مقاله ترویجی

هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی: تعاریف و کاربردها

امید کاظمی آهوئی
کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تفرش
Mch401.kazemi@tafreshu.ac.ir

ابوالفضل حسنی بافرانی*
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تفرش
Baferani@tafreshu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

چکیده

در بستر اقیانوس‌ها و دریاها، صدا یکی از مؤثرترین ابزارهای ارتباطی و تحلیلی به‌شمار می‌رود، به‌ویژه در محیط‌هایی که نور به سختی نفوذ می‌کند. در این میان، هیدروفون‌ها، به‌عنوان حسگرهای تخصصی آکوستیک در زیر آب، نقش کلیدی در آشکارسازی، پایش و تحلیل پدیده‌های صوتی ایفا می‌کنند. این دستگاه‌ها با تبدیل امواج فشاری صوت به سیگنال‌های الکتریکی، امکان شنود و ثبت صداهای زیرسطحی را برای اهداف علمی، صنعتی و نظامی فراهم می‌سازند. در این مقاله، به معرفی اصول عملکرد هیدروفون‌ها، انواع طراحی و پارامترهای کلیدی آن‌ها پرداخته شده و سپس کاربردهای چندگانه آن‌ها از جمله در مطالعات زیست‌محیطی (ردیابی نهنگ‌ها و دلفین‌ها)، پایش لرزه‌ای و فعالیت‌های زمین‌ساختی، نظارت بر ترافیک دریایی، عملیات ضدزیردریایی، و تست‌های صوتی صنعتی زیر آب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به چالش‌های فنی نظیر نویز محیطی، اعوجاج سیگنال و کالیبراسیون اشاره شده و راهکارهای نوین مانند هیدروفون‌های مبتنی بر فیبر نوری و آرایه‌های هوشمند صوتی معرفی می‌گردد. به طور کلی هدف این مقاله، ارتقای درک عمومی درباره نقش کلیدی فناوری هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی در آکوستیک زیر آب و پایش محیط‌های دریایی است.

واژگان کلیدی: هیدروفون، آرایه هیدروفونی، آکوستیک زیر آب، سونار غیر فعال، نظارت دریایی

۱. مقدمه

اقیانوس‌ها و دریاها، گستره‌ای عظیم و ناشناخته از محیط‌های طبیعی را در بر می‌گیرند که کشف و درک آن‌ها بدون به‌کارگیری ابزارهای فناورانه پیشرفته ممکن نیست. در این میان، محیط آبی به‌طور ذاتی دارای ویژگی‌هایی است که ارتباط، آشکارسازی و پایش

* نویسنده مسئول

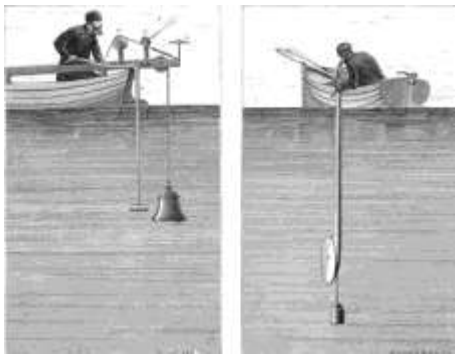
در آن را دشوار می‌سازد. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، تضعیف شدید امواج الکترومغناطیسی (نور و رادیو) در آب است که سبب می‌شود ابزارهای رایج ارتباطی در خشکی، در دریا ناکارآمد باشند. در مقابل، امواج صوتی به دلیل قابلیت نفوذ بالا و تضعیف اندک، به مؤثرترین بستر انتقال اطلاعات و آشکارسازی در زیر آب تبدیل شده‌اند. در این راستا، فناوری آکوستیکی زیر آب جایگاه ویژه‌ای در علوم دریایی، صنایع فراساحلی، دفاع دریایی و پایش محیطی یافته است. در قلب این فناوری، هیدروفون‌ها به‌عنوان ابزار اصلی دریافت صوت در زیر آب، نقشی بی‌بدیل ایفا می‌کنند. این ابزارها با تبدیل فشار امواج صوتی به سیگنال‌های الکتریکی، امکان ثبت و تحلیل پدیده‌های صوتی زیرسطحی را فراهم می‌سازند. هیدروفون‌ها نه‌تنها به صورت انفرادی، بلکه در قالب مجموعه‌هایی از هیدروفون‌ها با چیدمان‌های خاص توانایی‌های فراتری از دریافت صوت دارند. این آرایه‌ها قادرند منبع صوتی را شناسایی کرده، موقعیت‌یابی کرده و از میان نویزهای محیطی، سیگنال هدف را استخراج کنند. با این حال، کار در محیط زیرآب با چالش‌های جدی همراه است. نویزهای زمینه‌ای حاصل از جریان آب، باد، بارش یا فعالیت‌های انسانی، یکی از موانع اساسی در دریافت دقیق سیگنال‌های صوتی به‌شمار می‌رود. تغییرات دما، فشار و شوری آب، باعث اعوجاج در امواج صوتی و در نتیجه کاهش دقت آشکارسازی می‌شوند. همچنین، تجهیزات آکوستیکی باید در برابر فشار بالا، خوردگی، و ارتعاشات مکانیکی مقاوم باشند و در عین حال از پایداری طولانی مدت عملکرد برخوردار باشند. این عوامل موجب شده‌اند که توسعه فناوری‌های پیشرفته، مانند هیدروفون‌های فیبر نوری، حسگرهای میکروالکترومکانیکی[1] (MEMS) و الگوریتم‌های پردازش سیگنال هوشمند در اولویت پژوهش‌های نوین قرار گیرد.

این چالش‌ها در خلیج فارس یکی از حساس‌ترین و استراتژیک‌ترین مناطق دریایی جهان، شکل پیچیده‌تری به خود می‌گیرند. خلیج فارس به دلیل عمق کم، شوری بالا، دمای متغیر، و حجم زیاد تردد دریایی، یکی از پرچالش‌ترین محیط‌ها برای تحلیل آکوستیکی زیر آب است. این دریا در عین حال، به‌دلیل موقعیت ژئوپلیتیکی، مرکز تنش‌ها و رقابت‌های منطقه‌ای و بین‌المللی است و امنیت آن برای کشورهای ساحلی، به‌ویژه ایران، اهمیت راهبردی دارد. وجود منابع عظیم انرژی، زیرساخت‌های نفت و گاز فراساحلی، خطوط لوله، بنادر، و تأسیسات دریایی، در کنار تهدیدهای امنیتی نظیر حضور نظامی بیگانگان و فعالیت‌های پنهان زیرسطحی، لزوم بهره‌گیری از سامانه‌های پایش صوتی زیرآبی دقیق، پیوسته و بومی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در چنین شرایطی، هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی نه‌تنها برای پایش زیست‌محیطی و تحلیل آکوستیک‌های طبیعی بلکه برای مراقبت مستمر از مرزهای آبی، شناسایی فعالیت‌های مشکوک زیرسطحی، و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی، ابزارهایی حیاتی به شمار می‌روند. افزون بر این، استفاده از شبکه‌های هیدروفونی گسترده در خلیج فارس می‌تواند به ارتقای قابلیت‌های پایش هوشمند در برابر تهدیدات غیرمتقارن مانند زیردریایی‌های بدون سرنشین، عملیات مین‌ریزی، یا نفوذهای پنهان کمک کند. این فناوری همچنین می‌تواند در پیش‌بینی و هشدار سریع حوادث زیست‌محیطی مانند نشت نفت یا فوران‌های زیرآبی

مؤثر باشد. بدین‌ترتیب، سرمایه‌گذاری در پژوهش، طراحی و توسعه سامانه‌های آکوستیکی بومی، نه‌تنها از جنبه علمی و صنعتی، بلکه از حیث امنیت ملی و حاکمیت دریایی، ضرورتی راهبردی محسوب می‌شود. این مقاله در تلاش است تا ضمن ارائه تصویری جامع و کاربردی از فناوری‌های هیدروفونی، مخاطبان را با مفاهیم پایه، ساختار فنی، انواع هیدروفون‌ها، اصول عملکرد آرایه‌های آکوستیکی، چالش‌ها و کاربردهای آن‌ها در زمینه‌های علمی، صنعتی و دفاعی آشنا سازد. امید است این نوشتار بتواند به عنوان گامی مؤثر در توسعه‌ی دانش ملی در حوزه آکوستیک زیر آب و تقویت ظرفیت‌های بومی کشور در پایش و حفاظت از دریاهای پیرامونی، به‌ویژه خلیج فارس، مورد استفاده پژوهشگران، مهندسان و سیاست‌گذاران قرار گیرد.

۲. تاریخچه توسعه هیدروفون‌ها

ارسطو[۲] (۳۲۲-۳۸۴ قبل از میلاد) یکی از اولین کسانی بود که متوجه شد صدا در آب و هوا شنیده می‌شود. نزدیک به ۲۰۰۰ سال بعد، لئوناردو داوینچی مشاهده کرد که کشتی‌ها در فواصل بسیار دور زیر آب شنیده می‌شوند. در سال ۱۷۴۳، آبی نولت یک سری آزمایشات را برای تعیین اینکه آیا صداها می‌توانند در آب حرکت کنند یا خیر انجام داد. او در حالی که سرش زیر آب بود، گزارش داد که صدای شلیک تپانچه، زنگ، سوت و فریاد شنیده است. او همچنین خاطرنشان کرد که زنگ ساعتی که در آب به صدا در می‌آید به راحتی توسط یک ناظر زیر آب شنیده می‌شود، اما نه در هوا، و به وضوح حرکت صدا را در آب نشان می‌دهد [۱]. اولین اندازه‌گیری موفقیت آمیز سرعت صوت در آب تا اوایل دهه ۱۸۰۰ انجام نشد. طبق پیشنهاد داوینچی[۳]، با استفاده از یک لوله بلند برای گوش دادن در زیر آب، دانشمندان در سال ۱۸۲۶ ضبط کردند که صدای ناقوس غوطه‌ور با چه سرعتی در سراسر دریاچه ژنو



شکل ۱. تصویر راه اندازی آزمایشی برای تعیین سرعت صدا در زیر آب در دریاچه ژنو [۲]

حرکت می‌کند. در سال ۱۸۲۶ در دریاچه ژنو، سوئیس، ژان دانیل کولادون[۴] ، فیزیکدان، و چارلز فرانسوا استرن[۵] ، ریاضیدان، اولین تلاش ثبت شده برای تعیین سرعت صوت در آب را انجام دادند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است در آزمایش آن‌ها، زنگ زیر آب به طور همزمان با اشتعال باروت در اولین قایق زده شد. صدای زنگ و برق باروت در ۱۰ مایلی قایق دوم مشاهده شد. برای محاسبه سرعت صوت در آب از زمان بین برق باروت و رسیدن صدا به قایق دوم استفاده شد. کولادون و استرن با این روش توانستند سرعت صوت در آب را با دقت نسبتاً دقیقی تعیین کنند[۲]. استفاده از صوت در زیر آب به‌عنوان ابزار آشکارسازی و ارتباط، سابقه‌ای بیش از یک قرن دارد. در اواخر قرن نوزدهم، با افزایش نگرانی‌ها نسبت به ایمنی دریانوردی، نخستین تلاش‌ها برای طراحی ابزارهایی جهت دریافت صداهای زیرآبی شکل گرفت. در این دوره، سیستم‌هایی نظیر زنگ‌های زیرآبی و گیرنده‌های ساده صوتی که نمونه‌ای از آن در شکل ۲ نشان داده شده است، پایه‌گذار مفهوم اولیه هیدروفون شدند[۳].

