ها

در واترجت‌های نوع جت آزاد (بدون پروانه مرئی)، بخش عمده نويز، حاصل اختلاط پرسرعت آب خروجی با آب ساکن اطراف است. نتایج مطالعه لو و همکاران [83] نشان می‌دهد که ناحیه اختلاط جریان در فاصله

فرکانسی گسترده است. بخش قابل توجهی از انرژی صوتی در فرکانس‌های پایین متمرکز است. برای مثال، در واترجت فشار بالا، بیشترین انرژی نويز در باند صفر تا ۲۰۰ هرتز منتشر می‌شود که بسیار مهم و حائز اهمیت است [87]. زیرا صداهای فرکانس پایین در آب با افت کمتری منتشر می‌شوند و در نتیجه، در فواصل دورتری منتشر می‌شوند.

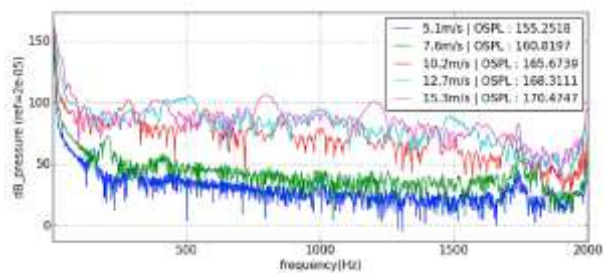
در مقابل، در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰ هرتز، طیف نويز واترجت نسبتاً یکنواخت می‌شود. از منظر زمانی، نويز واترجت می‌تواند ترکیبی از مولفه‌های پیوسته ناشی از جریان آشفته و مولفه‌های پریودیک ناشی از اجزای مکانیکی دوار یا رفت‌وبرگشتی باشد. شدت و الگوی این نويز تحت تأثیر عواملی چون هندسه نازل، فشار و وقوع کاویتاسیون قرار دارد، به طوری که شروع یا تشدید کاویتاسیون می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر نويز در باندهای پایین شود. از این رو، کنترل شرایط جریان و طراحی بهینه نازل نقش کلیدی در کاهش سطح نويز واترجت دارد.

همچنین اگرچه افزایش سرعت جریان ورودی واترجت به افزایش سطح فشار صوتی منتج شده است، اما تغییر سرعت جریان، تأثیر چندانی بر شکل طیف فرکانسی نويز نداشته است [88]. به بیان دیگر، با افزایش دبی، شدت کلی نويز بالا می‌رود ولی فرکانس‌های غالب تغییری نمی‌کنند (زیرا این فرکانس‌های غالب بیشتر تابع ویژگی‌های منبع، مثل فرکانس پالس پمپ هستند تا سرعت جریان).

کاویتاسیون نیز پدیده‌ای است که می‌تواند نويز شدیدی تولید کند. در انواع واترجت (چه از نوع پمپ‌جت و چه واترجت‌های باز)، افت فشار در ورودی پمپ یا اطراف پره‌ها می‌تواند به تشکیل حباب‌های بخار منجر شود که فروپاشی آن‌ها، نويز پهن‌بند با فرکانس بالا ایجاد می‌کند [89]. بنابراین طراحی مناسب آبنگير و پمپ

حدود ۸ تا ۱۰ برابر قطر نازل از دهانه‌ی خروجی، اصلی‌ترین منبع نويز در یک واترجت فشار بالا است. در این ناحیه، برهم‌کنش گردابه‌ها و آشفتگی‌های شدید باعث گسیل امواج آکوستیکی به محیط آب می‌شود. همچنین جهت‌گیری نويز غالباً در امتداد محور جریان جت است، به طوری که بیشترین شدت نويز در راستای خروجی جت منتشر می‌شود [84]. این ویژگی جهتی بودن در کاربردهای نظامی حائز اهمیت است، زیرا می‌توان با تنظیم جهت جت، انتشار نويز به سمت اهداف حساس را تا حدی کنترل کرد.

مطابق با شکل، افزایش سرعت جریان ورودی به نازل، مستقیماً با افزایش سطح فشار صوتی همراه است. این یافته‌ها بر اهمیت کنترل سرعت و آشفتگی جریان برای کاهش نويز در طراحی پیش‌رانه ربات‌های کم‌نويز زیر آب تأکید دارند.



شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ای سطح فشار صوتی پخش شده از نازل واترجت در فرکانس‌های مختلف برای پنج سرعت ورودی [۸۵]

از سوی دیگر، پمپ پیستونی یا پمپ گریز از مرکز نیز منبع مهم نويز است. یک پمپ پیستونی هنگام کار، جریان آب را به صورت پالسی، تأمین می‌کند و این پالس جریان و فشار پس از عبور از مجاری و اتصالات باعث ایجاد نوسانات فشار می‌شود [86]. این نوسانات خود منجر به ارتعاشات سازه‌ای و انتشار نويز در سیال می‌گردند.

#### ۴-۱-۲. ویژگی‌های طیفی نويز واترجت نويز ناشی از واترجت‌ها معمولاً دارای مولفه‌های

برای جلوگیری از کاویتاسیون، یکی از اصول اساسی در مهندسی واترجت‌های کم‌نویز به‌شمار می‌رود.

#### ۲-۴. راهکارهای کاهش نویز در واترجت‌ها

کاهش نویز واترجت‌ها نیازمند رویکردهای چندجانبه است که هم به منبع تولید صدا و هم به مسیر انتقال آن توجه کنند. بر اساس مقالات بررسی‌شده، مهم‌ترین راهکارهای کاهش نویز واترجت عبارتند از:

#### ۲-۴-۱. استفاده از آکومولاتور (انباشت‌گر) برای

##### کاهش پالس‌های فشار پمپ

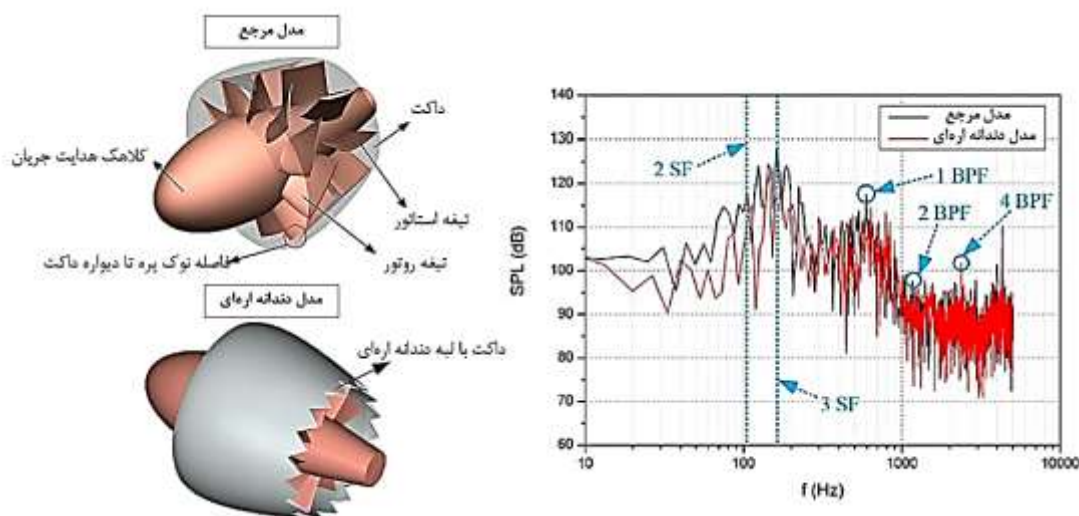
متداول‌ترین روش برای میرا کردن نوسانات جریان فشار در پمپ‌های هیدرولیکی، نصب آکومولاتور<sup>۲۲</sup>های بالشی (از نوع گازی-مایع) در خروجی پمپ است [90]. آکومولاتور جریان را در پیک‌های فشار جذب کرده و در افت‌های فشار پس می‌دهد و بدین ترتیب شدت پالس را کاهش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی لو و همکاران [91] نشان داده است که با سه آکومولاتور بهینه‌شده می‌توان ضریب پالس فشار را در تمامی فشارهای عملیاتی در حدود مقدار مجاز نگه داشت. بدین ترتیب، نویز ناشی از پالس پمپ به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. این رویکرد ساده و غیرفعال (بدون نیاز به

کنترلگر خارجی)، فقط با بهینه‌سازی طراحی پمپ و آکومولاتورها، عملکرد آکوستیکی را بهبود می‌بخشد.

