

بررسی و مقایسه پاسخ‌دهی صوتی و قابلیت شناسایی آرایه‌های هیدروفونی هم‌مرکز و مربعی در فرکانس‌های سوناری مبتنی بر الگوریتم‌های MVDR و DAS در نرم‌افزار متلب

امید کاظمی آهوئی^۱، ابوالفضل حسنی بافرانی^{۲*}

ایران، تفرش، دانشگاه تفرش، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۹۵۱۸-۷۹۶۱۱

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Baferani@tafreshu.ac.ir

چکیده

آرایه‌های هیدروفونی به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در سامانه‌های سونار و پردازش سیگنال‌های صوتی زیرآب، نقش مهمی در افزایش دقت شناسایی و بهبود پاسخ‌دهی صوتی ایفا می‌کنند. طراحی هندسی این آرایه‌ها، به‌ویژه شکل هم‌مرکز و مربعی، تأثیر مستقیمی بر قابلیت تشخیص منبع صوتی، جهت‌یابی و کاهش نویز محیطی دارد. در این پژوهش، به بررسی و مقایسه عملکرد دو ساختار هندسی آرایه‌های هیدروفونی هم‌مرکز و مربعی پرداخته شده است. هدف اصلی، تحلیل میزان پاسخ‌دهی صوتی و ارزیابی قابلیت شناسایی این آرایه‌ها در فرکانس‌های کاری سوناری است. برای تحلیل دقیق‌تر، از دو الگوریتم پرکاربرد در پردازش آرایه‌ای، یعنی الگوریتم‌های تأخیر و جمع^۱ و حداقل‌وارینانس پاسخ بدون اعوجاج^۲ استفاده شده است. الگوریتم DAS به‌عنوان روشی کلاسیک و ساده، امکان جمع‌کردن سیگنال‌ها با تأخیر مناسب را فراهم می‌کند؛ در حالی که الگوریتم MVDR با حداقل‌سازی توان نویز و تداخل، توانایی بالاتری در جداسازی سیگنال‌ها و افزایش نسبت سیگنال به نویز دارد. مقایسه نتایج این دو روش بر روی آرایه‌های هم‌مرکز و مربعی، نقاط قوت و ضعف هر ترکیب را در شرایط مختلف فرکانسی نمایان می‌سازد. پیاده‌سازی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است که امکان مدل‌سازی دقیق آرایه‌ها، اعمال الگوریتم‌ها و تحلیل نتایج را فراهم ساخته است. یافته‌های به‌دست‌آمده می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی آرایه‌های هیدروفونی برای کاربردهای عملی سونار، نظارت زیست‌محیطی و ارتباطات زیرآبی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آرایه هیدروفونی، پاسخ‌دهی صوتی، قابلیت شناسایی، سونار

^۱ Delay and Sum (DAS)

^۲ Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)

۱- مقدمه

آب به‌عنوان محیطی پیچیده برای انتشار صوت، همواره چالش‌های متعددی را در حوزه شناسایی و پایش زیرآب به همراه داشته است. در چنین محیطی، به‌دلیل جذب، انعکاس و شکست امواج صوتی، استفاده از ابزارهای دقیق و کارآمد ضروری است. هیدروفون‌ها به‌عنوان حسگرهای اصلی در سامانه‌های صوتی زیرآب، نقش کلیدی در دریافت سیگنال‌های صوتی، شناسایی منابع و پایش محیط ایفا می‌کنند [۱-۳]. در واقع، کیفیت عملکرد هر سامانه صوتی زیرآبی تا حد زیادی به طراحی و آرایش هندسی هیدروفون‌ها وابسته است. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی آرایه‌های هیدروفونی با هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند. آرایه‌های مربعی به‌دلیل سادگی طراحی و پیاده‌سازی گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند، در حالی که آرایه‌های هم‌مرکز (Concentric) امکان ایجاد الگوهای جهت‌دار متنوع‌تر و انعطاف‌پذیری بالاتر در شناسایی اهداف را فراهم می‌آورند [۴-۶].