شکل ۲. دستگاه شنود نمایشی [۳]

تحول بنیادین زمانی رخ داد که رجینالد فسندن[۶] در اوایل قرن بیستم، نخستین مبدل صوتی زیرآبی را توسعه داد که هم قابلیت ارسال و هم دریافت امواج صوتی را داشت. دستگاه او، که بعدها به‌عنوان نوسانگر فسندن که در شکل ۳ نشان داده شده است، شناخته شد. این دستگاه به‌صورت همزمان امکان مخابره سیگنال‌ها و دریافت بازتاب صوتی از موانع را فراهم کرد. این فناوری پایه‌گذار مفهوم سونار فعال بود، در حالی که اجزای دریافت‌کننده آن مبنای طراحی هیدروفون‌های امروزی را تشکیل دادند [۳, ۴].

شکل ۳. رجینالد فسندن و نوسانگر فسندن [۱]

با پیشرفت جنگ‌های دریایی در طول جنگ جهانی اول و دوم، نیاز به سامانه‌های دقیق‌تری برای شناسایی زیردریایی‌ها به شکل چشمگیری افزایش یافت. این نیاز، توسعه هیدروفون‌های حساس‌تر، آرایه‌های دریافت چندکاناله، و سامانه‌های تحلیل جهت‌دار صوت را تسریع کرد. در این دوره بود که اصول طراحی مبتنی بر مواد پیزوالکتریک شکل گرفت و تبدیل موج فشاری به سیگنال الکتریکی به‌صورت مهندسی شده تثبیت شد. پیشرفت‌های بعدی در مواد پیزوسرامیکی، طراحی‌های ضدفشار و نویز و الگوریتم‌های پردازش سیگنال، راه را برای ساخت هیدروفون‌های دقیق‌تر و آرایه‌های هوشمند صوتی هموار ساخت. امروزه، فناوری‌هایی نظیر هیدروفون‌های فیبر نوری، سامانه‌های کالیبراسیون دیجیتال، و ارتباطات بی‌سیم زیرآبی، مستقیماً ریشه در دستاوردهای فناورانه آن دوران دارند. به‌بیان دیگر، سیر تاریخی توسعه هیدروفون‌ها نه‌تنها بازتابی از رشد دانش آکوستیک زیرآب است، بلکه پایه‌گذار نسل جدیدی از سامانه‌های پایش و تحلیل صوتی در محیط‌های دریایی است [۵, ۶].

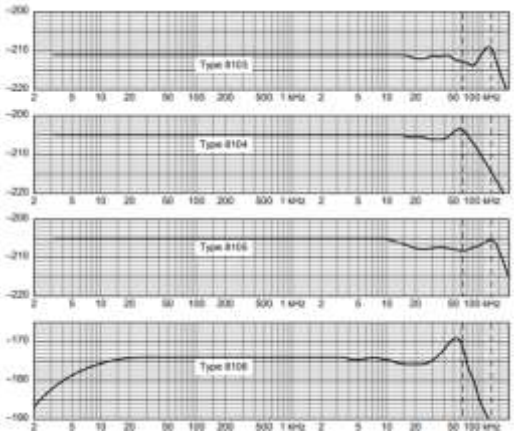
۳. هیدروفون

هیدروفون ابزاری برای دریافت و اندازه‌گیری صدا در محیط‌های زیرآبی است. واژه هیدروفون از دو واژه یونانی هیدرو به معنای آب و فون به‌معنای صدا (گوشی) تشکیل شده است. این دستگاه همانند میکروفون عمل می‌کند، با این تفاوت که به‌جای هوا، برای تشخیص ارتعاشات صوتی در آب طراحی شده است [۷, ۸]. هیدروفون‌ها صداهای موجود در زیر آب را تشخیص می‌دهند و انرژی صوتی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. هیدروفون‌ها به صداهای موجود در آب گوش می‌دهند، اما هیچ صدایی را منتقل

نمی‌کنند که آن‌ها را به دستگاه‌های شنود غیرفعال تبدیل می‌کند. اکثر هیدروفون‌ها از مواد پیزوالکتریک ساخته می‌شوند. این ماده در صورت قرار گرفتن در معرض تغییرات فشار، بارهای الکتریکی کوچکی تولید می‌کند. تغییرات فشار مرتبط با موج صوتی را می‌توان توسط یک عنصر پیزوالکتریک تشخیص داد. تحت فشار یک موج صوتی، عنصر پیزوالکتریک خم می‌شود و در برگشت سیگنال‌های الکتریکی می‌دهد. این سیگنال‌های الکتریکی را می‌توان ضبط کرد و بعداً با برنامه‌های کامپیوتری آنالیز کرد [۹-۱۱]. شرکت‌های سازنده هیدروفون‌ها را برای کاربردهای متفاوتی می‌سازند و اطلاعات و مشخصات هر کدام را در کاتالوگ‌های مربوط مشخص می‌کنند. به طور مثال در شکل ۴، چهار نوع از بهترین هیدروفون‌های ساخت شرکت بروئل و کیار[۷] (B&K)نشان داده شده‌اند.

شکل ۴. نمایی از هیدروفون‌های مدل ۸۱۰۳، ۸۱۰۴، ۸۱۰۵ و ۸۱۰۶ [۱۲]

ساختار این هیدروفون‌ها کاملا ضدآب و مقاوم در برابر خوردگی هستند. پاسخ‌های فرکانسی ۴ مدل هیدروفون بیان شده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. این پاسخ‌ها در یک مخزن آب و در شرایط میدان آزاد حاصل از ابزار روش‌های پالس با استفاده از یک سامانه کالیبراسیون مبتنی بر پالس اندازه‌گیری شده‌اند [۱۲, ۱۳].



شکل ۵. پاسخ فرکانسی دریافتی از ۴ نمونه هیدروفون مدل‌های ۸۱۰۳، ۸۱۰۴، ۸۱۰۵ و ۸۱۰۶ [۱۲]

۳-۱. تفاوت هیدروفون با میکروفون

هیدروفون‌ها به علت قرارگیری در محیط زیر آب و متفاوت بودن مسائل انتشار صوت، ویژگی‌های متمایز کننده‌ای نسبت به میکروفون‌ها دارند. مشخصات هیدروفون‌ها باید در کارکرد طولانی مدت کم‌ترین میزان تغییر را داشته باشد بنابراین باید در برابر آب و عواملی از جمله خوردگی مقاوم باشند. افزایش فشار استاتیک ناشی از کارکرد در عمق زیاد آب نباید موجب اعوجاج بر عملکرد هیدروفون‌ها شود. از آن‌جایی که در پردازش‌های سونار کشف جهت هدف بر مبنای اختلاف فاز موج دریافتی در کانال‌های مختلف صورت می‌گیرد، هیدروفون‌ها باید پاسخ بهره و فاز کانال مشابهی در سرتاسر باند فرکانسی گیرندگی داشته باشند. سطح نویز خودی هیدروفون‌ها باید پایین‌تر از سطح نویز شناورهای ساکت در باند فرکانسی مورد نظر باشد زیرا سطح طیف شناورهای ساکت بسیار ضعیف و معمولاً پایین‌تر از سطح نویز محیطی یعنی کمتر از ۲۰ دسی‌بل است. یکی از ویژگی‌های مهم که هیدروفون‌ها را از

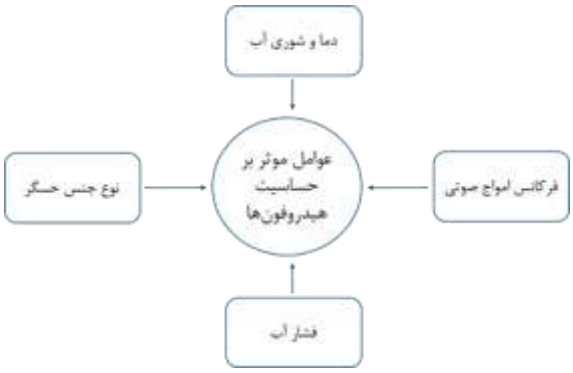
میکروفون‌ها متمایز می‌کند داشتن سازه و پوشش موادی برای حفاظت فیزیکی، تطبیق صوتی و کاهش نویزهای جریانی و ارتعاشی است [۱۴].

۳-۲. حساسیت هیدروفون‌ها

حساسیت هیدروفون به توانایی هیدروفون برای تشخیص سیگنال‌های صوتی با شدت پایین در زیر آب اشاره دارد. به بیانی ساده‌تر حساسیت هیدروفون معیاری است که نشان می‌دهد هیدروفون چقدر به طور مؤثر فشار صدای زیر آب را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. حساسیت هیدروفون‌ها معمولاً بر حسب ولت بر میکروپاسکال ($V/\mu Pa$) بیان می‌شود. چندین عامل بر حساسیت هیدروفون‌ها مؤثر هستند که مهم‌ترین آن‌ها در شکل ۶ مشخص شده است.

هیدروفون‌ها در محدوده‌های فرکانسی مختلف حساسیت‌های متفاوتی دارند. برخی از هیدروفون‌ها در تشخیص صداهای با فرکانس پایین بهتر هستند، در حالی که برخی دیگر به صداهای با فرکانس بالا حساس‌تر هستند. ویژگی‌های فیزیکی هیدروفون مانند اندازه و طراحی آن می‌تواند بر حساسیت آن تأثیر بگذارد. هیدروفون‌های بزرگ‌تر معمولاً طیف وسیع‌تری از فرکانس‌ها را در بر می‌گیرند و ممکن است حساسیت فرکانس پایین بهتری داشته باشند. همچنین عواملی مانند شوری آب، دما و فشار نیز می‌توانند به طور قابل توجهی بر حساسیت هیدروفون‌ها تأثیر بگذارند.

برای اندازه‌گیری حساسیت هیدروفون، یک روش رایج شامل استفاده از یک هیدروفون مرجع در یک محیط کنترل شده، مانند یک مخزن یا حوضچه هیدروآکوستیک است. در مرحله اول هیدروفون غوطه‌ور است و یک مبدل کالیبره شده سطح فشار صدای شناخته شده‌ای را منتشر می‌کند. یک هیدروفون مرجع با حساسیت شناخته شده در همان محیط قرار می‌گیرد. فشار صدا را از مبدل گرفته و ولتاژ خروجی ثبت می‌شود. هیدروفون ناشناخته در همان موقعیت قرار می‌گیرد و فشار صوتی یکسان اعمال می‌شود. ولتاژ خروجی این هیدروفون ثبت و با هیدروفون مرجع مقایسه می‌شود [۱۴].



شکل ۶. چهار عامل اصلی مؤثر بر حساسیت هیدروفون‌ها

۳-۳. ساختار و اجزای اصلی هیدروفون‌ها

هیدروفون‌ها به‌طور کلی از اجزای متعددی تشکیل شده‌اند که طراحی و عملکرد آن‌ها تابع پارامترهایی مانند بازه فرکانسی هدف، شرایط محیطی (فشار، دما، خورندگی)، و کاربرد خاص (نظامی، زیست‌محیطی یا صنعتی) است. طبق تصویر شکل ۷ ساختار کلی هیدروفون‌ها را می‌توان به چهار بخش اصلی تقسیم کرد: عنصر حسگر[۸]، پوشش محافظ[۹] و مدار الکترونیکی و در بعضی موارد لایه تطبیق آکوستیکی که در شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

شکل ۷. تصویر یک هیدروفون استاندارد [۱۱]

۱. عنصر مبدل (پیزوالکتریک یا دیگر مواد حسگر)

در قلب هر هیدروفون، یک عنصر مبدل وظیفه‌ی تبدیل انرژی صوتی به سیگنال الکتریکی را بر عهده دارد. رایج‌ترین فناوری مورد استفاده در این بخش، پدیده‌ی پیزوالکتریک است که طی آن مواد خاصی در پاسخ به اعمال فشار، بار الکتریکی تولید می‌کنند. در این میان، سرامیک‌های مبتنی بر زیرکونات تیتانات سرب (PZT)[10] به دلیل حساسیت بالا، پایداری حرارتی و مقاومت مکانیکی در برابر فشارهای زیاد محیط‌های زیرآبی، بیشترین کاربرد را دارند. ویژگی‌های کلیدی این مواد نظیر ضریب پیزوالکتریک، ثابت دی‌الکتریک و مقاومت مکانیکی مستقیماً بر بازده و کیفیت سیگنال خروجی تأثیرگذار است. علاوه برPZT ، فناوری‌های نوینی نظیر هیدروفون‌های مبتنی بر فیبر نوری نیز توسعه یافته‌اند. در این نوع هیدروفون‌ها، تغییرات فشار صوتی موجب تغییر در فاز نور درون فیبر می‌شود که از طریق تداخل‌سنجی نوری قابل آشکارسازی است. این روش در کاربردهایی با نیاز به حساسیت بسیار بالا و مقاومت در برابر نویز الکترومغناطیسی، همچون شنود نظامی و لرزه‌شناسی دقیق، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲. لایه تطبیق آکوستیکی