#### ۲-۴-۲. اصلاحات هندسی در اجزای واترجت

یکی از مهم‌ترین رویکردها در کاهش نویز واترجت‌ها، اصلاحات هندسی در اجزای آن است [92]. یکی از ایده‌های نوآورانه که به تازگی برای کاهش نویز پروانه‌ها مطرح شده، اصلاح شکل هندسی مجرای اطراف پروانه با استفاده از لبه‌های دندانه‌اره‌ای است. این رویکرد الهام‌گرفته از دستاوردهای صنعت هوافضا می‌باشد. در موتورهای جت مدرن هواپیماها، برای کاهش نویز جت خروجی موتور، از نازل‌هایی به شکل دندانه‌اره، استفاده شده است.

کین و همکاران [93] به بررسی داکت‌های دندانه‌دار با لبه‌اره‌ای پرداختند که با هدف کاهش نویز طراحی شده‌اند. این دندانه‌ها باعث تقسیم گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک‌تر می‌شوند. نتایج عددی نشان می‌دهد این طراحی می‌تواند نویز را در بازه گسترده‌ای از فرکانس‌ها (۱۰ تا ۵۰۰۰ هرتز) به ویژه در فرکانس‌های پایین تا ۵ دسی‌بل کاهش دهد (شکل).



شکل ۱۵. مقایسه طیف نویز زیرآبی بین پیشراهنه واترجت معمولی و مدل دارای داکت دندانه‌دار [93]

#### ۴-۲-۳. بهینه‌سازی طراحی پمپ و پروانه

افزایش تعداد و یکنواختی منابع تأمین جریان نیز کارآمد هستند. برای مثال به‌کارگیری پمپ‌های چندپیستونه با فزبنندی مناسب یا چندین پمپ کوچک‌تر به جای یک پمپ بزرگ، می‌تواند پالس جریان را کاهش دهد. همچنین انتخاب سرعت چرخش بهینه برای پمپ (که در فرکانس‌های تشدید سازه‌ای قرار نگیرد)، می‌تواند سبب کاهش نویز آکوستیکی شود. در پمپ‌جت‌ها، طراحی هیدرودینامیکی و هیدروآکوستیکی پره‌ها مانند افزایش تعداد پره‌ها، استفاده از پروفیل‌های کم‌نویز، کاهش خلاصی نوک پره و جلوگیری از جداشدگی جریان، همگی می‌توانند به کاهش نویز منجر شوند.

#### ۴-۲-۴. کنترل کاویتاسیون

پرهیز از کاویتاسیون یکی از اصول اساسی کاهش نویز است. بهره‌گیری از ورودی‌های مناسب برای پمپ واترجت که در آن افت فشار ناگهانی رخ ندهد، یا طراحی داکت و پروانه‌ای که فشار روی پره‌ها را بالاتر

از آستانه کاویتاسیون نگه دارد، مانع ایجاد کاویتاسیون و نویز ناشی از آن می‌شود [94]. حتی در برخی طرح‌های جدید، تزریق کنترل‌شده هوا به اطراف پره‌ها یا جریان جت جهت جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته که هر چند پیچیدگی را افزایش می‌دهد ولی در صورت نیاز به کاهش حداکثری نویز، می‌تواند مؤثر باشد [95].

#### ۴-۳. سنجش نویز پیش‌رانه‌های واترجت

در مجموع، راهکارهای کاهش نویز واترجت یا بر منبع صوت (مانند آکومولاتورها که تلاطم منبع را کاهش می‌دهند، یا داکت دنداندار که انتشار گردابه‌های مولد صدا را تغییر می‌دهد) و یا بر مسیر انتقال صوت (مانند عایق‌بندی ارتعاشی پمپ از بدنه اصلی شناور که انتقال نویز ساختاری به آب را کم می‌کند) اثر می‌گذارند. ترکیب مناسبی از این روش‌ها بسته به نوع کاربرد و محدودیت‌های طراحی می‌تواند به کاهش چشمگیر نویز منجر شود.

جدول ۳. تحلیل منابع نویز و راهکارهای مهندسی در پیش‌رانه‌های واترجت زیرسطحی

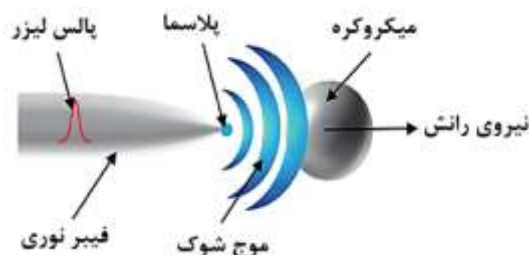
عامل طراحی	منبع نویز	پيامد آکوستیکی	راهکار مهندسی پیشنهادی
پمپ (پیستونی/گریز از مرکز)	پالس‌های فشار ناشی از عملکرد ناپیوسته پمپ	نویز تونال با فرکانس پایین، نوسان ساختاری در بدنه	استفاده از آکومولاتور بالشی برای تضعیف پیک‌های فشار
جریان خروجی جت	ناحیه‌ی آشفتگی پس از نازل	انتشار پهن‌بند در باند صفر تا ۲۰۰ هرتز، گسیل موج در راستای محور جریان	استفاده از دیفیوزر، کنترل جهت جت در طراحی
کاویتاسیون	افت فشار در ورودی پمپ یا اطراف نوک پره‌ها	تولید نویز پهن‌بند در فرکانس‌های بالا و افزایش خطر آشکارسازی	افزایش شعاع انحنای پره، جلوگیری از افت فشار و تزریق کنترل‌شده هوا
پره‌ها/ استاتورها	جدایش جریان، خلاصی نوک پره، پروفیل نامناسب	صدای تونال و ناپایداری در سرعت بالا	طراحی پروفیل کم‌نویز، افزایش تعداد پره‌ها و کاهش خلاصی نوک
هندسه داکت	گردابه‌های بزرگ و ناپایدار در لبه داکت	نویز فرکانس پایین تا 5 کیلوهرتز، تقویت موج‌های ساختاری	طراحی داکت دنداندار برای تجزیه گردابه‌ها
انتقال ساختاری نویز	کوپل مکانیکی پمپ با بدنه سازه	تشدید نویز سازه‌ای، تقویت ارتعاش منتقل‌شده به سیال اطراف	ایزولاسیون مکانیکی پمپ و ساختارهای جاذب ارتعاش

## ۵. پیشرانه‌های لیزری زیر آب

مفهوم پیشرانه لیزری اولین بار توسط آرتور کانتروویتز<sup>۲۳</sup> در سال ۱۹۷۲ پیشنهاد شد. اکثر مطالعات پیشرانه لیزری در محیط جو [96] و خلأ [97] اختصاص یافته‌اند و نخستین بار، هان<sup>۲۴</sup> و همکاران [98] پیشرانه لیزری در محیط آب را پیشنهاد کردند. فرایند پیشرانه لیزری در آب پایه‌ای برای توسعه سیستم‌های پیشرانشی جدید با ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله پنهان‌کاری آکوستیکی هستند. برای مثال، در محیط آب علاوه بر موج ضربه‌ای اولیه لیزر، حباب کاویتاسیونی نیز به تولید نیروی پیشران کمک می‌کنند [100], [99].