مقایسه این دو ساختار می‌تواند به درک بهتر مزایا و محدودیت‌های هر یک در کاربردهای سوناری منجر شود. در زمینه پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای، الگوریتم‌های مختلفی توسعه یافته‌اند. الگوریتم DAS به‌عنوان روشی پایه‌ای، در بسیاری از کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما محدودیت‌هایی در جداسازی سیگنال‌ها در شرایط نویزی دارد. در مقابل، الگوریتم MVDR با تمرکز بر کاهش توان نویز و بهبود تفکیک‌پذیری، توانایی بالاتری در استخراج اطلاعات دقیق از داده‌های دریافتی نشان داده است [۷]. اهمیت مطالعه چنین آرایه‌ها و الگوریتم‌هایی در کشور ایران نیز به‌خوبی محسوس است. با توجه به دسترسی گسترده ایران به منابع دریایی همچون خلیج فارس و دریای عمان، نیاز به سامانه‌های پایش و شناسایی صوتی زیرآب برای اهدافی نظیر امنیت دریایی، پایش زیست‌محیطی، و تحقیقات علمی، بیش از پیش احساس می‌شود. طراحی و شبیه‌سازی آرایه‌های هیدروفونی مناسب می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه فناوری‌های بومی در حوزه آکوستیک زیرآب و ارتقای توان علمی و عملی کشور باشد [۸].

فرکانس‌های مورد استفاده در سامانه‌های سوناری، بسته به نوع کاربرد، می‌توانند در بازه‌های پایین تا بالا انتخاب شوند. فرکانس‌های پایین به‌دلیل نفوذ بیشتر در آب، برای آشکارسازی اهداف در مسافت‌های طولانی مناسب‌اند، اما توان تفکیک کمتری دارند. در مقابل، فرکانس‌های بالا قابلیت تفکیک مکانی بهتری ارائه می‌دهند، هرچند تضعیف بیشتری را در محیط آبی تجربه می‌کنند [۹، ۱۰]. بنابراین انتخاب نوع آرایه هیدروفونی و الگوریتم پردازشی وابسته به شرایط محیطی و نیاز عملیاتی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. یکی از چالش‌های اساسی در طراحی آرایه‌های هیدروفونی، دستیابی به الگوی پاسخ‌دهی باریک و کارآمد است که امکان تفکیک دقیق منابع صوتی را فراهم آورد. پهنای پرتو، سطح لوب‌های جانبی و توانایی در کاهش تداخل از جمله شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد یک آرایه محسوب می‌شوند. بهبود این شاخص‌ها می‌تواند کارایی سامانه‌های سوناری را در شرایط با نویز بالا و متداخل ارتقاء بخشد [۱۱]. در همین راستا، بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای مانند MVDR می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در طراحی سامانه‌های آینده‌نگر مورد توجه قرار گیرد. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش‌های زیادی بر روی آرایه‌های خطی و دایروی صورت گرفته است، اما مقایسه جامع میان آرایه‌های هم‌مرکز و مربعی به‌ویژه در بستر فرکانس‌های سوناری کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام تحقیقاتی نوین برای بررسی دقیق‌تر عملکرد این دو ساختار هندسی را آشکار می‌سازد. علاوه بر این، با توجه به شرایط ویژه جغرافیایی و نیازهای کاربردی کشور، نتایج حاصل از چنین پژوهش‌هایی می‌تواند مسیر توسعه سامانه‌های بومی و متناسب با شرایط محیطی ایران را هموار سازد. از این‌رو، در این پژوهش به بررسی و مقایسه پاسخ‌دهی شدت صوت در فرکانس‌های سوناری و قابلیت شناسایی منبع صوتی از پیش تعیین شده توسط دو ساختار هندسی آرایه‌های هیدروفونی هم‌مرکز و مربعی پرداخته می‌شود. تحلیل‌ها بر اساس نمودارهای شدت صوت بر حسب فرکانس و همچنین الگوریتم‌های DAS و MVDR انجام شده و تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی گردیده است. نتایج حاصل می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی آرایه‌ها و انتخاب روش پردازشی مناسب برای کاربردهای سوناری و دریایی مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای ساده‌سازی مدل انتشار، تنها سیگنال مستقیم منبع در نظر گرفته شده و اثر بازتاب‌ها و سیگنال‌های بازگشتی ناشی از سطح، کف و موانع محیطی وارد شبیه‌سازی نشده است.