بین محیط آبی و ماده‌ی پیزوالکتریک اختلاف قابل توجهی در امپدانس آکوستیکی وجود دارد که می‌تواند موجب بازتاب بخش قابل توجهی از انرژی صوتی در مرز تماس شود. برای بهینه‌سازی انتقال انرژی صوتی به مبدل، استفاده از لایه‌های تطبیق آکوستیکی ضروری است. این لایه‌ها معمولاً از پلیمرهای خاص یا مواد کامپوزیتی با امپدانس میانه بین آب و ماده‌ی حسگر ساخته می‌شوند. طراحی بهینه‌ی این لایه‌ها، با ضخامت معادل یک چهارم طول‌موج در فرکانس هدف، می‌تواند راندمان انتقال انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. در هیدروفون‌های پهن‌باند یا چندمنظوره، استفاده از ساختارهای چندلایه با ترکیب پلیمرها و مواد نانوساختار رو به افزایش است. این طراحی‌های پیشرفته موجب می‌شوند که بازده تطبیق صوتی در گستره وسیع‌تری از فرکانس‌ها حفظ شود. علاوه بر بهبود عملکرد صوتی، این لایه‌ها نقش مهمی در حفاظت فیزیکی مبدل در برابر شوک‌های مکانیکی و خوردگی نیز ایفا می‌کنند.

۳. محفظه و آب‌بندی

محفظه‌ی خارجی هیدروفون علاوه بر نقش حفاظتی در برابر فشارهای هیدرواستاتیک و محیط‌های خورنده، باید از ورود آب به بخش‌های حساس داخلی جلوگیری کند. در اعماق زیاد، فشار می‌تواند به چند صد اتمسفر برسد که نیازمند استفاده از مواد بسیار مقاوم و طراحی دقیق است. متداول‌ترین مواد مورد استفاده در این بخش شامل تیتانیوم (به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوردگی عالی)، فولاد ضدزنگ و پلی‌یورتان‌های مهندسی شده هستند. فرایند آب‌بندی دقیق نیز در طراحی هیدروفون اهمیت بالایی دارد؛ چرا که هرگونه نشت حتی در حد میکروسکوپی می‌تواند به تخریب کامل مبدل منجر شود. در این راستا، از درزگیرهای الاستومری پیشرفته، پوشش‌های نانوساختار ضدآب و اتصالات کابل با طراحی‌های ویژه استفاده می‌شود. این بخش از ساختار همچنین باید به گونه‌ای طراحی شود که حداقل نویز جریان و ارتعاشات مکانیکی به مبدل منتقل گردد.

۴. پیش‌تقویت‌کننده و مدار آنالوگ (انتقال داده)

سیگنال خام تولید شده توسط مبدل پیزوالکتریک معمولاً در سطح بسیار پایین (در حد میکروولت تا

میلی‌ولت) است و بدون تقویت اولیه در معرض نویز و تضعیف شدید قرار می‌گیرد. از این رو، پیش‌تقویت‌کننده‌های با نویز کم[11] به‌طور مستقیم در نزدیکی مبدل تعبیه می‌شوند. این تقویت‌کننده‌ها علاوه بر افزایش بهره سیگنال، باید پاسخ فرکانسی یکنواخت و رفتار فازی پایدار در باند کاری هیدروفون داشته باشند. در طراحی‌های پیشرفته، این بخش همچنین شامل فیلترهای پایین‌گذر برای حذف نویزهای فرکانس بالا و گاهی فیلترهای تطبیقی برای بهبود نسبت سیگنال به نویز است. در بسیاری از هیدروفون‌های مدرن، تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال درون خود دستگاه انجام می‌شود و داده‌ها از طریق کابل‌های کواکسیال[12] یا مودم‌های صوتی زیرآبی[13] به ایستگاه پردازش منتقل می‌شوند. این امکان، به‌ویژه در آرایه‌های هوشمند و شبکه‌های حسگر زیرآبی، نقش کلیدی در افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی و کاهش نویز محیطی ایفا می‌کند [۱۱, ۱۵].

۳-۴. انواع هیدروفون‌ها

هیدروفون‌ها با توجه به ساختار فیزیکی، نوع مبدل انرژی و کاربردهای هدف، در گونه‌های متنوعی طراحی و تولید می‌شوند. هر نوع هیدروفون بسته به اصول فیزیکی عملکرد خود، پاسخ آکوستیکی خاصی در محدوده فرکانسی معین و در زوایای مختلف تابش صوتی از خود نشان می‌دهد. انتخاب نوع مناسب هیدروفون برای هر کاربرد، به ویژگی‌های کلیدی چون پاسخ فرکانسی، جهت‌پذیری[14]، حساسیت، نویز ذاتی[15] و مقاومت محیطی بستگی دارد. در ادامه، مهم‌ترین انواع هیدروفون‌ها و ویژگی‌های آکوستیکی آن‌ها معرفی می‌شود.

۱. هیدروفون‌های پیزوالکتریک

هیدروفون‌های پیزوالکتریک متداول‌ترین نوع هیدروفون‌ها در کاربردهای عمومی زیرآبی هستند. در این هیدروفون‌ها، یک ماده پیزوالکتریک مانند سرامیک‌های PZT یا PVDF[16] تحت اثر فشار صوتی در محیط آبی دچار تغییر شکل مکانیکی شده و این تغییر، یک ولتاژ الکتریکی متناظر تولید می‌کند. در تصویر شکل ۸ پیزوالکتریک در حالت‌های مختلف و نحوه قرارگیری آن‌ها در هیدروفون‌ها مشخص شده است. ویژگی آکوستیکی کلیدی این هیدروفون‌ها، پهنای باند وسیع و حساسیت قابل‌تنظیم است که آن‌ها را برای مصارف مختلف از جمله سونار غیرفعال، پایش زیستی و لرزه‌شناسی دریایی مناسب می‌سازد. پاسخ فرکانسی هیدروفون‌های پیزوالکتریک می‌تواند از چند ده هرتز تا صدها کیلوهرتز متغیر باشد. طراحی فیزیکی (شکل و حجم ماده پیزوالکتریک) و وجود لایه‌های تطبیق آکوستیکی تعیین می‌کنند که پاسخ فرکانسی و الگوی جهت‌پذیری چگونه شکل گیرد. هیدروفون‌های پیزوالکتریک معمولاً در حالت پایه ایزوتروپیک هستند، ولی با طراحی خاص می‌توان الگوهای جهت‌دار نیز ایجاد کرد [۱۶].

شکل ۸. تصاویری از پیزوالکتریک و نحوه قرارگیری آن‌ها در هیدروفون‌ها [۱۷]

۲. هیدروفون‌های برداری

در هیدروفون‌های برداری[۱۷]، برخلاف هیدروفون‌های فشارمحور معمول، نه تنها دامنه فشار صوتی بلکه جهت برداری سرعت ذره‌ای نیز اندازه‌گیری می‌شود که نمونه واقعی ساخته شده این هیدروفون در شکل ۹ نشان داده شده است. این امر به کمک سنسورهای چندمحوره صورت می‌گیرد که معمولاً شامل ترکیب عناصر فشار و شتاب‌سنج‌های MEMS یا حسگرهای لیزری است. ویژگی آکوستیکی مهم این هیدروفون‌ها، توانایی در ایجاد الگوی پرتوپوشی تطبیقی[۱۸] و استخراج جهت‌گیری دقیق منبع صوتی حتی در محیط‌های با نویز پس‌زمینه بالا است. آرایه‌های برداری، به‌ویژه در سونارهای مدرن غیرفعال و برای تشخیص و ردیابی هدف در میدان‌های پیچیده زیرآبی، کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. پاسخ فرکانسی هیدروفون‌های برداری معمولاً در باند متوسط تا بالا (چند صد هرتز تا ده‌ها کیلوهرتز) بهینه‌سازی می‌شود[۱۸].

شکل ۹. حسگر آرایه برداری مورد استفاده در پژوهش [۱۹]

۳. هیدروفون‌های فیبر نوری

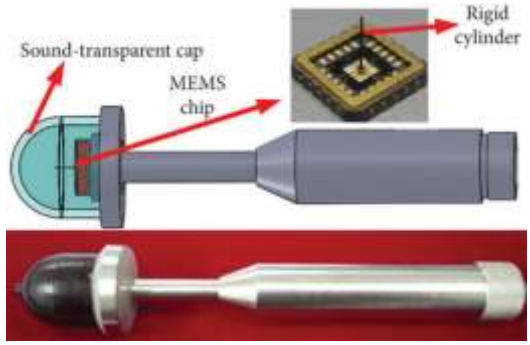
هیدروفون‌های فیبر نوری[۱۹] از اصول اپتیکال برای آشکارسازی تغییرات فشار صوتی بهره می‌گیرند. در این سیستم‌ها، موج‌های صوتی موجب تغییرات در پارامترهای اپتیکی (مانند تغییر فاز یا شدت نور عبوری از فیبر) می‌شوند که با روش‌های تداخل‌سنجی بسیار دقیق آشکار می‌گردد. برتری آکوستیکی این نوع هیدروفون‌ها در حساسیت بسیار بالا و سطح نویز ذاتی بسیار پایین نهفته است. به علاوه، این هیدروفون‌ها ذاتاً نسبت به تداخل‌های الکترومغناطیسی مصون‌اند و می‌توانند برای کاربردهای در عمق زیاد یا در محیط‌های پر نویز مورد استفاده قرار گیرند. پاسخ فرکانسی هیدروفون‌های فیبر نوری می‌تواند از چند هرتز تا چند مگاهرتز گسترش یابد، که آن‌ها را برای کاربردهای خاص چون لرزه‌شناسی دریایی عمیق و پایش دقیق آکوستیک‌های زیستی ایده‌آل می‌سازد. نمونه‌هایی از این مدل هیدروفون و اجزای آن‌ها در شکل ۱۰ مشخص شده است [۲۰, ۲۱].

شکل ۱۰. نمونه‌هایی از هیدروفون‌های اپتیکال و اجزای آن‌ها [۲۲]

۴. هیدروفون‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS)

هیدروفون‌های مبتنی بر فناوری میکروالکترومکانیکی نوعی حسگرهای بسیار کوچک و کم‌مصرف هستند که از عناصر میکرومکانیکی متحرک (نظیر دیافراگم‌های میکروسکوپی) و حسگرهای خازنی یا پیزوالکتریک بهره می‌برند که در شکل ۱۱ نمونه‌ای واقعی از این هیدروفون و نحوه قرارگیری اجزای آن قابل مشاهده است. ویژگی آکوستیکی ممتاز این هیدروفون‌ها، تراکم بالا در آرایه‌های هیدروفونی و قابلیت مینیاتوریزه‌سازی

است که امکان ساخت آرایه‌های فشرده و تطبیق‌پذیر را فراهم می‌سازد. پاسخ فرکانسی MEMS به طور معمول در بازه‌ی صدها هرتز تا ده‌ها کیلوهرتز بهینه‌سازی می‌شود و با استفاده از الگوریتم‌های پردازش پیشرفته، عملکرد آن‌ها به سطوح رقابتی با هیدروفون‌های پیزوالکتریک سنتی نزدیک شده است. این هیدروفون‌ها برای کاربردهایی چون پایش مداوم محیط دریایی، پهپادهای زیرآبی و سامانه‌های شبکه‌ای هوشمند به سرعت در حال گسترش هستند [۲۳].