توسعه یک سیستم جدید پیشرانشی لیزری می‌تواند به نسل جدیدی از زیردریایی‌های فوق‌سریع و کم‌نویز منجر شود که قابلیت نظامی فوق‌العاده‌ای دارد. این فناوری‌ها می‌توانند در مأموریت‌های پنهان‌کارانه، با کاهش قابل توجه امضای صوتی، نقش کلیدی ایفا کنند.

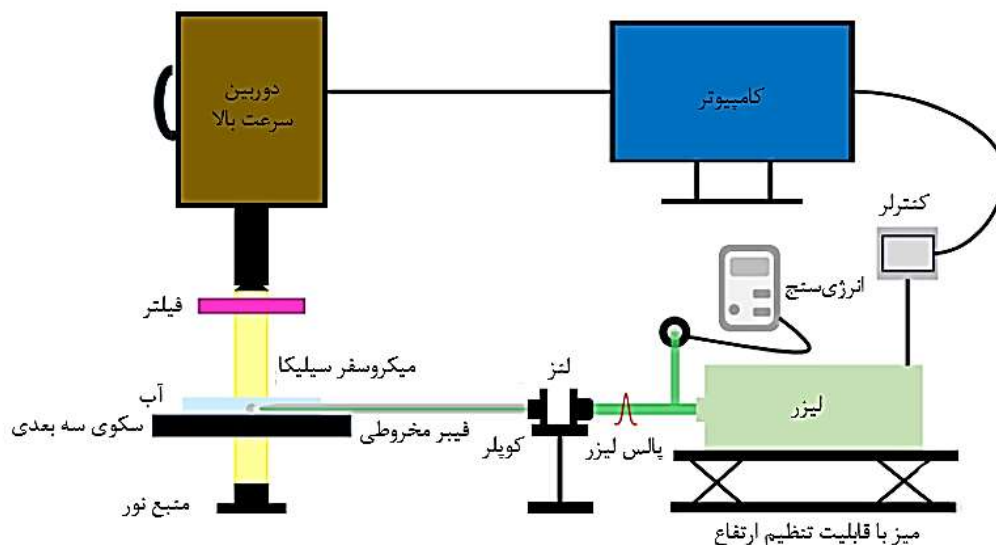
نویسندگان مقاله [101] دریافتند که این سیستم، انرژی لیزر را از طریق فیبرهای نوری هدایت می‌کند. این فیبرها، که به باریکی موی انسان هستند، سطح خارجی زیردریایی را پوشش می‌دهند و پرتوهای لیزری پر قدرت را برای حرکت زیردریایی در آب هدایت می‌کنند.



شکل ۱۰. شماتیک پیشرانه لیزری در زیر آب [101] همچنین حذف قطعات مکانیکی متحرک می‌تواند به کاهش نویز آکوستیکی منجر شود. چرا که در غیاب این

اجزاء، منابع تولید صداهای مکانیکی نظیر ارتعاش، اصطکاک و ضربه‌های ساختاری تا حد زیادی حذف یا میرا می‌گردند [100]. پیشرانشی لیزری زیر آب یک روش نوین برای تولید نیروی رانش است که بر پایه‌ی پدیده‌ی انفجار یا کاویتاسیون نوری شکل می‌گیرد. در این روش، انرژی یک پالس لیزری پرتوان در یک نقطه از آب متمرکز شده و منجر به شکست دی‌الکتریک آب و تشکیل پلازما می‌شود. گسترش سریع این پلازما پرفشار همچون یک انفجار عمل کرده و امواج ضربه‌ای (شوک) و حباب کاویتاسیونی در آب ایجاد می‌کند [102]. ابعاد حباب‌های کاویتاسیون نیز بر فرکانس غالب نویز اثرگذار است؛ هرچه شعاع حداکثری حباب در اولین نوسان آن بزرگ‌تر باشد، فروپاشی حباب شدیدتر خواهد بود [103]. بنابراین، حباب در پیشرانه لیزری زیرآبی نقشی کلیدی دارد و می‌تواند مستقیماً بر راندمان پیشرانه و میزان نویز لحظه‌ای سیستم اثر بگذارد.

پیشرانه لیزری فاقد قطعات متحرک مکانیکی است که غالباً منبع اصلی نویز مکانیکی‌اند، اما فرایندهایی مانند کاویتاسیون، انفجار پلاسمایی و فروپاشی حباب‌ها می‌توانند در صورت کنترل نشدن، نویزهای لحظه‌ای با شدت بالا ایجاد کنند [104]. شکل ۱۱ چیدمان آزمایشگاهی سامانه پیشران لیزری را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که داده‌ها با ابزارهایی مانند دوربین پرسرعت و سیستم‌های ثبت کامپیوتری به صورت تجربی قابل گردآوری هستند. بدین ترتیب، امکان مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم پدیده‌هایی چون پلازما، کاویتاسیون و امواج ضربه‌ای فراهم شده و ارتباط نتایج نظری با داده‌های تجربی کنترل نویز تضمین می‌گردد. این نوع پیشرانه می‌تواند در زمینه‌های مختلف مانند بررسی‌ها و اکتشافات دریایی به کار گرفته شود [105].



شکل ۱۱. نحوه تست تجربی یک پیشرانده لیزری در آب [۱۰۰]

## ۱-۵. فیزیک پیشرانده لیزری در محیط آبی و فرایندهای مولد نویز

اصول فیزیکی پیشرانده لیزری زیر آب بر تعامل پالس لیزر با آب و تبدیل انرژی نوری به انرژی مکانیکی استوار است. هنگامی که پالس لیزر به اندازه کافی پرتوان باشد و در آب متمرکز شود، شدت میدان به حد آستانه‌ی شکست دی‌الکتریک آب می‌رسد و باعث ایجاد پلاسمای داغ و پرفشار در نقطه‌ی کانونی می‌گردد [106]. این پلاسمای لحظه‌ای، به سرعت منبسط می‌شود و یک موج ضربه‌ای شبه‌کروی را در آب گسیل می‌کند. در مقایسه با محیط هوا، آستانه‌ی شکست در آب پایین‌تر است و در نتیجه تشکیل پلازما در آب آسان‌تر ایجاد می‌شود و به دلیل تراکم‌ناپذیری کمتر و چگالی بیشتر آب، جبهه‌ی موج ضربه‌ای در آب باریک‌تر و فشار پیک آن بالاتر است [107].

پس از تشکیل اولیه‌ی موج شوک، پلاسمای ایجادشده به صورت یک حباب گاز گسترش می‌یابد. این حباب کاویتاسیونی با انبساط سریع خود، یک موج فشار ثانویه ایجاد می‌کند و به آب پیرامون، نیروی رانشی اعمال می‌کند. حباب تا رسیدن به شعاع بیشینه انبساط می‌یابد و سپس تحت اثر فشار محیط شروع به انقباض

می‌کند که طی این انبساط و انقباض حباب، چندین نوسان ایجاد می‌شود [108]. هر بار که حباب به حداقل حجم خود می‌رسد، یک موج ضربه‌ای کوچک‌تر گسیل می‌شود. اگر حباب در نزدیکی یک سطح جامد قرار داشته باشد، طی انقباض یک جت مایع پر سرعت از حباب می‌تواند به سطح برخورد کند. این جت و برخورد آن با سطح نیز یک موج فشار ناگهانی ایجاد می‌کند [109].