۲- شبیه سازی

به منظور ارزیابی دقیق عملکرد هندسه‌های هم‌مرکز و مربعی، شبیه‌سازی‌های عددی در محیط MATLAB انجام شد. در این مطالعه، هر دو ساختار هندسی با تعداد المان یکسان و چیدمان بهینه انتخاب گردید تا مقایسه‌ای عادلانه میان آن‌ها صورت گیرد. فاصله میان المان‌ها بر اساس معیار نیم‌طول موج فرکانس مرکزی تنظیم شد تا از بروز پدیده هم‌پوشانی طیفی و ایجاد لوب‌های جانبی غیرواقعی جلوگیری شود. دامنه فرکانسی مورد بررسی در بازه ۱ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز تعریف گردید. این بازه محدوده‌ای متداول در سامانه‌های سوناری میان‌برد محسوب می‌شود و امکان بررسی هم‌زمان نفوذ صوت در فرکانس‌های پایین و توان تفکیک بالاتر در فرکانس‌های بالا را فراهم می‌سازد. برای ساده‌سازی مدل، محیط انتشار همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته شد و سرعت صوت در آب برابر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض گردید که یکی از مقادیر مرجع در مطالعات آکوستیک زیرآب است. در شبیه‌سازی‌ها، منبع صوتی به صورت یک موج سینوسی تک‌فرکانسی با دامنه ثابت و انتشار کروی مدل‌سازی شده است و موقعیت آن در مختصات ثابت تعریف گردیده است. انتشار امواج در محیط همگن با سرعت ثابت صوت در آب محاسبه شده است [۱۲].

در این پژوهش، پردازش داده‌ها بر اساس دو الگوریتم DAS و MVDR صورت گرفت. الگوریتم DAS با اعمال تأخیر مناسب بر سیگنال‌های دریافتی و جمع‌بندی آن‌ها، تصویری پایه‌ای از الگوی جهت‌داری آرایه ارائه داد که فرمول ابتدایی آن به صورت معادله (۱) است:

$$z_t = \sum_{m=0}^{M-1} w_m y_m(t - \Delta m) \quad (1)$$

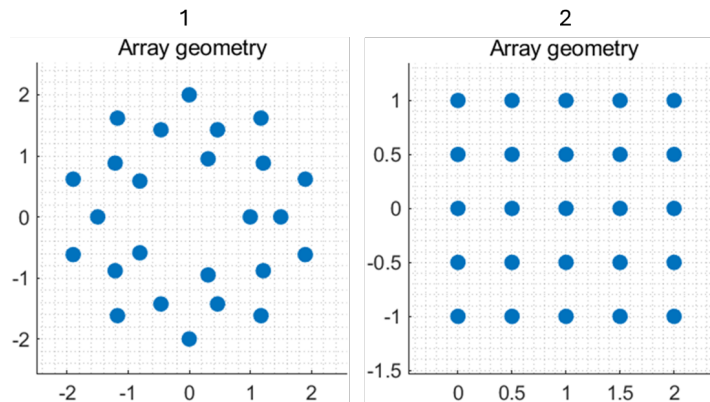
در مقابل، الگوریتم MVDR با بهره‌گیری از رویکرد آماری و حداقل‌سازی توان تداخل و نویز، دقت بالاتری در تمرکز پرتو و کنترل لوب‌های جانبی از خود نشان می‌دهد که واریانس سیگنال خروجی را به حداقل می‌رساند و در عین حال پاسخ ثابتی را در جهت سیگنال مورد نظر حفظ می‌کند و فرمول آن به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$w_{mvdr} = \frac{R^{-1}a(\theta)}{a(\theta)H R^{-1}a(\theta)} \quad (2)$$

برای اطلاع بیشتر از نحوه اعمال معادلات و جزئیات این الگوریتم‌ها پیشنهاد می‌شود به منبع [۱۲] مراجعه شود. تمامی مراحل مدل‌سازی، تولید سیگنال و پردازش پرتو در محیط کدنویسی MATLAB پیاده‌سازی شد تا امکان تنظیم دقیق پارامترها و بازتولید نتایج برای شرایط مختلف فراهم گردد [۱۳، ۱۴]. شایان ذکر است که نتایج حاصل، شامل الگوهای پرتو دهی و پاسخ‌های فرکانسی استخراج شده، در بخش بعدی مقاله ارائه و تحلیل خواهند شد. این چارچوب شبیه‌سازی مبنایی جامع برای قضاوت علمی در خصوص مزایا و محدودیت‌های هر هندسه فراهم می‌آورد.