شکل ۱۱. نمونه‌ای از هیدروفون‌های میکروماشینی و اجزای مختلف آن [۲۴]

تنوع گسترده‌ی انواع هیدروفون‌ها، امکان انتخاب بهینه‌ی ابزار برای هر کاربرد آکوستیکی زیرآبی را فراهم می‌آورد. در انتخاب نوع مناسب، پارامترهای آکوستیکی کلیدی نظیر پاسخ فرکانسی، حساسیت، جهت‌پذیری، سطح نویز ذاتی و قابلیت مقاومت در محیط‌های خاص باید به دقت مورد توجه قرار گیرند. با پیشرفت‌های مداوم در حوزه‌ی طراحی حسگرها، پردازش سیگنال و فناوری‌های نوین، افق‌های جدیدی در توسعه‌ی نسل‌های آینده‌ی هیدروفون‌ها در حال گشایش است.

۳-۵. کالیبراسیون هیدروفون‌ها

کالیبراسیون هیدروفون‌ها فرایندی حیاتی در تضمین دقت، صحت و قابلیت اطمینان داده‌های آکوستیکی زیرآب به‌شمار می‌آید. این فرایند، به‌ویژه در کاربردهایی نظیر پایش زیستی، سامانه‌های سونار نظامی، لرزه‌شناسی دریایی و آزمون‌های صنعتی زیرآبی، نقشی کلیدی ایفا می‌کند. هدف اصلی از کالیبراسیون، تعیین حساسیت دقیق هیدروفون در برابر فشار صوتی استاندارد است؛ به‌گونه‌ای که خروجی الکتریکی آن با مقدار واقعی سیگنال صوتی تطابق کامل داشته باشد و امکان تحلیل صحیح و مقایسه‌پذیر داده‌های صوتی فراهم گردد [۱۲]. فرایند کالیبراسیون به‌طور کلی در دو رویکرد عمده انجام می‌شود: کالیبراسیون مطلق و کالیبراسیون نسبی. در روش مطلق، هیدروفون در معرض یک منبع صوتی استاندارد قرار می‌گیرد که ویژگی‌های دقیق آن (دامنه، فرکانس، پایداری فاز) از پیش شناخته شده است. پاسخ هیدروفون در این شرایط در محیط‌های کنترل‌شده‌ای نظیر مخازن بی‌پژواک یا تونل‌های آکوستیکی اندازه‌گیری می‌شود. این روش که در آزمایشگاه‌های مرجع بین‌المللی همچون ان‌پی‌ال[۲۰]، نیست[۲۱] (NIST)، و پی‌تی‌بی[۲۲] به کار گرفته می‌شود، بالاترین سطح دقت و تکرارپذیری را فراهم می‌آورد، هرچند هزینه‌بر و زمان‌بر است. در مقابل، در روش مقایسه‌ای، هیدروفون هدف در کنار یک هیدروفون مرجع کالیبره‌شده قرار گرفته و در معرض یک سیگنال صوتی یکسان قرار می‌گیرد. حساسیت هیدروفون هدف از طریق مقایسه‌ی ولتاژ خروجی دو دستگاه محاسبه می‌شود. این رویکرد با وجود دقت پایین‌تر نسبت به روش مطلق، به دلیل سادگی و سرعت اجرا، در کاربردهای میدانی یا برای بررسی‌های دوره‌ای به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵, ۲۶].

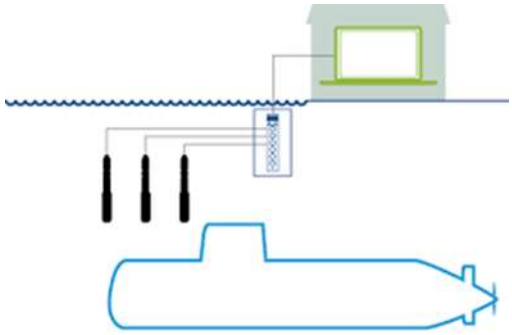
فرایند کالیبراسیون هیدروفون‌ها با چالش‌های متعددی همراه است که از جمله می‌توان به نویز زمینه‌ای، انعکاس‌های ناخواسته، تغییرات دما و فشار و نوسانات در خواص فیزیکی محیط اشاره کرد. پارامترهایی همچون دمای محیط، فشار استاتیک (ویژه‌ی کالیبراسیون‌های عمیق)، شوری و چگالی آب می‌توانند به‌طور مستقیم بر رفتار آکوستیکی و حساسیت هیدروفون تأثیرگذار باشند. لذا، یا باید شرایط محیطی در طول فرایند به‌طور دقیق کنترل شوند، یا از روش‌های پیشرفته‌ی جبران محیطی بهره گرفته شود. برای دستیابی به کالیبراسیون دقیق و تکرارپذیر، به‌کارگیری تجهیزات تخصصی الزامی است. این تجهیزات شامل منابع صوتی پایدار با کنترل دامنه و فاز، کالیبراتورهای فشار هیدروآکوستیکی، مبدل‌های مرجع با عدم قطعیت پایین و سامانه‌های ثبت دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری و نسبت سیگنال به نویز[۲۳] (SNR) بالا می‌شوند. همچنین، نرم‌افزارهای تحلیل طیفی و الگوریتم‌های تطبیقی نوین برای حذف اعوجاج، کاهش نویز و مدل‌سازی دقیق پاسخ فرکانسی توسعه یافته‌اند و در بسیاری از آزمایشگاه‌های پیشرفته به کار گرفته می‌شوند. در برخی کاربردهای خاص همچون شبکه‌های هیدروفونی گسترده یا سونوبوی‌های[۲۴] مستقر در دریا، کالیبراسیون در محل[۲۵] نیز به کار می‌رود. در این روش، با استفاده از منابع صوتی شناور یا خودکار و در شرایط عملیاتی واقعی، عملکرد هیدروفون ارزیابی و اصلاح می‌شود؛ این امر به‌ویژه برای پایش مداوم و بلندمدت در محیط‌های متغیر دریایی اهمیت ویژه دارد. چارچوب‌های استانداردسازی بین‌المللی نیز برای همگونی و ارتقای کیفیت فرایندهای کالیبراسیون تدوین شده‌اند. در این میان، استاندارد معروف IEC 60565-1:2020 مرجع اصلی در حوزه‌ی کالیبراسیون هیدروفون‌ها محسوب می‌شود و دستورالعمل‌های دقیقی برای اندازه‌گیری حساسیت، پاسخ فرکانسی، فاز و سطح نویز ارائه می‌دهد [۲۷-۲۹].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های آینده در این حوزه، پایداری طولانی‌مدت حساسیت هیدروفون‌ها در محیط‌های سخت زیرآبی است. عواملی همچون فرسودگی مواد پیزوسرامیکی، آسیب‌های ناشی از فشارهای متناوب یا شوک‌های مکانیکی و تغییرات در خواص الکترونیکی، می‌توانند در طول زمان به انحراف قابل توجه در پاسخ هیدروفون منجر شوند. از این رو، کالیبراسیون‌های دوره‌ای با فواصل زمانی مناسب، بخشی جدایی‌ناپذیر از چرخه‌ی بهره‌برداری حرفه‌ای از هیدروفون‌ها به شمار می‌رود. افق‌های آینده در این حوزه به سمت کالیبراسیون خودکار و درون‌سامانه‌ای[۲۶] در حال حرکت است. به‌کارگیری حسگرهای دمایی داخلی، سامانه‌های بازخورد هوشمند و منابع صوتی تعبیه شده در ساختار هیدروفون، امکان تصحیح لحظه‌ای و بهبود پایداری حساسیت را فراهم می‌آورند. این رویکردها به‌ویژه در هیدروفون‌های نسل جدید مبتنی بر MEMS و آرایه‌های تطبیقی، قابلیت‌های نوینی برای عملیات بلندمدت و بدون بازگشت به آزمایشگاه فراهم خواهند ساخت. در مجموع، کالیبراسیون دقیق و اصولی، پیش‌نیاز دستیابی به داده‌های آکوستیکی قابل اعتماد و با کیفیت در محیط‌های زیرآبی است و به همین دلیل در تمامی مراحل طراحی، تولید، بهره‌برداری و نگهداری از هیدروفون‌ها باید به آن توجه ویژه‌ای معطوف گردد [۱۴].

۴. آرایه‌های هیدروفونی

آرایه هیدروفون از تعدادی هیدروفون که در مکان‌های مشخص شده قرار گرفته‌اند تشکیل شده است که نمایه آن در شکل ۱۲ مشخص شده است. این هیدروفون‌ها ممکن است در یک خط در کف دریا قرار گیرند، به عنوان مثال در یک خط عمودی در ستون آب لنگر انداخته شوند یا به عنوان مثال در یک خط افقی در پشت یک قایق یا کشتی بکسل شوند. صدایی که از یک منبع دور به آرایه می‌رسد، مانند یک زیردریایی، بسته به جهتی که صدا از آن می‌آید، در زمان‌های کمی متفاوت به هر هیدروفون می‌رسد. این اختلاف زمانی به عنوان تفاوت زمان رسیدن شناخته می‌شود و می‌تواند به یک جهت تبدیل شود. با استفاده از این اطلاعات از تمام هیدروفون‌های موجود در آرایه، جهتی که صدا از آن می‌آید را می‌توان مشخص کرد. حتی یک آرایه ساده که فقط از دو هیدروفون تشکیل شده باشد، می‌تواند جهت تقریبی صدایی که از آن می‌آید را ارائه دهد. مردم این کار را همیشه در هوا با یک آرایه گیرنده که از دو گوش تشکیل شده است انجام می‌دهند. صدایی که از یک منبع می‌رسد، مانند فردی که صحبت می‌کند، بسته به جهتی که صدا از آن می‌آید، در زمان‌های کمی متفاوت به هر گوش می‌رسد و این امکان را برای شنونده فراهم می‌کند که جهت را به گوینده بگوید [۳۰].

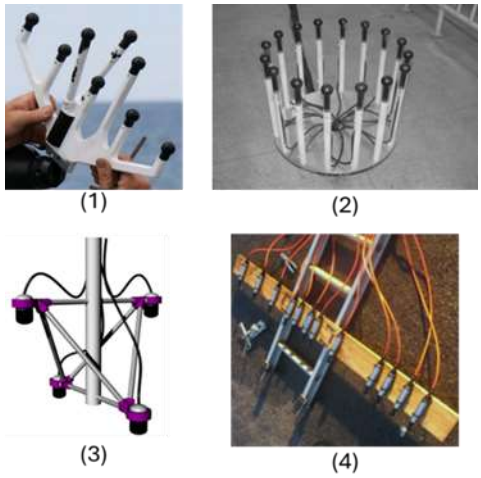
هنگامی که شنونده می‌خواهد یک صدای خاص را تشخیص دهد، آرایه‌های هیدروفون بسیار بهتر از تک هیدروفون هستند. این به این دلیل است که آرایه قادر است نویزهایی را که از همه جهات وارد می‌شود فیلتر کرده و بر صداهایی که از یک جهت خاص می‌رسند،



شکل ۱۲. نمایه ایجاد کردن یک آرایه هیدروفونی [۲]

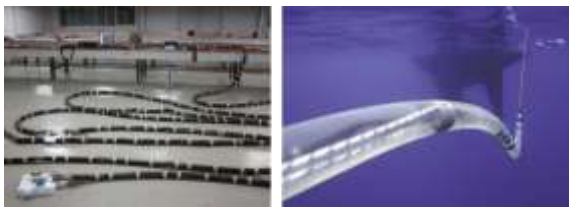
تمرکز کند. افزایش نسبت سیگنال به نویز باعث می‌شود صداهایی که معمولاً توسط یک هیدروفون تشخیص داده نمی‌شوند شنیده شوند. اگر از یک آرایه هیدروفون برای دریافت یک منبع صوتی خاص استفاده می‌شود، همچنین به منبع اجازه می‌دهد تا ساکت‌تر باشد و همچنان شناسایی شود. به عنوان مثال، پروژکتور در یک سیستم ارتباطی زیر آب، اگر گیرنده آرایه‌ای باشد که به سمت منبع قرار دارد، می‌تواند ساکت‌تر باشد. آرایه‌های هیدروفون برای مکان‌یابی زیردریایی‌ها، ردیابی پستانداران دریایی و حتی برای مطالعه تغییرات آب و هوای جهانی با تشخیص تفاوت‌های دما استفاده می‌شود. برای درک بهتر از آرایه‌های هیدروفونی چندین نمونه واقعی و ساخته شده که در پژوهش‌های دریایی و آزمایشگاهی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند در شکل ۱۳ مشخص شده‌اند که به ترتیب آرایه هیدروفونی شاخه‌ای، دایره‌ای، سه‌بعدی و خطی را نشان می‌دهد.