در مجموع، سلسله فرایندهای ذکرشده (موج شوک اولیه، انبساط و نوسان حباب و جت و پاشش ناشی از انقباض) همگی به اعمال نیروی پیشرانده به جسم هدف منجر می‌شوند و هر مرحله نیازمند بررسی‌های آکوستیکی از منظور کنترل نویز تولیدی می‌باشد.

### ۲-۵. منابع نویز در پیشرانده‌های لیزری زیر آب

پدیده‌های همراه با پیشرانده لیزری در محیط آبی ذاتاً با انتشار امواج فشاری سریع و ناپایدار همراه هستند که به صورت نویز آکوستیکی ظاهر می‌شوند. مهم‌ترین منابع ایجاد نویز در این پیشرانده عبارتند از:

#### ۱-۲-۵. شوک اولیه پلاسمایی

موج ضربه‌ای پر قدرت که بلافاصله پس از شکست نوری آب و تشکیل پلازما ایجاد می‌شود، یک جهش ناگهانی

فشار است که بخش قابل توجهی از انرژی لیزر را به نویز کوتاه و شدید تبدیل می‌کند. این انفجار کوچک اولیه، شبیه صدای یک ترکیدگی بسیار تیز است و در محدوده‌ی فرکانسی وسیعی گسترده است.

### ۵-۲-۲. صدای کاویتاسیون و نوسان حباب

حباب بخار تشکیل شده پس از انفجار اولیه با انبساط و انقباض، خود نیز امواج فشاری منتشر می‌کند. هر نوسان (انبساط و انقباض) حباب، یک تپ فشار در آب ایجاد می‌کند که منبع نویز تکرارشونده است [110]. اگرچه دامنه‌ی این امواج معمولاً از موج شوک اولیه کمتر است، اما فرکانس پایین‌تر و مدت طولانی‌تری دارند و می‌توانند در مجموع انرژی صوتی قابل توجهی ایجاد کنند. در لحظه‌ی فروپاشی حباب، به علت تجمع انرژی و افزایش ناگهانی فشار درون حفره، یک موج شوک ثانویه قوی گسیل می‌شود که عامل ایجاد نویز است. در واقع نویز کاویتاسیون ترکیبی از چندین موج شوک کوچک‌تر است که به صورت پالس‌های متوالی شنیده می‌شود.

### ۵-۲-۳. جت مایع و امواج ثانویه

در صورتی که حباب کاویتاسیونی نزدیک یک سطح (مثلاً بدنه‌ی خود ربات) باشد، هنگام انقباض یک جت پرسرعت به سمت آن سطح تشکیل می‌شود. برخورد این جت با بدنه و پاشش ناشی از آن، خود یک منبع نویز است. این برخورد ناگهانی مانند یک ضربه‌ی مکانیکی به بدنه عمل می‌کند و موج‌های فشاری در ماده و آب اطراف منتشر می‌کند [111].

### ۵-۲-۴. سنجش آکوستیکی پیشرانه‌های لیزری

سنجش آکوستیکی پیشرانه‌های لیزری با هدف ارزیابی شدت و طیف نویز حاصل از شوک پلاسما و کاویتاسیون انجام می‌شود. در جدول ۴ به بررسی آکوستیکی این پیشرانه پرداخته شده است.

جدول ۴. تحلیل آکوستیکی پیشرانه‌های لیزری زیر آب

تحلیل عملکردی	بُعد تحلیلی
شکست دی‌الکتریک آب و گسترش سریع پلاسما به علاوه کاویتاسیون کنترل شده	مکانیزم تولید نیرو
فاقد نویز مکانیکی کلاسیک (اصطکاک، موتور)، اما دارای نویز لحظه‌ای شدید فرکانس بالا و کاویتاسیون	سطح نویز پایه
از طریق تنظیم انرژی لیزر، موقعیت پلاسما، غلظت مایع، اندازه حباب و ...	کنترل‌پذیری نویز
فاقد ارتعاشات ساختاری، نویز در باند فرکانسی خاص با قابلیت میراشوندگی سریع	پتانسیل پنهان‌کاری صوتی

### ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی جامع چهار فناوری پیشرانه نوین زیرآبی اشاره شده، می‌توان نتیجه گرفت که هر یک از این سامانه‌ها بسته به مأموریت، ابعاد ربات، سطح نویز انتشاری و نیاز به پنهان‌کاری، مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند و هر یک نمایانگر نسل جدیدی از فناوری‌هایی هستند که می‌توانند جایگزین‌های مؤثری برای سامانه‌های سنتی مانند پروانه‌ها باشند. پیشرانه آکوستیکی با ساختاری ساده و نویز آکوستیکی ناچیز به ویژه نوع موج سطحی آکوستیکی، راهکاری ایده‌آل برای سامانه‌های کوچک فراهم می‌آورد. پیشرانه‌های واترجت نیز به دلیل بهره‌گیری از ساختار مجرای، ایجاد حباب‌های کاویتاسیون را محدود می‌کنند و در نتیجه عملکردی کم‌نویزتر نسبت به پیشرانه‌های پروانه‌ای دارند. پیشرانه‌های زیست‌تقلید نیز چابکی، تطبیق‌پذیری و شفافیت آکوستیکی را در سطح بالایی ممکن ساخته است و در صورت طراحی بهینه می‌توانند سطح نویز بسیار پایینی داشته باشند. همچنین، پیشرانه لیزری با قابلیت حذف کامل قطعات مکانیکی، مسیر جدیدی را برای بررسی امکان‌پذیری زیرسطحی‌های صامت و پنهان‌کار گشوده است. هرچند از نظر عملیاتی هنوز در مراحل ابتدایی توسعه بوده و نویز قابل توجهی نیز دارد، نتایج این مطالعه نشان

زیرسطحی فراهم می‌سازد و ترکیب این فناوری‌ها در چارچوب طراحی‌های ترکیبی و ماژولار، می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از سامانه‌های پیشران‌ش زیرسطحی منجر شود.

می‌دهد که جایگزینی پیشران‌های غیرپروانه‌ای با سیستم‌های سنتی مبتنی بر پروانه، مسیر امیدوارکننده‌ای برای ارتقای پنهان‌کاری، کاهش نویز آکوستیکی و بهبود عملکرد عملیاتی ربات‌های

جدول ۵. راهنمای انتخاب پیشران‌های غیرپروانه‌ای زیرسطح برحسب سناریو و مقیاس عملیاتی

سناریو	هدف/شرایط کلیدی	پیشنهاد پیشران
AUV کوچک پنهان‌کار	اولویت با SPL پایین و مانور	زیست‌تقلیدی یا آکوستیکی
UUV متوسط/بزرگ با جابجایی سریع	کارایی پیشران‌ش، پایداری در سرعت متوسط و بالا	واترجت
مأموریت شناسایی ساحلی پنهان‌کار	نویز بسیار کم، مانور بالا	زیست‌تقلیدی (+جاذب صوتی)
میکروروبات/آزمایشگاهی	مقیاس بسیار کوچک، پالس‌های کنترل‌شده	لیزری