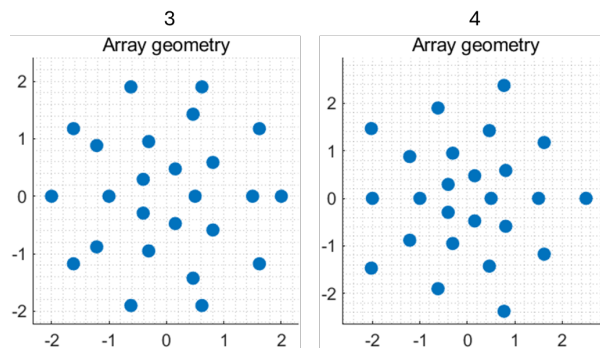
۳- ارائه نتایج

پس از اعمال شرایط شبیه‌سازی در نرم افزار متلب، چهار چیدمان آرایه هیدروفونی که در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند، با تعداد ۲۵ عدد هیدروفون ایجاد شده است. همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است چیدمان اول به شکل هم‌مرکز سه لایه ای به ترتیب دارای ۵ هیدروفون در لایه اول، ۱۰ هیدروفون در لایه دوم و ۱۰ هیدروفون دیگر در لایه سوم است و همچنین فاصله بین لایه‌های هیدروفونی به صورت (۱، ۱.۵، ۲) متر در نظر گرفته شده است. چیدمان دوم که در سمت راست شکل (۱) نشان داده شده است به شکل مربعی است که فاصله بین هر هیدروفون ۰.۵ متر است.



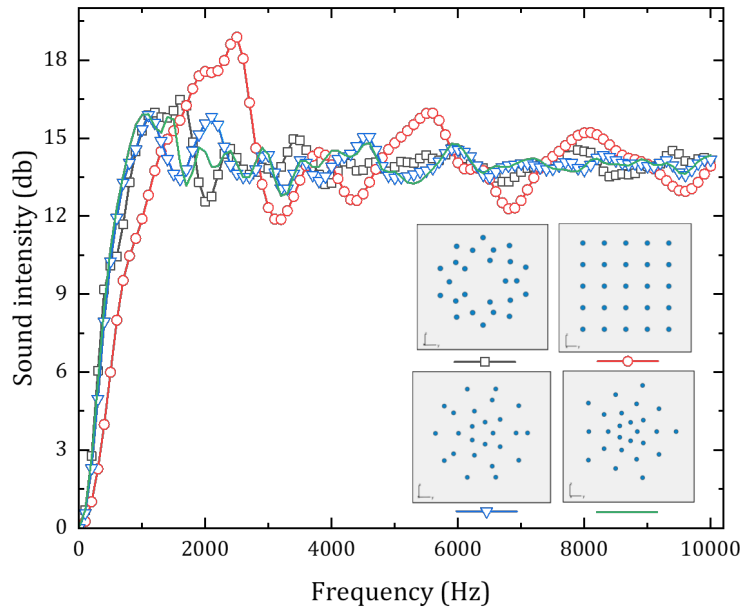
شکل ۱. تصویر چیدمان آرایه هیدروفونی هم مرکز با سه لایه هیدروفون (سمت چپ) و چیدمان آرایه هیدروفونی مربعی (سمت راست)

در ادامه دو چیدمان هم مرکز دیگر نیز با لایه های هیدروفونی متفاوت ایجاد شده‌اند که در شکل (۲) مشخص شده‌اند. چیدمان شماره ۳ که در سمت چپ شکل (۲) مشخص شده دارای ۴ لایه هیدروفون است که سه لایه اول این چیدمان دارای ۵ هیدروفون و لایه آخر آن دارای ۱۰ عدد هیدروفون است. فاصله بین این چیدمان‌ها نیز به صورت (۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲) متر در نظر گرفته شده است. چیدمان شماره ۴ هم چیدمان هم مرکزی است که در سمت راست شکل (۲) نشان داده شده است و دارای ۵ لایه هیدروفون ۵ عددی است. این نکته قابل بیان است که سعی شده است در این چیدمان‌ها فضای اشغال شده توسط هیدروفون‌ها برابر باشند.