نمونه‌های دیگری از آرایه‌های هیدروفونی نیز وجود دارد. نوع اول آرایه‌های یدک‌کش شده که به نام سیستم حسگر آرایه یدک‌کش نظارت شناخته می‌شوند. آرایه یدک شده که نام دیگر آن آرایه بکسل شده است شامل مجموعه‌ای از هیدروفون‌ها است که



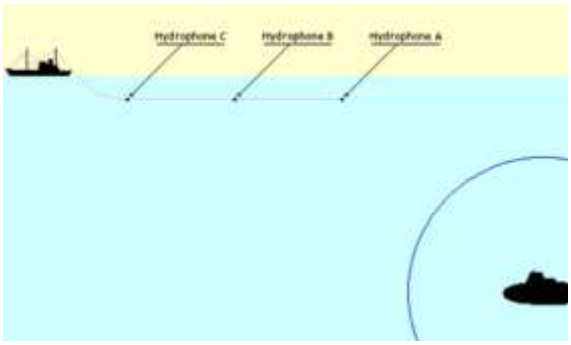
شکل ۱۳. تصاویر واقعی از آرایه هیدروفونی شاخه‌ای، دایره‌ای، سه‌بعدی و خطی [۳۱-۳۴]

در یک شکل هندسی یکنواخت که اکثر اوقات به شکل خطی است، همانطور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، قرار گرفته‌اند و توسط وسایل نقلیه دریایی مانند کشتی‌ها یا زیر دریایی‌ها یدک یا بکسل می‌شوند [۲].



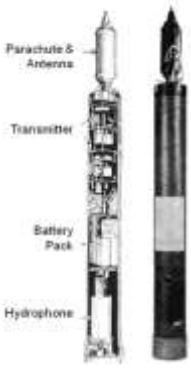
شکل ۱۴. تصاویری از آرایه هیدروفونی یدک شونده [۲]

این آرایه‌ها در پشت زیردریایی‌ها یا کشتی‌های سطحی از طریق یک کابل بلند تا طول ۵۰۰۰ متر کشیده می‌شوند که نمایه آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. به طور کلی، آرایه‌های بکسل شده از هیدروفون‌های پیزوالکتریک سرامیکی ساخته می‌شوند، که در یک غلاف لوله‌ای توزیع و نصب می‌شوند. ساختار، اندازه و فاصله این هیدروفون‌ها باند فرکانس عملکرد آرایه را در یک محیط آبی مشخص می‌کند.



شکل ۱۵. نمایه آرایه هیدروفونی یدک شده در پشت کشتی [۲]

نوع دوم سیستم نظارت صدا نام دارد که مجموعه‌ای از آرایه‌های هیدروفون ثابت در بستر دریا است. نام دیگر این هیدروفون‌ها سونوبوی است. سونوبوی‌ها قوطی‌های جداگانه‌ای هستند که در سطح آب شناور هستند و یک تلفن هیدرولیک، کابل مرطوب کننده، باتری، دستگاه‌های الکترونیکی ضبط و یک آنتن فرستنده را در خود جای می‌دهند. نکات بیان شده را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده کرد که اجزای مختلف سونوبوی مدل AN/CRT-1 را به تفکیک مشخص کرده است [۳۵].



شکل ۱۶. اجزای مختلف سونوبوی AN/CRT-1 [۳۶]

در فعالیت‌های نظامی از شناورهای صوتی برای شنود زیر آب برای شناسایی زیردریایی‌ها استفاده می‌کنند و سکوهایی که سونوبوی‌ها را مستقر می‌کنند معمولاً هلیکوپتر یا هواپیما هستند، همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است سونوبوی‌ها در هواپیما بارگیری

می‌شوند و به دریا انداخته می‌شوند و همچنین می‌توانند از کشتی‌های سطحی نیز بارگیری و مستقر شوند. از مزایای سونوبوی‌ها نسبت به آرایه‌های بکسل شده می‌توان به هزینه نسبی پایین، سهولت در استقرار و عدم ایجاد مزاحمت در اثر نویز سکوی استقرار اشاره کرد. سونوبوی سیگنال صوتی دریافتی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند و سپس آن را از طریق یک عامل انتقال فرکانس بسیار بالا به واحد پردازش سیگنال واقع در پلتفرم استقرار، می‌فرستد [۳۶].

شکل ۱۷. تصویر بارگیری سونوبوی در هلی‌کوپتر و مستقر کردن سونوبوی‌ها در دریا و اقیانوس [۳۵]

در حال حاضر سونوبوی‌ها را می‌توان به طور عمده به سونوبوی‌های آنالیز و ضبط فرکانس پایین[۲۷] و سونوبوی‌های آنالیز و ضبط فرکانس جهت‌دار[۲۸] طبقه‌بندی کرد. سونوبوی آنالیز و ضبط فرکانس پایین تنها از یک هیدروفون تشکیل شده است که فشار صوتی را اندازه‌گیری می‌کند. از سوی دیگر، سونوبوی آنالیز و ضبط فرکانس جهت‌دار دارای یک هیدروفون همه جهته است که تنها دامنه امواج فشار صوتی را اندازه می‌گیرد و یک جفت حسگر در یک مجموعه تکان‌دهنده صلیبی شکل مجزا برای اندازه‌گیری اجزای متعامد سرعت ذرات آکوستیک است. مزیت اصلی سونوبوی آنالیز و ضبط فرکانس جهت‌دار نسبت به سونوبوی آنالیز و ضبط فرکانس پایین این است که از اطلاعات صوتی در دسترس بیشتر استفاده می‌کند. از این‌رو، هیدروفون همه جهته در دقت محلی‌سازی بهتر عمل می‌کند [۳۷, ۳۸].

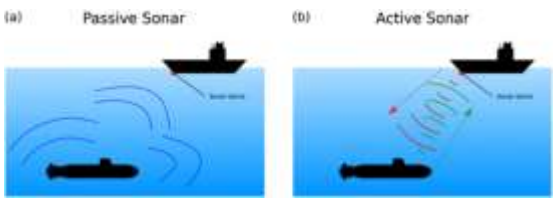
۵. کاربردهای هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی

هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی دارای کاربردهای بسیار گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف هستند که به صورت خلاصه در چندین بخش به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

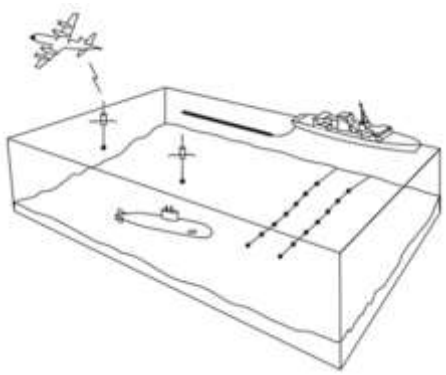
۵-۱. فناوری سونار و ارتباطات زیر آب

هیدروفون‌ها به‌عنوان ابزارهای حساس برای دریافت امواج صوتی در محیط زیر آب، نقش حیاتی در توسعه فناوری‌های دریایی و پیشرفت مطالعات اقیانوسی دارند و همچنین در آکوستیک زیرآبی، در طیف گسترده‌ای از کاربردهای علمی، صنعتی و امنیتی به‌کار گرفته می‌شوند. یکی از نخستین و مهم‌ترین زمینه‌های استفاده از هیدروفون‌ها در فناوری سونار است. در سامانه‌های سونار فعال، پالس‌های صوتی از سوی مبدل ارسال می‌شوند و پس از بازتاب از اجسام موجود در آب، توسط هیدروفون دریافت می‌گردند. با محاسبه مدت زمان طی‌شده بین ارسال و دریافت پالس و آگاهی از سرعت صوت در آب، می‌توان فاصله تا جسم مورد نظر را محاسبه کرد. در مقابل، سونار غیرفعال بدون ارسال پالس، تنها به دریافت امواج صوتی موجود در محیط اکتفا می‌کند؛ این امواج که ممکن است از منابعی نظیر زیردریایی‌ها یا جانوران دریایی تولید شده باشند، توسط هیدروفون دریافت شده و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند که پس از پردازش

قابل مشاهده و تحلیل خواهند بود. در شکل ۱۸ به طور کامل تفاوت بین سونار فعال و غیرفعال قابل مشاهده است. به طور کلی در کاربردهای دفاعی و نظارتی، آرایه‌های هیدروفونی برای شناسایی و ردیابی زیردریایی‌ها، کشتی‌های بدون سرنشین و فعالیت‌های مشکوک در آب‌های سرزمینی استفاده می‌شوند. از سونار غیرفعال برای پایش ترافیک کشتی‌ها در بنادر و تامین امنیت آن‌ها استفاده می‌شود. سونار غیرفعال دارای حالت‌های مختلفی است که در شکل ۱۹ نمایه انواع سونار غیرفعال که بسیار رایج هستند را نشان داده است [۳۹, ۴۰].



شکل ۱۸. نمایه چگونگی عملکرد سونار فعال و غیر فعال [۴۱]



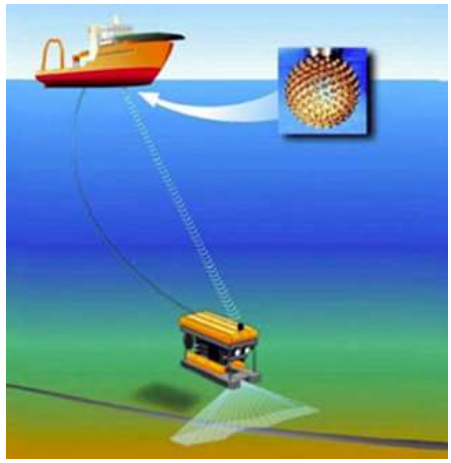
شکل ۱۹. انواع مختلف سونار غیرفعال مورد استفاده رایج [۴۲]

در زمینه ارتباطات زیر آبی نیز هیدروفون‌ها نقشی تعیین‌کننده دارند. با توجه به اینکه امواج رادیویی در آب به‌شدت تضعیف می‌شوند و توانایی انتشار در فواصل دور را ندارند، سیستم‌های صوتی جایگزین مؤثری برای برقراری ارتباط در محیط دریایی شده‌اند. همانطور که در شکل ۲۰ قابل مشاهده است در این سیستم‌ها، مبدل‌هایی که به ماسک صورت غواص متصل‌اند، صدا را به امواج آلتراسونیک تبدیل می‌کنند. این امواج توسط گیرنده‌های مجهز به هیدروفون دریافت شده و مجدداً به سیگنال‌های صوتی قابل شنیدن تبدیل می‌شوند. چنین فناوری‌هایی امکان ارتباط میان غواصان، و نیز بین غواص و کشتی‌های سطحی را فراهم می‌سازند. زیردریایی‌ها نیز از سامانه‌های ارتباطی صوتی ویژه‌ای بهره می‌برند که مشابه رادیو عمل می‌کنند اما به جای امواج رادیویی، با امواج صوتی کار می‌کنند.