جدول ۶. مقایسه آکوستیکی چهار فناوری نوین پیشرانه زیرآبی

مؤلفه آکوستیکی/ نوع پیشران	آکوستیکی	بیومیمتیک	واترجت	لیزری
منشأ نویز اصلی	تپ صوتی سطحی/ فشار تابشی	نوسانات بدنه، جریان دنباله، جداشدگی گردابه و ...	پمپ، جریان آشفته، کاویتاسیون	موج شوک پلاسما، کاویتاسیون، جت برخوردی
طیف فرکانسی نویز	ده‌ها تا صدها کیلوهرتز (فراصوت)	وابسته به عدد استروهال و رینولدز	۵-۰ کیلوهرتز (تونال پایین)	چند کیلوهرتز تا ده‌ها کیلوهرتز (شوک ضربه‌ای)
شدت نویز	بسیار پایین	پایین (تا ۱۵ دسی‌بل کاهش با پوشش بیومیمتیک)	بالا (مطلوب‌تر از پروانه)	از نظر تئوری قابل کنترل اما از نظر تجربی بررسی نشده است.
قابلیت کنترل نویز	بالا (توسط طراحی مبدل، فرکانس)	بالا (با انتخاب الگو، پوشش، فرکانس، هندسه)	نیاز به آکومولاتور، داکت دنداندار و ...	متوسط (تنظیم انرژی پالس، غلظت محیط و ...)
بررسی پنهان‌کاری	بسیار مناسب	مناسب‌ترین گزینه در کاربرد مخفی	مطلوب (نیازمند اصلاحات)	نیازمند بررسی عملی

محیطی و همبستگی با سطح فشار صوت<sup>۲۸</sup> و باندهای فرکانسی متناظر را دنبال کنند. به‌کارگیری این چارچوب دوگانه به استانداردسازی سنجه‌ها، اعتبارسنجی راهبردهای کاهش نویز<sup>۲۹</sup> و برآورد ریسک آشکارسازی در مقیاس‌ها و فناوری‌های مختلف منجر می‌شود.

برای تقویت دانش تجربی نویز پیشران‌ش، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی به طور هم‌زمان دو مسیر سنجش مستقیم نویز تشعشعی زیرآب<sup>۲۵</sup> همراه با طیف‌نگاری و شکل‌دهی پرتو<sup>۲۶</sup> به منظور تفکیک منبع نویز و برآورد سهم زیرسامانه‌ها و سنجش غیرمستقیم از طریق پایش آکوستیک غیرفعال<sup>۲۷</sup> و رصد شاخص‌های رفتاری جانداران آبی با کنترل متغیرهای

- [1] Tanttari, Jukka, and Antti Hynninen. "Marine propulsor underwater radiated noise emission characterization using sensor arrays." *Applied Acoustics* 221 (2024): 110021.
- [2] Smith, Tom A., and Jake Rigby. "Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology." *Ocean Engineering* 266 (2022): 112863.
- [3] Qu, Yegao, Jinpeng Su, Hongxing Hua, and Guang Meng. "Structural vibration and acoustic radiation of coupled propeller-shafting and submarine hull system due to propeller forces." *Journal of Sound and Vibration* 401 (2017): 76-93.
- [4] Caresta, Mauro, and Nicole J. Kessissoglou. "Reduction of hull-radiated noise using vibroacoustic optimization of the propulsion system." *Journal of Ship Research* 55, no. 03 (2011): 149-192.
- [5] Imo, M. "Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life." *MEPC 1* (2014): 1.
- [6] Isaka, Keita, Naoaki Tadami, Ami Fujiwara, Tomoki Watanabe, M. Sugawara, Y. Yamada, Hiroshi Yoshida, and Tomoki Nakamura. "Study on drilling resistance reduction of a seafloor robotic explorer based on the drilling properties of underwater ground." In *2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 718-723. IEEE, 2019.
- [7] Ru, Jingyu, Han Yu, Hao Liu, Jiayuan Liu, Xiangyue Zhang, and Hongli Xu. "A bounded near-bottom cruise trajectory planning algorithm for underwater vehicles." *Journal of Marine Science and Engineering* 11, no. 1 (2022): 7.
- [8] Leng, Dingxin, Shuai Shao, Yingchun Xie, Honghui Wang, and Guijie Liu. "A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle." *Ocean Engineering* 228 (2021): 108565.
- [9] Petillot, Yvan R., Gianluca Antonelli, Giuseppe Casalino, and Fausto Ferreira. "Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26, no. 2 (2019): 94-101.
- [10] Zhou, Jing, Yulin Si, and Ying Chen. "A review of subsea AUV technology." *Journal of Marine Science and Engineering* 11, no. 6 (2023): 1119.
- [11] Ghatak, Arpan, Koena Mukherjee, and Yogesh Singh. "Classification on unmanned underwater vehicles: A review." *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 17, no. 3-4 (2023): 192-220.
- [12] Guo, Chunyu, Liyu Ye, and Kaiqiang Weng. "Review of Theory and Experiment for Underwater Propulsion." In *International Conference on Marine Equipment & Technology and Sustainable Development*, pp. 727-752. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.
- [13] Seol, Hanshin, Byungsok Jung, J-C. Suh, and Soogab Lee. "Prediction of non-cavitating underwater propeller noise." *Journal of sound and Vibration* 257, no. 1 (2002): 131-156.
- [14] Majumder, Pritam, and Subhendu Maity. "A critical review of different works on marine propellers over the last three decades." *Ships and Offshore Structures* 18, no. 3 (2023): 391-413.

- [15] Kong, Deqing, Kazuki Nishio, and Minoru Kuribayashi Kurosawa. "Surface acoustic wave propulsion system with acoustic radiation force." *Sensors and Actuators A: Physical* 309 (2020): 111943.
- [16] Zhou, Pei Jian, Tao Liu, Xiao Hong Zhou, Jie Gang Mou, Shui Hua Zheng, Yunqing Gu, and Deng Hao Wu. "Overview of progress in development of the bionic underwater propulsion system." *Journal of biomimetics, biomaterials and biomedical engineering* 32 (2017): 9-19.
- [17] Xin, Ba, Luo Xiaohui, Shi Zhaocun, and Zhu Yuquan. "A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles." *Ocean engineering* 74 (2013): 133-140.
- [18] Han, Bing, Zhong-Hua Shen, Jian Lu, and Xiao-Wu Ni. "Laser propulsion for transport in water environment." *Modern Physics Letters B* 24, no. 07 (2010): 641-648.
- [19] Bourquin, Yannik, and Jonathan M. Cooper. "Swimming using surface acoustic waves." *PloS one* 8, no. 2 (2013): e42686.
- [20] Kong, Deqing, Takumi Hirata, Yimeng Wang, Fei Li, Minoru Kuribayashi Kurosawa, and Manabu Aoyagi. "Acoustic underwater propulsion system based on ultrasonic disc PZT transducer." *Sensors and Actuators A: Physical* 359 (2023): 114502.
- [21] Kong, Deqing, et al. "Evaluation Method for Acoustic Underwater Propulsion Systems." *The Journal of the Acoustical Society of America* 150, no. 2 (2021): 1157–1164.
- [22] Wang, Zhiwei, Chengliang Dong, Zhenmeng Zhang, Qunhong Tian, Aiqin Sun, Liang Yuan, and Lijun Zhang. "Review of Multi-Fin Propulsion and Functional Materials of Underwater Bionic Robotic Fish." *Proceedings of the IMechE, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* (2022). <https://doi.org/10.1177/09544062221077058>.
- [23] Cui, Zhongao, Liao Li, Yuhang Wang, Zhiwei Zhong, and Junyang Li. "Review of research and control technology of underwater bionic robots." *Intelligent Marine Technology and Systems* 1, no. 1 (2023): 7.
- [24] Xianqian, Wu, Wang Yiwei, and Huang Chenguang. "Physics of laser propulsion underwater: experiments and modeling." *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 47, no. 4 (2015): 687-698.
- [25] Wang, Panbing, Xinyu Liu, and Aiguo Song. "Actuation and locomotion of miniature underwater Robots: A survey." *Engineering* (2024).
- [26] Zheng, Xiuli, Junming Liu, Le Wang, Si Chen, and Zhiling Liu. "Development of a pump-jet piezoelectric swimmer with acoustic radiation actuation." *Smart Materials and Structures* 33, no. 9 (2024): 095015.
- [27] Qian, Y., D. Kong, D. Nagasaki, M. Aoyagi, and M. K. Kurosawa. "A Miniature Swimmer Actuated by a PZT Ring Ultrasonic Underwater Propulsion System." *Japanese Journal of Applied Physics* 63, no. 4 (2024): 04SP48.
- [28] Li, Xinjian, Di Chen, Jiamei Jin, and Liang Wang. "A novel underwater piezoelectric thruster with one single resonance mode." *Review of Scientific Instruments* 90, no. 4 (2019).
- [29] Nguyen, Q. S., S. Heo, H. C. Park, and D. Byun. "Performance Evaluation of an Improved Fish Robot Actuated by Piezoceramic Actuators." *Smart Materials and Structures* 19, no. 3 (2010): 035030.