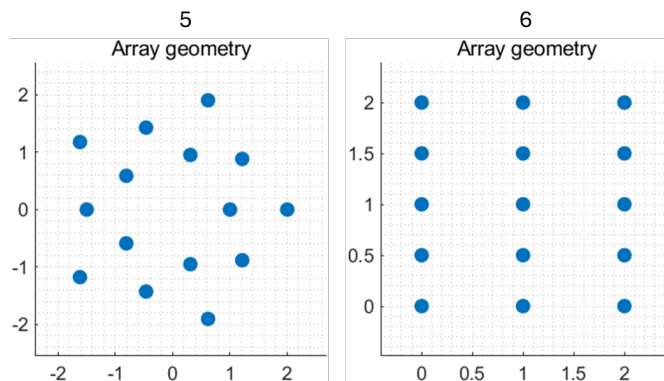
شکل ۲. تصویر چیدمان آرایه هیدروفونی هم مرکز با چهار لایه هیدروفون (سمت چپ) و چیدمان آرایه هیدروفونی هم مرکز با پنج لایه هیدروفون (سمت راست)

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود میزان پاسخ دهی شدت صوت در فرکانس‌های مختلف از ۱ تا ۱۰۰۰۰ هرتز بر حسب دسی بل برای برای ۴ چیدمان ۲۵ عددی اول مشخص شده است. با نگاه ابتدایی به این نمودارها می‌توان دریافت که چیدمان مربعی بیشترین میزان پاسخ‌دهی در شرایط مشابه نسبت به چیدمان‌های هم مرکز دارد اما نکته قابل توجه این است که بیشترین پاسخ دهی صوتی چیدمان‌های هم مرکز یعنی چیدمان‌های ۱، ۳ و ۴ در فرکانس پایین‌تری نسبت به چیدمان مربعی رخ می‌دهد. چیدمان هم مرکز شماره ۱ در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز ۱۶.۴۷ دسی بل پاسخ دهی دارد و چیدمان شماره ۲ که مربعی شکل است در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز دارای بیشترین پاسخ دهی صوتی نسبت به سایرین معادل ۱۸.۸۸ دسی بل است. چیدمان شماره ۳ که هندسه ای هم مرکز با ۴ لایه هیدروفون است در فرکانس ۱۱۰۰، ۱۵.۹۲ دسی بل شدت صوت را نشان می‌دهد که دقیقاً برابر با بیشترین شدت صوتی است که چیدمان شماره ۴ نشان می‌دهد. طبق نمودار پاسخ‌دهی شدت صوت در شکل (۳) نیز مشخص است که دو چیدمان شماره ۳ و ۴ همپوشانی نسبتاً زیادی نسبت به یکدیگر در فرکانس‌ها مختلف سوناری دارند.



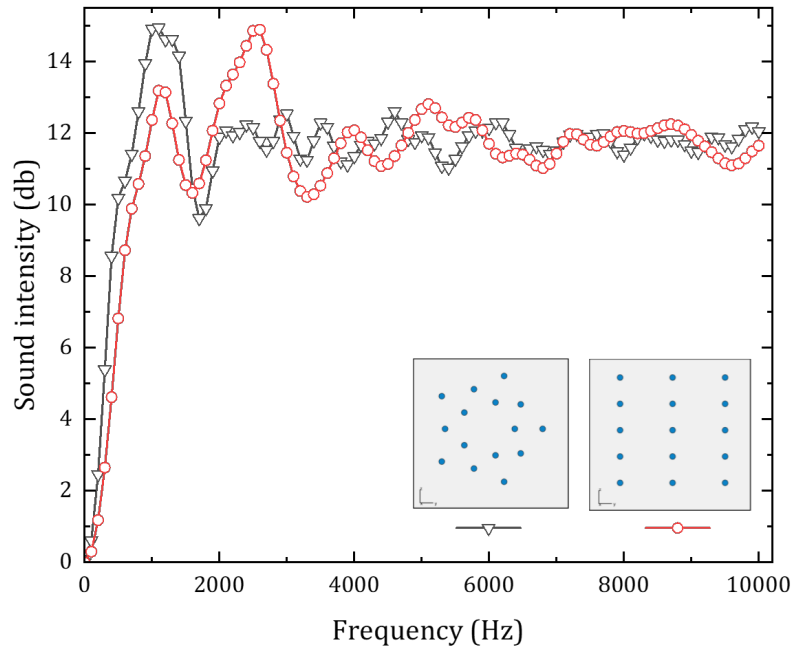
شکل ۳. نمودار شدت صوت بر حسب فرکانس برای ۴ چیدمان شبیه‌سازی شده با ۲۵ عدد هیدروفون