شکل ۲۰. نمونه ماسک غواصی همراه با بسته ارتباط تلفنی زیر آب [۲]

۵-۲. ناوبری زیر آب

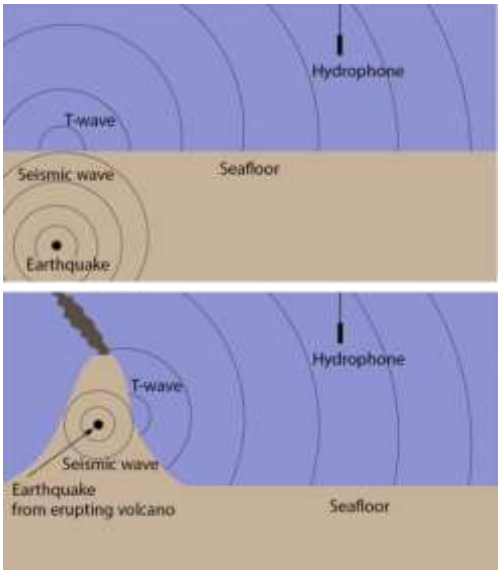
در حوزه ناوبری و ردیابی، صدای زیرآب به دلیل توانایی انتشار در مسافت‌های طولانی، یکی از روش‌های مؤثر برای هدایت شناورها و تجهیزات زیرسطحی به شمار می‌آید. همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، در یک سامانه ناوبری پایه، منبع صوتی (مانند فانوس دریایی صوتی) سیگنالی را در آب منتشر می‌کند که توسط هیدروفون نصب‌شده بر روی قایق دریافت می‌شود. با تحلیل داده‌های دریافتی، می‌توان فاصله و جهت افقی منبع صوت را نسبت به قایق محاسبه کرد. در صورتی که موقعیت دقیق قایق مشخص باشد، مکان دقیق منبع صوتی نیز تعیین‌پذیر خواهد بود [۴۳].



شکل ۲۱. عملکرد ناوبری زیر آب با استفاده از یک مبدل متصل به کشتی و یک چراغ متصل به وسیله نقلیه کنترل از راه دور [۴۳]

۵-۳. اکتشافات لرزه‌ای

هیدروفون‌ها همچنین ابزارهای کلیدی در پایش پدیده‌های لرزه‌ای زیر آب هستند. زمین‌لرزه‌های زیرآبی صداهایی با فرکانس پایین ایجاد می‌کنند که می‌توانند در فواصل بسیار دور به‌صورت امواج T در اقیانوس منتشر شوند. این امواج صوتی که معمولاً در محدوده فرکانسی ۴ تا ۵۰ هرتز قرار دارند، توسط هیدروفون‌ها شناسایی می‌شوند. حتی زلزله‌هایی با بزرگی پایین که از آستانه تشخیص لرزه‌سنج‌های زمینی پایین‌ترند نیز با این روش قابل ردیابی‌اند. فوران‌های آتش‌فشانی زیر آب نیز به تولید امواج صوتی منجر می‌شوند؛ چه از طریق انتشار مستقیم مواد آتش‌فشانی به داخل آب و چه از طریق تبدیل انرژی لرزه‌ای به صوت در مرز بستر دریا. این صداها توسط هیدروفون‌ها ثبت شده و اطلاعات ارزشمندی برای پایش فعالیت‌های آتش‌فشانی، پیش‌بینی سونامی‌ها و تحلیل ساختار زمین‌شناسی بستر دریا در دور از خشکی فراهم می‌کنند. نحوه شناسایی این امواج توسط هیدروفون‌ها در نمایه شکل ۲۲ قابل مشاهده است [۴۴].



شکل ۲۲. نمایه ایجاد امواج T از امواج لرزه‌ای توسط زمین‌لرزه و آتش‌فشان و تشخیص آن توسط هیدروفون [۴۴]

۵-۴. پایش آب و هوا

کاربرد دیگر هیدروفون‌ها در پایش شرایط جوی در سطح دریا است. از آنجا که استفاده از بادسنج‌ها و باران‌سنج‌های معمولی در دریا با محدودیت همراه است، سنسورهای صوتی به‌عنوان جایگزین‌هایی دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سنسورها قادرند صداهای ناشی از برخورد قطرات باران با سطح دریا یا صدای ناشی از وزش باد را ضبط کنند و از این طریق اطلاعاتی درباره میزان بارش یا شدت باد فراهم آورند. نمونه‌ای ساده از باران‌سنج صوتی در شکل ۲۳ نشان داده شده است [۴۵].

شکل ۲۳. باران‌سنج صوتی متصل به یک خط پهلوگیری [۴۵]

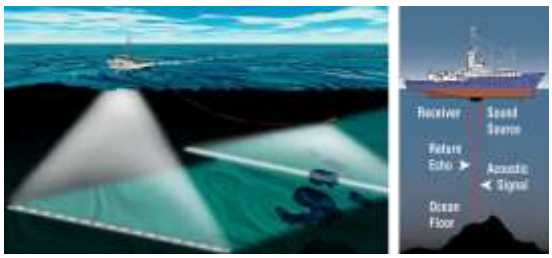
۵-۵. اقیانوس‌شناسی

در سطح پیشرفته‌تری، هیدروفون‌ها بخشی از سامانه‌های رصدخانه‌های اقیانوسی هستند که برای پایش مداوم شرایط فیزیکی، شیمیایی و صوتی در اعماق دریا طراحی شده‌اند. این رصدخانه‌ها که در نقاط مختلف اقیانوس‌ها مستقر شده‌اند، معمولاً از طریق کابل‌های زیر دریا یا سامانه‌های ماهواره‌ای به ایستگاه‌های ساحلی متصل‌اند و قادرند داده‌ها را به‌صورت زنده انتقال دهند که دو نمونه مستقر شده از این هیدروفون‌ها در بستر دریا در شکل ۲۴ قابل مشاهده است. در این رصدخانه‌ها، هیدروفون‌های پهن‌باند برای ثبت و تحلیل انواع صداهای طبیعی و انسانی به کار گرفته می‌شوند؛ از جمله صدای ماهیان، امواج، بارش، کشتی‌ها و همچنین پدیده‌های لرزه‌ای و آتشفشانی. در واقع آرایه‌های هیدروفونی در شناسایی و پایش پستانداران دریایی مانند نهنگ‌ها و دلفین‌ها، تحلیل رفتارهای ارتباطی، بررسی مهاجرت گونه‌ها و ارزیابی اثرات نویز انسان‌ساخت نقش بسیار حیاتی دارند. بسیاری از پروژه‌های زیست‌محیطی از شبکه‌های آرایه‌ای هیدروفونی برای پوشش وسیع صوتی در مناطق حساس استفاده می‌کنند [۴۵].

شکل ۲۴. تصاویر هیدروفون فرکانس پایین مستقر در بستر دریا در سایت رصدخانه [۴۵]

۵-۶. نقشه‌برداری زیر آب

در نهایت، یکی از کاربردهای بسیار مهم هیدروفون‌ها در نقشه‌برداری از بستر دریاست. نقشه‌های عمق‌سنجی دقیق برای ناوبری ایمن، تحقیقات زمین‌شناسی، پایش زیستگاه‌های دریایی و نیز عملیات نظامی حیاتی هستند. در این فرایند، داده‌های حاصل از سونار که شامل اطلاعات دریافتی توسط هیدروفون‌هاست، برای ترسیم نقشه‌های سه‌بعدی از کف اقیانوس‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقیاس‌های کوچک از سونار تک‌پرتویی که در سمت راست شکل ۲۵ نشان داده شده است و برای وسعت‌های بزرگ از سونار چندپرتویی که در سمت چپ شکل ۲۵ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. همچنین از آرایه‌های هیدروفونی در اکتشاف منابع هیدروکربنی زیر بستر دریا با عنوان نقشه‌برداری لرزه‌ای[۲۹] استفاده می‌شود. در این روش، امواج صوتی به بستر دریا ارسال شده و بازتاب‌های آن توسط آرایه‌های هیدروفونی ثبت می‌شود. تحلیل این داده‌ها اطلاعات دقیقی از ساختارهای زمین‌شناسی و محل ذخایر نفت و گاز فراهم می‌کند [۴۶].

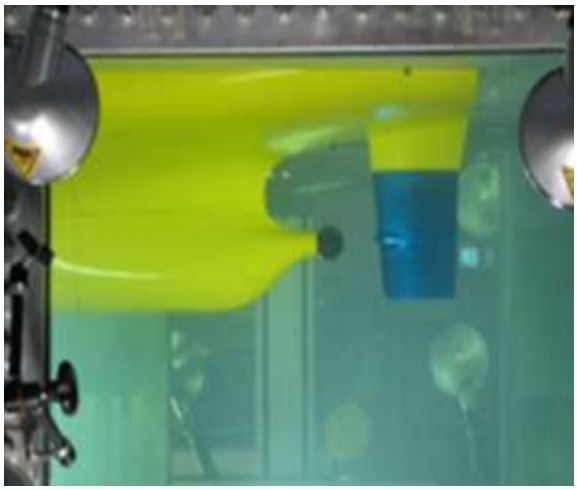


شکل ۲۵. تصویرسازی از پژواک‌سنجی (سمت راست) و تصویری از سونار چند پرتویی از یک کشتی و یک دستگاه یدک‌کش برای نقشه‌برداری از کف دریا(سمت چپ) [۴۶]

۵-۷. طراحی آکوستیکی

از دیگر کاربردهای پیشرفته‌ی آرایه‌های هیدروفونی در حوزه‌ی مهندسی دریایی، استفاده از آن‌ها در فرایند طراحی آکوستیکی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها است. در این کاربرد، آرایه‌های هیدروفونی به عنوان ابزار دقیق اندازه‌گیری و تحلیل نویزهای ساختاری و هیدرودینامیکی به کار گرفته می‌شوند. به طور خاص، در مرحله‌ی طراحی و تست پروانه‌ها و سازه‌های زیرآبی، تحلیل دقیق نویز تولیدشده توسط این اجزا، نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد صوتی

و کاهش نویز غیرمطلوب دارد. یکی از محیط‌های تخصصی که برای این منظور استفاده می‌شود، تونل‌های کاویتاسیون[۳۰] است. این تونل‌ها امکان شبیه‌سازی شرایط جریان دریا در اطراف بدنه‌ی کشتی و پروانه را فراهم می‌آورند. در این محیط کنترل‌شده، آرایه‌های هیدروفونی در موقعیت‌های مختلف پیرامون نمونه‌ی تحت آزمون نصب می‌شوند تا توزیع فضایی و طیفی نویزهای منتشرشده را با دقت بالا ثبت نمایند. تصویر شکل ۲۶ گویای انجام آزمایش پیش‌بینی سر و صدای اجزای یک کشتی است که در یک تونل کاویتاسیون توسط پژوهشگران صورت گرفته است [۴۷].



شکل ۲۶. آزمایش پیش‌بینی سطح سر و صدای یک کشتی مقیاس شده در تونل کاویتاسیون [۴۷]

۶. روش‌های پردازش داده‌های هیدروفون

پردازش داده‌های هیدروفونی یکی از ارکان اساسی در تبدیل سیگنال‌های خام دریافتی به اطلاعات معنادار درباره‌ی محیط‌های زیرسطحی به‌شمار می‌آید. از آن‌جا که امواج صوتی در آب نه‌تنها حامل اطلاعات درباره‌ی منابع طبیعی و زیستی، بلکه بازتاب‌دهنده‌ی بسیاری از فرایندهای ژئوفیزیکی و فعالیت‌های انسان‌ساخت هستند، به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته‌ی پردازش سیگنال در این حوزه اهمیتی دوچندان می‌یابد. نخستین گام در این مسیر، پالایش و پیش‌پردازش داده‌های خام است. سیگنال‌های ثبت‌شده توسط هیدروفون‌ها معمولاً همراه با نویزهای متنوع ناشی از دینامیک محیطی، نویزهای ساختاری، تداخلات الکترومغناطیسی و سایر منابع ناخواسته‌اند. برای ارتقای کیفیت داده‌ها و افزایش نسبت سیگنال به نویز، فیلترهای باند-گذر متناسب با باند فرکانسی مورد نظر به‌کار گرفته می‌شوند. همچنین در بسیاری از سیستم‌ها، از پیش‌تقویت‌کننده‌های با نویز کم برای حفظ یکپارچگی سیگنال در مراحل ابتدایی پردازش استفاده می‌شود. در گام بعد، در صورتی که از آرایه‌های هیدروفونی استفاده شده باشد، تکنیک‌های تشکیل پرتو[۳۱] به منظور تمرکز حساسیت آرایه در جهت‌های خاص و تضعیف مؤثر نویزهای محیطی به‌کار می‌رود. این روش که بر پایه‌ی هم‌ترازسازی زمانی و فازی سیگنال‌های دریافتی از هیدروفون‌های مختلف استوار است، امکان تعیین جهت منبع صوتی و بهبود توان تفکیک فضایی را فراهم می‌سازد. استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌ی تشکیل پرتو نظیر MUSIC[32] یا MVDR[33]، به‌ویژه در محیط‌های با تعداد منابع صوتی بالا یا در حضور نویز زمینه‌ای شدید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۱, ۴۸].