- [30] Lu, X., et al. "A Novel Dual-Rotor Ultrasonic Motor for Underwater Propulsion." *Applied Sciences* 10, no. 1 (2019): 31.
- [31] Kim, So Yul, et al. "Novel Ultrasonic Technology for Advanced Oxidation Processes of Water Treatment." *RSC Advances* 14, no. 17 (2024): 11939–11948.
- [32] Surface Acoustic Wave Propulsion System with Acoustic Radiation Force." *Sensors and Actuators A: Physical* 309 (2020): 111943. Accessed May 20, 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424719320874>.
- [33] Vidhya, N. Gowri, Athish R. G., and Binumon V. R. "Energy Efficient Underwater Wireless Power Transfer Networking." *Grenze International Journal of Engineering & Technology (GIJET)* 10 (۲۰۲۴).
- [34] Allison, Eric M., George S. Springer, and Jacques Van Dam. "Ultrasonic propulsion." *Journal of propulsion and power* 24, no. 3 (2008): 547-553.
- [35] Hasegawa, Takeshi, James Friend, Kentaro Nakamura, and Sadayuki Ueha. "Characteristics of ultrasonic suction pump without moving parts." *Japanese journal of applied physics* 44, no. 6S (2005): 4658.
- [36] Backer, Alexander, Sandro Krempel, Frank Ritter, Sabrina Tietze, and Klaus S. Drese. "Ship Propulsion by Means of Acoustic Radiation." In *ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021*, pp. 1-4. VDE, 2021.
- [37] Ding, Xiaoyun, Peng Li, Sz-Chin Steven Lin, Zackary S. Stratton, Nitesh Nama, Feng Guo, Daniel Slotcavage et al. "Surface acoustic wave microfluidics." *Lab on a Chip* 13, no. 18 (2013): 3626-3649.
- [38] Feng, Jian, Junqi Yuan, and Sung Kwon Cho. "Micropropulsion by an acoustic bubble for navigating microfluidic spaces." *Lab on a Chip* 15, no. 6 (2015): 1554-1562.
- [39] Bourquin, Yannyk, and Jonathan M. Cooper. "Swimming using surface acoustic waves." *PloS one* 8, no. 2 (2013): e42686..
- [40] Zhang, Naiqing, Yue Wen, and James Friend. "MHz-order surface acoustic wave thruster for underwater silent propulsion." *micromachines* 11, no. 4 (2020): 419.
- [41] Prøytz, C. Underwater Ultrasonic Transducer Technology: Construction, Characterization and Finite-Element Modelling. Master's thesis, University of Bergen, 2022. <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/11250/2994251>.
- [42] Deane, Grant B. "The Wenz curves for underwater ambient sound." *The Journal of the Acoustical Society of America* 157, no. 5 (2025): R9-R10.
- [43] Thomas, A. P., Michele Milano, M. Grazier G'Sell, Kathleen Fischer, and Joel Burdick. "Synthetic jet propulsion for small underwater vehicles." In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 181-187. IEEE, 2005.
- [44] Kong, Deqing, Takumi Hirata, Yimeng Wang, Fei Li, Minoru Kuribayashi Kurosawa, and Manabu Aoyagi. "Acoustic Underwater Propulsion System Based on Ultrasonic Disc PZT Transducer." *Sensors and Actuators A: Physical* 359 (2023): 114502. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114502>.
- [45] Del Campo Fonseca, Alexia. "Acoustic Microbubble Microrobots for Biomedical Applications in the Brain." PhD diss., ETH Zurich, 2024.

- [46] Kong, Deqing, Ryo Tanimura, Fang Wang, Kailiang Zhang, Minoru Kuribayashi Kurosawa, and Manabu Aoyagi. "Swimmer with submerged SiO<sub>2</sub>/Al/LiNbO<sub>3</sub> surface acoustic wave propulsion system." *Biomimetic Intelligence and Robotics* 4, no. 2 (2024): 100159.
- [47] Hong, Chong, Yingdan Wu, Che Wang, Ziyu Ren, Chunxiang Wang, Zemin Liu, Wenqi Hu, and Metin Sitti. "Wireless flow-powered miniature robot capable of traversing tubular structures." *Science Robotics* 9, no. 88 (2024): eadi5155.
- [48] Li, Qiuyang, Nan Li, Yukun Luo, Hongkai Yu, Xin Ma, Xu Zhang, and Jie Tang. "Role of intraoperative ultrasound in robotic-assisted radical nephrectomy with inferior vena cava thrombectomy in renal cell carcinoma." *World Journal of Urology* 38, no. 12 (2020): 3191-3198.
- [49] Winchester, Clinton, Justin Govar, Julie Banner, Tracey Squires, and Patricia Smith. "A survey of available underwater electric propulsion technologies and implications for platform system safety." In *Proceedings of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, 2002., pp. 129-135. IEEE, 2002.
- [50] Li, Shijie, Qiao Hu, Tangjia Zhang, et al. "Bionic Parallel Undulating Fins: Influence of Unsteady Coupling Effect on Robot Propulsion Performance." *Ocean Engineering* 312 (2024): 119075.
- [51] Anderson, Jamie M., and Peter A. Kerrebrock. "15 Biomimetics in Action: Design And."
- [52] Kawamura, Yoshimasa, Junichi Shimoya, Eiji Yoshida, Naomi Kato, Hiroyoshi Suzuki, and Hidetaka Senga. "Design and Development of Amphibious Robot with Fin Actuators." *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 20, no. 03 (2010).
- [53] Wright, Marvin. Numerical and Experimental Investigation of Bio-Inspired Robot Propulsion and Manoeuvring. 2024.
- [54] Zhang, Zhonggang, Wei Gao, Shangzhong Wang, Binghe Ma, Jian Luo, and Jinjun Deng. "Flow noise around underwater axisymmetric models with Bio-Inspired Coating." In *2020 IEEE SENSORS*, pp. 1-4. IEEE, 2020.
- [55] Webb, Paul W. "Form and Function in Fish Swimming." *Scientific American* 251, no. 1 (1984): 72-83.
- [56] Salazar, R, V Fuentes, and A Abdelkefi. "Classification of Biological and Bioinspired Aquatic Systems: A Review." *Ocean Engineering* 148 (2018): 75-114.
- [57] Jiao, Zhi-Wei, Hao-Yu Wang, Bin Luo, Wei-Min Yang, and Yuan Yu. "A BCF bionic robot fish driven by a dielectric elastomer actuator." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2331, no. 1, p. 012010. IOP Publishing, 2022.
- [58] Luo, Kunhui, Lan Yan, Zhiyi Zhu, Zhongqiu Wang, Hongru Wang, and Feng Jiang. "Application of Bionic Technology in Marine Cruise Equipment: Research Progress and Development Trends." *Journal of Bionic Engineering* 21, no. 3 (2024): 1117-55.
- [59] Li, He, Guanzhong Wang, Longjie Li, et al. "Design of the Swimming System of a Bionic Jellyfish Robot for Seabed Exploration." *Applied Ocean Research* 134 (2023): 103498.
- [60] Zhang, Xin, Jihong Yan, Kai Yang, Jie Zhao, and Shufeng Tang. "A Rapid Water Sliding Robot Optimized by Bionic Motion Trajectory." *IEEE Robotics and Automation Letters* 7, no. 2 (2022): 2463-70.