در ادامه شبیه‌سازی‌ها دو چیدمان آرایه هیدروفونی با تعداد هیدروفون کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در سمت چپ شکل (۴) نشان داده شده است چیدمان شماره ۵ دارای ۱۵ هیدروفون و به شکل هم مرکز سه لایه‌ای است که هر لایه دارای ۵ هیدروفون است. در سمت راست شکل (۴) نیز چیدمان مربعی با ۱۵ هیدروفون ایجاد شده است. هدف از این قسمت شبیه‌سازی‌ها تغییرات میزان پاسخ دهی شدت صوت در فرکانس سوناری نسبت به کم کردن تعداد هیدروفون در چیدمان‌ها است.



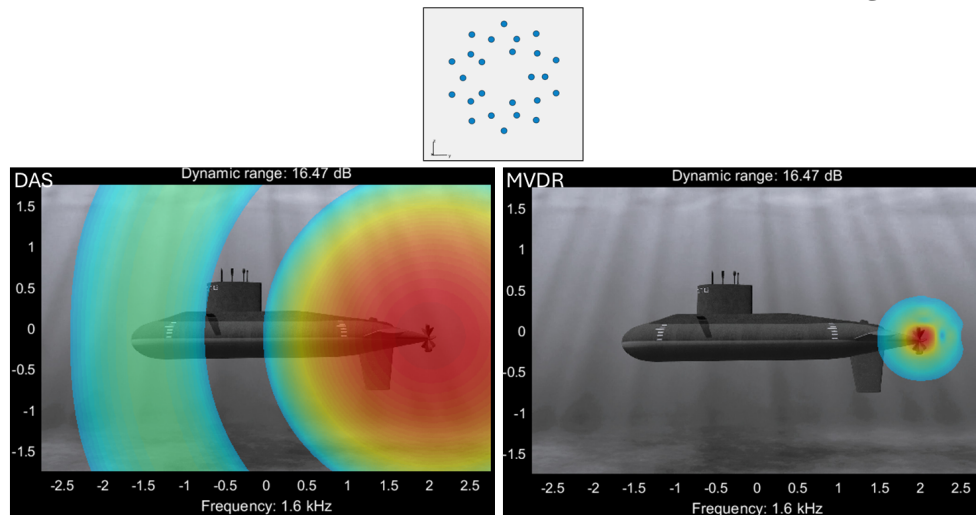
شکل ۴. تصویر چیدمان آرایه هیدروفونی هم مرکز ۱۵ هیدروفونی با سه لایه هیدروفون (سمت چپ) و چیدمان آرایه هیدروفونی مربعی با ۱۵ هیدروفون (سمت راست)

در شکل (۵) نمودارهای شدت صوت بر حسب فرکانس برای دو چیدمان ۵ و ۶ نشان داده شده است که با دقت در این نمودارها مشخص است که از فرکانس ۵۰۰ هرتز تا ۱۵۰۰ هرتز چیدمان هم مرکز در پاسخ دهی شدت صوت نسبت به چیدمان مربعی برتری قابل توجهی دارد. در فرکانس ۱۱۰۰ هرتز چیدمان هم مرکز ۱۴.۹۵ دسی بل و چیدمان مربعی در فرکانس ۲۶۰۰ ، ۱۴.۸۹ دسی بل بیشترین میزان پاسخ شدت صوت را نشان می‌دهند که در شکل (۵) این نکته قابل درک است. به بیانی ساده تر چیدمان هم مرکز شماره ۵ در فرکانس پایین تر شدت صوت تقریباً بالاتری نسبت به چیدمان مربعی شماره ۶ ارائه می‌کند.