تحلیل سیگنال در حوزه‌ی زمان و فرکانس نیز بخش جدایی‌ناپذیری از فرایند پردازش محسوب می‌شود. برای شناسایی ویژگی‌های طیفی منابع صوتی و تمایز میان سیگنال‌های طبیعی و مصنوعی، تحلیل‌های مبتنی بر تبدیل فوریه سریع[۳۴] (FFT) و تبدیل موجک، بسته به ایستایی یا غیرایستایی بودن سیگنال، به کار گرفته می‌شوند. به‌ویژه در مطالعه‌ی صداهای زیستی،

نظیر آواهای پستانداران دریایی، بهره‌گیری از تحلیل‌های چندمقیاسی مبتنی بر موجک‌ها امکان تشخیص دقیق‌تر الگوهای زمانی-فرکانسی پیچیده را فراهم می‌آورد. در سال‌های اخیر، با رشد توان محاسباتی و پیشرفت در حوزه‌ی هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به طور فزاینده‌ای در پردازش داده‌های هیدروفونی به‌کار گرفته می‌شوند. این رویکردها، که شامل طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان[۳۵]، شبکه‌های عصبی مصنوعی و به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق[۳۶] هستند، امکان شناسایی خودکار و هوشمند الگوهای صوتی خاص را در مجموعه‌های داده‌ی گسترده فراهم می‌کنند. چنین فناوری‌هایی در پروژه‌های زیست‌محیطی، ردیابی منابع صوتی انسان‌ساخت و کاربردهای دفاعی نوین به‌ویژه کاربرد دارند [۴۹]. در نهایت، تعیین موقعیت فضایی منابع صوتی و ردیابی دینامیک آن‌ها یکی از اهداف کلیدی پردازش داده‌های هیدروفونی است. این امر عمدتاً از طریق محاسبه‌ی اختلاف زمان رسیدن سیگنال‌ها[۳۷] (TDOA) به اجزای مختلف یک آرایه و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته‌ی مکان‌یابی انجام می‌شود. در ردیابی مداوم منابع متحرک، فیلترهای کالمن[۳۸]، فیلترهای ذرات و الگوریتم‌های چندفرضیه‌ای به منظور تخمین دقیق مسیر حرکت منابع به کار گرفته می‌شوند. به طور کلی، ادغام این مجموعه‌ی متنوع از تکنیک‌های پردازش سیگنال، بستری فراهم می‌سازد که داده‌های دریافتی از هیدروفون‌ها بتوانند به‌گونه‌ای کارآمد و قابل اتکا در خدمت شناخت، مدیریت و پایش محیط‌های زیرآبی قرار گیرند.

۷. چشم انداز آینده فناوری هیدروفونی

با توجه به گسترش روزافزون نیازهای فناورانه در حوزه اقیانوس‌نگاری، امنیت دریایی، پایش زیستی و اکتشافات زیرسطحی، فناوری هیدروفونی و سامانه‌های آرایه‌ای مرتبط در آستانه تحولی اساسی قرار دارد. این تحول فراتر از بهبود پارامترهای کلاسیک نظیر حساسیت، پایداری و گستره فرکانسی بوده و بر بازطراحی ساختار سامانه‌ها با محوریت هوشمندسازی، مینیاتوریزه‌سازی و شبکه‌سازی توزیع‌شده متمرکز است. توسعه هیدروفون‌های مینیاتوری مبتنی بر فناوری MEMS و مواد نانوساختاری، امکان کاهش چشمگیر مصرف انرژی و ابعاد فیزیکی را فراهم می‌آورد و پایداری بالایی در شرایط محیطی مختلف ارائه می‌دهد. این حسگرهای نسل جدید با قابلیت استقرار در شبکه‌های گسترده و نیاز به نگهداری کم، گزینه‌ای ایده‌آل برای پایش بلندمدت شرایط اقیانوسی، بررسی تغییرات اقلیمی و رصد دقیق صداهای زیستی با دقت تصویر[۳۹] زمانی بالا محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، هیدروفون‌های مبتنی بر فیبر نوری به دلیل دقت بالا و مقاومت قابل توجه در برابر نویزهای الکترومغناطیسی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های نظامی، لرزه‌نگاری دریایی و شنود راهبردی یافته‌اند. امکان ادغام این حسگرها در کابل‌های مخابراتی زیردریایی، ساخت سامانه‌های دوگانه مخابراتی آکوستیکی را میسر ساخته که منجر به کاهش هزینه‌های زیرساختی و ارتقای کارایی شبکه‌های زیرآبی می‌شود.

هوشمندسازی سامانه‌های هیدروفونی با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش سیگنال و یادگیری ماشین امکان شناسایی، طبقه‌بندی و مکان‌یابی منابع صوتی را به صورت بلادرنگ فراهم می‌کند و عملکرد

این سامانه‌ها را حتی در شرایط نویزی بالا حفظ می‌نماید. به‌کارگیری الگوریتم‌های تطبیقی و شبکه‌های عصبی عمیق در تحلیل الگوهای زیستی و امنیتی دریایی نقشی تعیین‌کننده دارد و به ارتقای دقت و قابلیت اطمینان سامانه‌های زیرآبی کمک می‌کند. در چارچوب شبکه‌های حسگر زیرآبی توزیع‌شده[۴۰] و اینترنت اشیای زیرآبی، صدها تا هزاران حسگر آکوستیکی در گستره‌های وسیع دریایی به تبادل داده می‌پردازند و اطلاعات را به ایستگاه‌های ساحلی یا ماهواره‌ای منتقل می‌کنند. این ساختارهای شبکه‌ای امکان پایش گسترده، پاسخ سریع به رویدادهای طبیعی یا مصنوعی و انجام تحلیل‌های دقیق مکانی-زمانی را به صورت هم‌زمان فراهم می‌آورند. فراتر از محیط‌های زمین‌محور، فناوری هیدروفونی در حوزه اخترآکوستیک نیز کاربردهای نوینی پیدا کرده است؛ به‌ویژه در بررسی امکان استفاده از این فناوری در اقیانوس‌های زیرسطحی قمرهایی مانند اروپا[۴۱] و انسلادوس[۴۲]. طراحی حسگرهایی با قابلیت عملکرد در فشارهای بسیار بالا، دماهای منفی شدید و فقدان میدان‌های مغناطیسی متداول، گامی نوین در جهت اکتشاف حیات فرازمینی و درک رفتار سیالات در محیط‌های یخی به شمار می‌آید. در مجموع، آینده فناوری هیدروفون‌ها در پیوند با مفاهیمی همچون حسگرهای هوشمند، شبکه‌های خودتنظیم، تحلیل‌های بلادرنگ و داده‌محور، و استفاده در محیط‌های نوظهور شکل خواهد گرفت. این مسیر تحول نه‌تنها وابسته به پیشرفت‌های فناورانه، بلکه نیازمند هم‌افزایی میان علوم فیزیک، مهندسی، زیست‌محیطی و داده‌کاوی است؛ هم‌افزایی‌ای که نویدبخش نسلی تازه از سامانه‌های شنود زیرآبی دقیق، پایدار و هوشمند خواهد بود [۵۰].

۸. نتیجه‌گیری

تحول فناوری هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی در طول یک قرن گذشته، از ابزارهای ساده‌ی دریافت صدا به سامانه‌های پیشرفته‌ی هوشمند، مسیر چشمگیری را طی کرده است. این ابزارها اکنون به‌عنوان یکی از ارکان اساسی در علوم دریایی و پایش زیرسطحی شناخته می‌شوند و نقش بی‌بدیلی در شناخت پدیده‌های طبیعی، نظارت زیست‌محیطی، پشتیبانی از ایمنی و امنیت دریایی، و بهره‌برداری هوشمندانه از منابع فراساحلی ایفا می‌کنند. همان‌طور که در این مقاله نشان داده شد، پیشرفت‌های فناورانه در زمینه مواد پیزوالکتریک، طراحی ساختاری، فناوری فیبر نوری و میکروسیستم‌هایMEMS ، همراه با توسعه‌ی الگوریتم‌های نوین پردازش سیگنال، افق‌های جدیدی را پیش روی این حوزه گشوده‌اند. کاربردهای متنوع هیدروفون‌ها، از پایش رفتار زیستی گونه‌های دریایی تا لرزه‌شناسی دقیق، ردیابی منابع صوتی انسان‌ساخت، ارتباطات زیرآبی، نقشه‌برداری بستر دریا و تحلیل سازه‌های دریایی نشان‌دهنده‌ی گستره‌ی عظیم این فناوری در پاسخگویی به نیازهای علمی، صنعتی و نظامی است. اهمیت این ابزارها در پایش تغییرات اقلیمی و زیست‌محیطی و نیز در بهبود ایمنی عملیات فراساحلی و دفاع دریایی، هر ساله در سطح بین‌المللی در حال افزایش است. از منظر ملی، جایگاه ویژه‌ی کشور ایران با دسترسی به سه پهنه‌ی دریایی مهم خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر و برخورداری از مرزهای گسترده‌ی آبی، اهمیت استراتژیک بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ی آکوستیک زیرآبی

را دوچندان می‌سازد. وجود منابع عظیم نفت و گاز فراساحلی، سکوها و تأسیسات دریایی متعدد، و همچنین تنوع زیستی بالا در این دریاها، ایجاب می‌کند که ایران به سمت توسعه‌ی توانمندی‌های بومی در حوزه‌ی هیدروفون‌ها و سامانه‌های پایش آکوستیکی حرکت کند. علاوه بر این، حساسیت بالای منطقه‌ی خلیج فارس به تهدیدات امنیتی و ژئوپلیتیکی، ضرورت بهره‌گیری از سامانه‌های نظارتی پیشرفته برای ارتقای امنیت دریایی کشور را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

یکی از چالش‌های مهم در این مسیر، وابستگی به تجهیزات وارداتی و محدودیت‌های فناورانه در طراحی و تولید بومی است. با این حال، همان‌گونه که در بخش افق‌های آینده این مقاله اشاره شد، فرصت‌های بسیاری در استفاده از فناوری‌های نوین همچون حسگرهای فیبر نوری، شبکه‌های حسگر زیرآبی، هوش مصنوعی و سامانه‌های تطبیقی وجود دارد که می‌تواند مسیر بومی‌سازی این فناوری را هموارتر کند. ترکیب تخصص‌های میان‌رشته‌ای از آکوستیک و مهندسی مواد گرفته تا الکترونیک و علوم داده کلید موفقیت در این مسیر خواهد بود. به‌طور کلی، توسعه‌ی فناوری هیدروفون‌ها و آرایه‌های هیدروفونی، نه تنها ضرورتی فناورانه و علمی برای کشور ما به‌شمار می‌آید، بلکه بستری راهبردی برای مدیریت پایدار دریاها، حفاظت از محیط زیست دریایی، بهبود ایمنی و کارایی صنایع فراساحلی و تقویت توان دفاعی دریایی فراهم می‌سازد. سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های بنیادی و کاربردی، حمایت از طرح‌های نوآورانه و گسترش همکاری‌های بین‌المللی، از جمله راهکارهایی است که می‌تواند جایگاه ایران را در این حوزه‌ی حیاتی ارتقا دهد. امید است که این مقاله بتواند سهمی در ارتقای آگاهی عمومی و تخصصی پیرامون اهمیت و کاربردهای گسترده‌ی فناوری هیدروفون‌ها ایفا کند و انگیزه‌ای برای پژوهشگران، صنعتگران و سیاست‌گذاران در جهت توسعه‌ی هرچه بیشتر این حوزه‌ی راهبردی در کشور فراهم آورد.