- [61] Gu, Shuoxin, and Shuxiang Guo. "Performance Evaluation of a Novel Propulsion System for the Spherical Underwater Robot (SURIII)." *Applied Sciences* 7, no. 11 (2017): 1196.
- [62] Siddharth Gupta, Amit Agrawal, Kerry Hourigan, Mark C. Thompson and Atul Sharma "Anguilliform and Carangiform Fish-Inspired Hydrodynamic Study for an Undulating Hydrofoil: Effect of Shape and Adaptive Kinematics." *Physical Review Fluids* 7, no. 9 (2022): 094102. Accessed May 20, 2025.
- [63] "The Response of Anguilliform Fish to Underwater Sound under an Experimental Setting." *River Research and Applications* 36, no. 8 (2020): 1453–1462..
- [64] Wang, Tianmiao, Zhihui Zhang, Xinyu Wang, and Jingchuan Liu. "Development and Motion Control of Biomimetic Underwater Robots: A Survey." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* (2020).
- [65] Kim, Youngjin, Junwoo Park, and Juhyuk Choi. "Parametric Analysis on the Acoustic Characteristics Generated by a Biomimetic Swimmer." *Journal of Sound and Vibration* 582 (2024): 118527.
- [66] Fish, Frank E., and Malcolm A. Rohr. "Strouhal Numbers and Optimization of Swimming by Odontocete Cetaceans." *Journal of Experimental Biology* 207, no. 10 (2004): 1633–1642..
- [67] Song, Yujie, Peng Ming, and Bo Xun. "Research on Similarity Law of the Flow-Induced Noise of the Submarine." *The Journal of the Acoustical Society of America* 156, no. 6 (2024): 4010–4023.
- [68] Dai, Xiwen. "Vortical–acoustic resonance in an acoustic resonator: Strouhal number variation, destabilization and stabilization." *Journal of Fluid Mechanics* 919 (2021): A19.
- [69] Grande, Edoardo, Daniele Ragni, Francesco Avallone, and Damiano Casalino. "Laminar separation bubble noise on a propeller operating at low Reynolds numbers." *AIAA Journal* 60, no. 9 (2022): 5324-5335.
- [70] Zhang, Zhihui, Qiang Wang, and Shuo Zhang. "Review of Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetic Applications for Underwater Vehicles." *Biomimetics* 9, no. 2 (2024): 79.
- [71] Weijie Chen a, Weiyang Qiao a b, Wenhua Duan a and Zuojun Wei "Experimental Study of Airfoil Instability Noise with Wavy Leading Edges." *Applied Acoustics* 178 (2021): 108032..
- [72] Zhang, Zhihui, Wei Gao, Shanshan Wang, Bo Ma, Jun Luo, and Jian Deng. "Flow Noise Around Underwater Axisymmetric Models with Bio-Inspired Coating." In *2020 IEEE Sensors Conference*, 1–4. New York: IEEE, 2020.
- [73] Liu, Jialin, Yuqing Hou, Chenxi You, Yong Zou, Chengwang Xiong, Dajing Shang, Pengyu Lv, Hongyuan Li, and Huiling Duan. "Noise reduction measurement and biomimetic propeller optimization designs for unmanned underwater vehicles." *Experiments in Fluids* 66, no. 4 (2025): 1-23.
- [74] Zhao, Zhen, Yifeng Zhang, Hong Liu, and Feng Chen. "A Comprehensive Review on the Evolution of Bio-Inspired Sensors from Aquatic Creatures." *Cell Reports Physical Science* 5, no. 7 (2024): 102064.
- [75] Zhang, Jie, Tian Zhang, Erdong Dong, Cheng Zhang, Zhiyuan Lin, Zhen Song, Hong Li, Nicholas X. Fang, and Yong Zhang. "Bioinspired Hydrogel Jellyfish with Mechanical Flexibility and Acoustic Transparency." *Cell Reports Physical Science* 3, no. 10 (2022): 101081.

- [76] Zheng, Jian, Peng Zhou, Yanan Li, and Liang Xu. "Smart Skin of Underwater Vehicle with Dual Functions of Sound Detection and Absorption." *Nano Energy* 129 (2024): 110053.
- [77] Dong, Huijie, Wei Zhang, Yifan Xu, and Fangcheng Zhong. "Water Entry Locomotion Strategy for a Stranding Bionic Robotic Fish." *Journal of Field Robotics* 41, no. 8 (2024): 2493–2505.
- [78] Li, Chao, and Junfeng Wang. "The Computational Design of a Water Jet Propulsion Spherical Underwater Vehicle." IEEE Conference Publication (2011).
- [79] Rowinski, L., and M. Kaczmarczyk. "Evaluation of Effectiveness of Waterjet Propulsor for a Small Underwater Vehicle." *Polish Maritime Research* 28, no. 4 (2021): 30–41.
- [80] Zhang, Wei, Zhiqiang Liu, and Lei Wang. "A Review on Hydrodynamic Performance and Design of Pump-Jet: Advances, Challenges and Prospects." *Journal of Marine Science and Engineering* 10, no. 10 (2022): 1514.
- [81] Liu, Tengyan, Jitao Qiu, Haohan Geng, Youlin Cai, Zonglong Wang, and Jin Tao. "Underwater Radiated Noise Characteristics: A Comparative Study of Immersed and Traditional Waterjet Propulsion Systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* (2025).
- [82] Chen, Liang, Zhenhua Wu, and Feng Zhou. "Numerical Prediction of the Fluctuating Noise Source of Waterjet in Full Scale." *Journal of Marine Science and Technology* 20, no. 3 (2015): 421–434.
- [83] Wang, Rui, Hao Zhang, and Jian Liu. "Research on the Underwater Noise Radiation of High Pressure Water Jet Propulsion." *Ocean Engineering* 225 (2021): 108438
- [84] Sun, Yiming, and Lei Chen. "The Investigation on Calculating and Measuring the Flow Noise from Underwater Jets." IEEE Conference Publication (2015).
- [85] Li, Sheng, Yifan Wang, Bo Zhang, and Lin Zhao. "Biomimetic Robotic Sea Lion Foreflippers: Design, Modeling, and Experimentation." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 27, no. 6 (2022): 5679–5689.
- [86] Si, Qiaorui, Shouqi Yuan, Jianping Yuan, and Gérard Bois. "Investigation on the Influence of Jetting Equipment on the Characteristics of Centrifugal Pump." *Advances in Mechanical Engineering* 8, no. 8 (2016): 1-9.
- [87] Luo, Xin, Qiang Li, Zhiyong Zhang, and Jun Zhang. "Research on the Underwater Noise Radiation of High Pressure Water Jet Propulsion." *Ocean Engineering* 219 (2021): 108438.
- [88] Huang, Rui, Lei Chen, Yifan Xu, and Xiaolong Wang. "Investigations into the Unsteady Internal Flow Characteristics for a Waterjet Propulsion System at Different Cruising Speeds." *Ocean Engineering* 203 (2020): 107218.
- [89] Zhou, Shuo, Hao Wang, and Xiaolong Shen. "Analysis of Noise Characteristics of Pump Injection Propeller." In *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 1–7. IEEE, 2024.
- [90] Chen, Yujie, Haoran Liu, and Qiang Zhou. "Analysis and Design of a Water Pump with Accumulators Absorbing Pressure Pulsation in High-Velocity Water-Jet Propulsion System." *Journal of Marine Science and Technology* (2015).