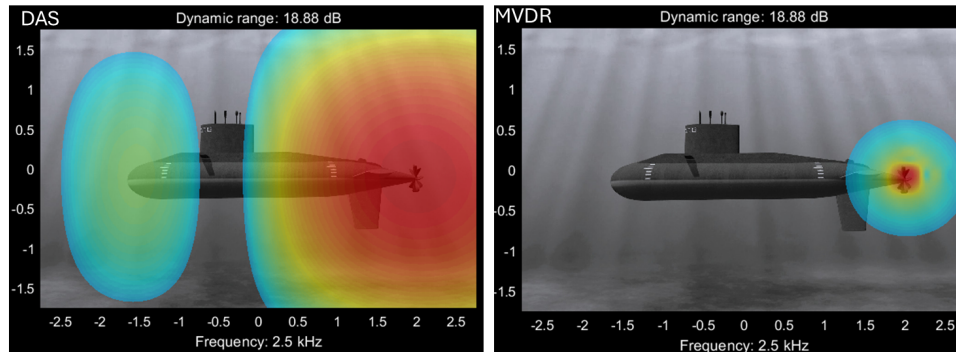
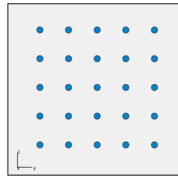
شکل ۵. نمودار شدت صوت بر حسب فرکانس برای ۲ چیدمان شبیه‌سازی شده با ۱۵ عدد هیدروفون

در قسمت بعد برای درک و فهم از نحوه عملکرد چیدمان‌های آرایه هیدروفونی در شناسایی منبع صوت از دو الگوریتم تاخیر و جمع و الگوریتم حداقل واریانس پاسخ بدون اعوجاج استفاده شده است. همانطور که در دو شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود نحوه شناسایی تک منبع صوتی از پیش تعیین شده با استفاده از دو الگوریتم ذکر شده برای دو چیدمان در نقاط قله نمودارهای شدت صوت بر حسب فرکانس نقشه صوتی آن‌ها به تصویر کشیده شده است. به این نکته باید دقت داشت که در شکل‌های (۶) و (۷) محور افقی و عمودی به ترتیب مختصات افقی و عمودی موقعیت منبع صوت را نشان می‌دهند و رنگ نقشه میزان پاسخ پرتودهی الگوریتم در هر نقطه از صفحه را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. شبیه‌سازی نقشه صوتی و شناسایی منبع صوتی از پیش تعیین شده توسط آرایه هیدروفونی هم مرکز سه لایه‌ای با ۲۵ هیدروفون با توجه به تصاویر نقشه صوتی در شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان گفت دو چیدمان موردنظر از قابلیت شناسایی مناسبی برخوردار هستند. الگوریتم تاخیر و جمع محدوده و فضای بزرگی برای منبع صوتی در نظر گرفته است ولی الگوریتم حداقل واریانس پاسخ بدون اعوجاج محدوده بسیار کوچکتری را برای منبع صوتی مشخص نموده است. با توجه به تصاویر نقشه صوتی مشخص می‌شود

دو چیدمان تفاوت زیادی در نحوه شناسایی منبع صوتی با یکدیگر ندارند که برگرفته از یکسان بودن تعداد هیدروفون‌ها در دو چیدمان و برابر بودن فضای اشغالی چیدمان‌ها و فاصله‌ی بین هیدروفون‌ها است.



شکل ۷. شبیه‌سازی نقشه صوتی و شناسایی منبع صوتی از پیش تعیین شده توسط آرایه هیدروفونی مربعی با ۲۵ هیدروفون نتایج شبیه‌سازی با یافته‌های مطالعات معتبر در حوزه پردازش آرایه‌ای و طراحی هندسه‌های هیدروفونی مقایسه شد. رفتار فرکانسی آرایه‌های هم‌مرکز و مربعی و عملکرد الگوریتم‌های DAS و MVDR با الگوهای گزارش شده در این منابع هم‌خوانی دارد. این تطابق نشان می‌دهد که مدل‌سازی هندسی و پیاده‌سازی الگوریتم‌ها از دقت و صحت کافی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل و مقایسه‌ی عملکرد دو ساختار هندسی پرکاربرد آرایه‌های هیدروفونی، یعنی آرایه‌های هم‌مرکز و آرایه‌های مربعی، در حوزه‌ی پردازش سیگنال‌های صوتی زیرآب انجام شد. برای این منظور، دو الگوریتم متداول پردازش پرتوی DAS و MVDR در محیط MATLAB پیاده‌سازی و بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده در گستره‌ای از فرکانس‌ها اعمال گردید. نتایج به‌دست‌آمده امکان بررسی نقاط قوت و ضعف هر ترکیب هندسی-الگوریتمی را فراهم ساخته و می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی سامانه‌های سوناری پیشرفته و کاربردهای پایش زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد.