منابع

[1] Bjørnø, L., and I. Bjørnø. "Underwater Acoustics and its Applications. A historical review." *Hydroacoustics* 2 (1999).

[2] Erbe, Christine, and Jeanette A. Thomas. *Exploring animal behavior through sound: Volume 1: Methods*. Springer Nature, 2022.

[3] Muir, Thomas G., and D. L. Bradley. "Underwater acoustics: A brief historical overview through world war II." *Acoustics today* 12, no. 3 (2016): 40-48.

[4] Ainslie, Michael A., and Christ AF de Jong. "Sources of underwater sound and their characterization." *The Effects of Noise on Aquatic Life II* (2016): 27-35.

[5] Miksis-Olds, Jennifer L., Bruce Martin, and Peter L. Tyack. "Exploring the ocean through soundscapes." *Acoust. Today* 14, no. 9 (2018): 26-34.

[6] Bjørnø, Leif. "Features of underwater acoustics from Aristotle to our time." *Acoustical Physics* 49, no. 1 (2003): 24-30.

[7] Bjørnø, L. "Underwater acoustic measurements and their applications." In *Applied underwater acoustics*, pp. 889-947. Elsevier, 2017.

[8] H. Handbook, Onda Corporation, Sunnyvale, CA, USA, .(۲۰۱۵)

[9] Bountourakis, Vasileios. "Spatial audio signal processing for passive sonar applications." (2024).

[10] Rodríguez, Orlando Camargo. *Fundamentals of underwater acoustics*. Springer, 2023.

[11] Saheban, Hamid, and Zoheir Kordrostami. "Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: A review." *Sensors and Actuators A: Physical* 329 (2021): 112790.

[12] Khalilabadi Mohammadreza, *Underwater acoustic measurement*, Publications of Malik Ashtar University of Technology, 2022.

[13] Crook, Tim. *The sound handbook*. Routledge, 2013.

[14] Qin, Limu, Yazhong Lu, Yue Xu, and Wen He. "The calibration methods of hydrophones for underwater environmental sound measurements or biomedical ultrasound measurements: A review." *Measurement* 242 (2025): 115700.

[15] Soni, Shweta. "A Review Paper on Hydrophones." *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 7, no. 23 (2017): 1-3.

[16] Je, Yub, Minseop Sim, Yohan Cho, Sang-Goo Lee, and Hee-Seon Seo. "Theoretical and experimental studies on sensitivity and bandwidth of thickness-mode driving hydrophone utilizing a 2-2 piezoelectric single crystal composite." *Sensors* 23, no. 7 (2023): 3445.

[17] Medeiros, Leandro José de, Heitor Cury Basso, Ruy Alberto Corrêa Altafim, Hermes Arytto Salles Kamimura, Antonio Adilton Oliveira Carneiro, and Ruy Alberto Pisani Altafim. "Multi-layer piezoelectret hydrophone for ultrasonic applications." In *2012 IEEE International Ultrasonics Symposium*, pp. 1-4. IEEE, 2012.

[18] Abdul, Basit, Vincenzo Mariano Mastronardi, Antonio Qualtieri, Luciana Algieri, Francesco Guido, Francesco Rizzi, and Massimo De Vittorio. "Sensitivity and directivity analysis of piezoelectric ultrasonic cantilever-based mems hydrophone for underwater applications." *Journal of Marine Science and Engineering* 8, no. 10 (2020): 784.

[19] Bereketli, Alper, Mehmet B. Guldogan, Taner Kolcak, Tamer Gudu, and Ahmet Levent Avsar. "Experimental results for direction of arrival estimation with a single acoustic vector sensor in shallow water." *Journal of Sensors* 2015, no. 1 (2015): 401353.

[20] Wang, Wenrui, Yeye Pei, Lingyun Ye, and Kaichen Song. "High-sensitivity cuboid interferometric fiber-optic hydrophone based on planar rectangular film sensing." *Sensors* 20, no. 22 (2020): 6422.

[21] Meng, Zhou, Wei Chen, Jianfei Wang, Xiaoyang Hu, Mo Chen, and Yichi Zhang. "Recent progress in fiber-optic hydrophones." *Photonic Sensors* 11, no. 1 (2021): 109-122.

[22] Hurrell, A., and P. Beard. "Piezoelectric and fibre-optic hydrophones." In *Ultrasonic transducers*, pp. 619-676. Woodhead Publishing, 2012.

[23] Liu, Ming, Lin Zhang, Weiyu Qu, Lianglong Da, and Tong Liu. "Advances in MEMS hydrophone technology." *IEEE Access* (2025).

[24] Chen, Peng, Guojun Zhang, Ting Lv, Xiaoqi Liang, Xi Yang, Songxiang Ji, Weirong Ren et al. "Design of ciliated MEMS vector hydrophone based on stainless steel mesh cap." *Measurement* 187 (2022): 110367.

[25] Wood, Nicolas. "An overview of the calibration process for a digital hydrophone." *The Journal of the Acoustical Society of America* 155, no. 3_Supplement (2024): A349-A349.

[26] Listewnik, Karol. "A design of an acoustic coupler for calibration of hydrophones at low frequencies." *Vibrations in Physical Systems* 30, no. 1 (2019): 1-8.

[27] Umchid, Sumet, R. Gopinath, K. Srinivasan, P. A. Lewin, A. S. Daryoush, L. Bansal, and M. El-Sherif. "Development of calibration techniques for ultrasonic hydrophone probes in the frequency range from 1 to 100 MHz." *Ultrasonics* 49, no. 3 (2009): 306-311.

[28] International Electrotechnical Commission. "IEC 60565-1: 2020. Underwater acoustics-Hydrophones-Calibration of hydrophones-Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones. Edition 1." (2020).

[29] Crocker, Steven E., and Ronald R. Smalley. "Calibration of a digital hydrophone line array at low frequency." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 41, no. 4 (2016): 1020-1027.

[30] Butler, John L., and Charles H. Sherman. *Transducers and arrays for underwater sound*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[31] Gebbie, John, Martin Siderius, Peter L. Nielsen, James H. Miller, Steven Crocker, and Jennifer Giard. "Small boat localization using adaptive three-dimensional beamforming on a tetrahedral and vertical line array." In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, no. 1, p. 070072. Acoustical Society of America, 2013.

[32] He, Zhengyao, Qiang Shi, and Yuanliang Ma. "Performance analysis of superdirective beamforming of circular hydrophone array." In *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pp. 144-147. IEEE, 2017.

[33] Delikaris-Manias, Symeon, Leo McCormack, Ilkka Huhtakallio, and Ville Pulkki. "Real-time underwater spatial audio: a feasibility study." In *144th Audio Engineering Society Convention 2018*, no. May. 2018.

[34] Fillinger, L., A. J. Hunter, M. C. C. M. Zampolli, and M. C. Clarijs. "Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment." *The Journal of the Acoustical Society of America* 132, no. 4 (2012): EL310-EL316.

[35] Acharya, Raja. "Sono bouys." *Indian J. Geo-Mar. Sci* 47 (2018): 1723-1726.

[36] Holler, Roger A. *The evolution of the sonobuoy from World War II to the Cold War*. No. JUA2014025N. 2014.

[37] Bohac, Filip. "DIFAR sonobuoy bearing estimation using the fast orthogonal search algorithm." (2005): 0369-0369.

[38] Desrochers, J. Y. D. "High-resolution beamforming techniques applied to a DIFAR sonobuoy." (2000): 0715-0715.

[39] Bahadori, Masoud. "An Introduction To Underwater Acoustics and SONAR Technology." (2014): 5-7.

[40] Waite, Ashley D. "Sonar for practising engineers." *(No Title)* (2002).

[41] Dumortier, Florent. "Principle of vibroacoustic subtractive modelling and application to the prediction of the acoustic radiation of partially coated submerged cylindrical shells." PhD diss., Université de Lyon, 2021.

[42] Maranda, Brian H. "Passive sonar." In *handbook of signal processing in acoustics*, pp. 1757-1781. New York, NY: Springer New York, 2008.

[43] Rashid, M. M., and Raju Ahamed. "Instrumentation in Underwater Environment." In *Control Engineering in Robotics and Industrial Automation: Malaysian Society for Automatic Control Engineers (MACE) Technical Series 2018*, pp. 239-256. Cham: Springer International Publishing, 2021.

[44] Okal, Emile A. "The generation of T waves by earthquakes." *Advances in geophysics* 49 (2008): 1-65.

[45] Howe, Bruce M., Jennifer Miksis-Olds, Eric Rehm, Hanne Sagen, Peter F. Worcester, and Georgios Haralabus. "Observing the oceans acoustically." *Frontiers in Marine Science* 6 (2019): 426.

[46] Salous, Sana. *Radio propagation measurement and channel modelling*. John Wiley & Sons, 2013.

[47] Park, Cheolsoo, Gun-Do Kim, Young-Ha Park, Keunhwa Lee, and Woojae Seong. "Noise localization method for model tests in a large cavitation tunnel using a hydrophone array." *Remote Sensing* 8, no. 3 (2016): 195.

[48] Elbir, Ahmet M., Kumar Vijay Mishra, Sergiy A. Vorobyov, and Robert W. Heath. "Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques." *IEEE Signal Processing Magazine* 40, no. 4 (2023): 118-131.

[49] Bianco, Michael J., Peter Gerstoft, James Traer, Emma Ozanich, Marie A. Roch, Sharon Gannot, and Charles-Alban Deledalle. "Machine learning in acoustics: Theory and applications." *The Journal of the Acoustical Society of America* 146, no. 5 (2019): 3590-3628.

[50] Sharif-Yazd, Mohammad, Mohammad Reza Khosravi, and Mohammad Kazem Moghimi. "A survey on underwater acoustic sensor networks: Perspectives on protocol design for signaling, MAC and routing." *arXiv preprint arXiv:1703.08353* (2017).

پی‌نوشت

[1] Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)
[2] Aristotle
[3] Da Vinci
[4] Jean-Daniel Colladon
[5] Charles Francois Stern
[6] Reginald Fessenden
[7] Brüel & Kjær, B&K
[8] Transduction element
[9] Housing
[10] Lead Zirconate Titanate, PZT, Pb(ZrTi)
[11] Low-Noise Preamplifiers
[12] Coaxial Cable
[13] Underwater Acoustic Modems
[14] Directivity
[15] Self-noise

[16] polyvinylidene difluoride
[17] Vector Hydrophones
[18] Adaptive beamforming
[19] Fiber-Optic Hydrophones
[20] NPL (UK)
[21] NIST (USA)
[22] PTB (Germany)
[23] Signal to noise ratio (SNR)
[24] Sonobuoy
[25] In-situ calibration
[26] Self-calibration
[27] Low-Frequency Array (LOFAR)
[28] Directional Frequency Analysis and Recording (DIFAR)
[29] Seismic Surveying
[30] Cavitation tunnels
[31] Beamforming
[32] Multiple Signal Classification
[33] Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)
[34] Fast Fourie Transform (FTT)
[35] Support vector machines (SVMs)
[36] Deep neural networks
[37] Time Difference of Arrival (TDOA)
[38] Kalman Filter
[39] Resolution
[40] UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS (UWSNs)

[41] *اروپا* نام یکی از نود و پنج قمر سیاره مشتری است.
[42] قمر یخی "*انسلادوس*" ششمین قمر بزرگ زحل است.