- [91] Chen, Yujie, Haoran Liu, and Qiang Zhou. "Analysis and Design of a Water Pump with Accumulators Absorbing Pressure Pulsation in High-Velocity Water-Jet Propulsion System." *Journal of Marine Science and Technology* (2015).
- [92] Wang, Xiaoyu, Ming Zhang, Lei Chen, and Rui Xu. "Orthogonal Experimental Design-Based Nozzle Geometry Optimization for the Underwater Abrasive Water Jet." *Machines* 10, no. 12 (2022): 1243.
- [93] Qin, Dong, Guoliang Pan, Seong Lee, Qiang Huang, and Yong Shi. "Underwater Radiated Noise Reduction Technology Using Sawtooth Duct for Pumpjet Propulsor." *Ocean Engineering* 188 (2019): 106228.
- [94] Liu, Hao, Chen Kang, Wei Zhang, and Tao Zhang. "Flow Structures and Cavitation in Submerged Waterjet at High Jet Pressure." *Experimental Thermal and Fluid Science* 88 (2017): 504–512.
- [95] Li, Zhiyuan, Weijun Wang, Xiaoyan Ji, Yifan Wang, and Xiaolong Wang. "Active Flow Control on Unsteady Cloud Cavitation: Insights into Jet Dynamics." *Applied Ocean Research* 151 (2024): 104152.
- [96] Li, Hong, Yifan Ge, Zhi Chen, and Yong Wang. "Metal Microspheres Propelled by Shock Wave Based on the Fiber Structure Laser Propulsion." *Optics Communications* 508 (2022): 127695.
- [97] Wang, Lei, Min Dai, Qing Zhao, and Xiaolong Wang. "Mechanism Research of the Laser Propulsion of Bulk Graphene Sponge Material through High Vacuum Experiment." *Vacuum* 191 (2021): 110334.
- [98] Han, Bing, Feng He, Liang Fang, Yong Wang, and Zhi Chen. "Laser Propulsion for Transport in Water Environment." *Modern Physics Letters B* 24, no. 7 (2010): 641–648. Accessed January 14, 2025.
- [99] Li, Hong, Yifan Ge, Zhi Chen, and Yong Wang. "Laser Propulsion of Microsphere in Water Using Tapered Fiber-Induced Shock Wave." *AIP Advances* 14, no. 9 (2024): 095302.
- [100] Ge, Yang, Xianqi Tang, Ying Chen, Gaoqian Zhou, Xulong Yang, and Hanyang Li. "The Experimental Study on Concentration Disturbance Pattern and Conversion Mechanism of Underwater Plasma Laser Propulsion." *SSRN Electronic Journal* (2024).
- [101] 葛杨, 李寒阳, 王鸿涛, 唐显淇, 周高仟, and 杨旭龙. "水下光纤纳秒激光推进的短微腔结构性能研究." *Acta Optica Sinica* 44, no. 6 (2024): 0614001–0614001.
- [102] Qiang, Haoyu, Bin Zhao, Ling Wu, Xiang Li, and Yong Chen. "Liquid Resistance in Underwater Laser Propulsion." *Applied Optics* 64, no. 8 (2025): 1864–1870.
- [103] Chen, Jie, Bing Han, Binbo Li, Zhenghong Shen, Jian Lu, and Xuwei Ni. "The Collapse of a Bubble against Infinite and Finite Rigid Boundaries for Underwater Laser Propulsion." *Journal of Applied Physics* 109, no. 8 (2011): 083101.
- [104] Han, Bing, Feng He, Liang Fang, Yong Wang, and Zhi Chen. "Numerical Study of Water-Confinement Geometries for Laser Propulsion." *Optics and Lasers in Engineering* 48, no. 10 (2010): 950–957.

- [105] Zhou, Guangming, Yifan Li, Wei Zhang, and Han Lin. "Ablative Laser Propulsion, the Propellants and Measuring Parameters: A Brief Review." *Journal of Laser Applications* 36, no. 2 (2024): 021201.
- [106] Han, Bing, Feng He, Liang Fang, Yong Wang, and Zhi Chen. "Laser Propulsion for Transport in Water Environment." *Modern Physics Letters B* (2010)..
- [107] Liu, Rong, Junhao Wang, Ling Xu, and Xin Zhao. "Propulsion Effects after Laser Ablation in Water, Confined by Different Geometries." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 126 (2020): 315.
- [108] Li, Hong, Yang He, Gaoqian Zhou, and Yifan Ge. "Experimental Investigations of Underwater Laser Propulsion Microspheres Based on a Tapered Fiber Propulsion System." *Applied Physics B: Lasers and Optics* 128, no. 11 (2022): 195.
- [109] Zhou, Guangming, Yifan Li, Wei Zhang, and Han Lin. "Ablative Laser Propulsion, the Propellants and Measuring Parameters: A Brief Review." *Journal of Laser Applications* 36, no. 2 (2024): 021201.
- [110] Chen, Li, Rong Wu, Ming Zhao, and Xiaoyu Zhang. "Cavitation Effect of Holmium Laser Pulse Applied to Ablation of Hard Tissue Underwater." *Journal of Biomedical Optics* 15, no. 4 (2010): 048002.
- [111] Jia, Zhiyong, Wei Zhang, Hong Li, Yuxin Chen, and Fang Liu. "Dynamics of Laser-Induced Plasma and Cavitation Bubble at High Pressures and the Impacts on Underwater LIBS Signals." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 209 (2023): 106793.

<sup>1</sup> Remotely Operated Vehicle (ROV)

<sup>2</sup> Autonomous underwater vehicle (AUV)

<sup>3</sup> Biomimetic

<sup>4</sup> Surface acoustic waves (SAW)

<sup>5</sup> Bulk acoustic waves (BAW)

<sup>6</sup> Vectoring control

<sup>7</sup> Acoustic Streaming

<sup>8</sup> Thrust Force

<sup>9</sup> در این روش، دیسک پیزوالکتریک در یکی از موده‌های شدید شعاعی یا خمشی پیرامون فرکانس شدید، برانگیخته می‌شود. در حالت شدید، دامنه تغییر مکان و کرنش دیسک به حداکثر می‌رسد و انرژی الکتریکی با کارایی بالاتری به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. دیسک از طریق یک نگهدارنده سبک به شفت پروانه متصل است و ارتعاش آن باعث چرخش پروانه در آب می‌شود.

<sup>10</sup> MUVs (Micro underwater vehicles)

<sup>11</sup> Lithium niobate

<sup>12</sup> Coupling

<sup>13</sup> RoboTuna

<sup>14</sup> Body-Caudal Fin (BCF)

<sup>15</sup> Median Paired Fin (MPF)

<sup>16</sup> Bio-waterjet propulsion

<sup>17</sup> Anguilliform

<sup>18</sup> Carangiform

<sup>19</sup> Strouhal number

<sup>20</sup> National Advisory Committee for Aeronautics airfoils (NACA airfoils)

---

<sup>۲۱</sup> فرکانس تونال به فرکانس‌های مشخص و باریکی گفته می‌شود که در طیف نویز به صورت پیک‌های واضح ظاهر می‌شوند. این فرکانس‌ها معمولاً حاصل از یک منبع ارتعاش دوره‌ای هستند.

<sup>۲۲</sup> Accumulator

<sup>۲۳</sup> Arthur Kantrowitz

<sup>۲۴</sup> Han

<sup>۲۵</sup> Underwater Radiated Noise (URN)

<sup>۲۶</sup> beamforming

<sup>۲۷</sup> Passive Acoustic Monitoring (PAM)

<sup>۲۸</sup> Sound prssure level (SPL)

<sup>۲۹</sup> Mitigation