- تحلیل پاسخ شدت صوت نشان داد که هندسه آرایه نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی سامانه دارد. به‌طور خاص، آرایه‌های هم‌مرکز در محدوده فرکانسی پایین به‌دلیل توزیع متقارن و همگن هیدروفون‌ها، توانستند شدت صوت بالاتر و یکنواخت‌تری ایجاد کنند. در مقابل، در فرکانس‌های بالاتر، آرایه‌های مربعی به‌واسطه‌ی ساختار منظم و فشرده خود، بازدهی بهتری ارائه دادند.
- بررسی همپوشانی پاسخ فرکانسی میان دو ساختار نشان داد که انتخاب هندسه به‌طور مستقیم به شرایط محیطی، نوع مأموریت و الزامات تفکیک منبع صوتی وابسته است. این موضوع بیانگر آن است که هیچ هندسه‌ای به‌صورت مطلق برتری ندارد و باید در بستر کاربردی ارزیابی گردد.
- ارزیابی تأثیر تعداد هیدروفون‌ها حاکی از آن است که کاهش المان‌ها به‌ویژه در آرایه‌های هم‌مرکز، اگرچه منجر به کاهش نسبی سطح پاسخ‌دهی می‌شود، اما همچنان توانایی شناسایی منبع صوتی در سطح قابل قبولی حفظ می‌گردد. این یافته از منظر اقتصادی و عملیاتی در طراحی سامانه‌های سبک و کم‌هزینه اهمیت ویژه دارد.
- مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد که روش DAS به‌دلیل سادگی ریاضیاتی و قابلیت پیاده‌سازی سریع، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای عملیاتی با محدودیت پردازشی است. با این حال، نتایج آشکار ساخت که این الگوریتم در شرایط وجود نویز و تداخل عملکرد مطلوبی ندارد و دقت تفکیک فضایی آن محدود است. در مقابل، الگوریتم MVDR با

بهره‌گیری از اصل حداقل‌سازی واریانس، توانست پرتو اصلی را با دقت بالاتر متمرکز کرده و پهنای پرتو جانبی را به‌طور مؤثری کاهش دهد.

- تحلیل نقشه‌های صوتی حاصل از هر دو الگوریتم نشان داد که MVDR محدود به بازسازی شده از منبع صوتی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و دقت مکانی بسیار بیشتری نسبت به DAS فراهم ساخته است. این ویژگی به‌ویژه در کاربردهایی مانند ردیابی اهداف متحرک، پایش نویز محیطی، و آشکارسازی منابع صوتی ضعیف، اهمیت دارد.
- یافته‌ها به‌طور کلی نشان می‌دهند که ترکیب هندسه هم‌مرکز با الگوریتم MVDR می‌تواند بالاترین سطح دقت و کارایی را در شناسایی و تفکیک منابع صوتی زیرآب ارائه دهد. در مقابل، در مأموریت‌هایی که نیاز به پردازش سریع و پیاده‌سازی ساده دارند، استفاده از آرایه‌های مربعی همراه با DAS می‌تواند گزینه‌ای کارآمد و مقرون‌به‌صرفه باشد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب مناسب هندسه و الگوریتم پردازش پرتو، کلید دستیابی به سامانه‌های سونار با کارایی بالا در شرایط متنوع محیطی است. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه نسل جدیدی از سامانه‌های هیدروفونی هوشمند مطرح شود که ضمن کاهش هزینه‌ها، دقت بالاتری در شناسایی و پایش منابع صوتی زیرآب ارائه دهند. با توجه به موقعیت ژئوپلیتیک و راهبردی خلیج فارس، که یکی از پررفت‌وآمدترین و حساس‌ترین مناطق دریایی جهان به‌شمار می‌رود، نتایج این تحقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌کارگیری سامانه‌های هیدروفونی بهینه در این پهنه آبی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در پایش ترافیک دریایی، حفاظت از منابع انرژی، شناسایی تهدیدات زیرسطحی و مدیریت زیست‌محیطی ایفا کند. توسعه دانش بومی در حوزه طراحی و پیاده‌سازی آرایه‌های هیدروفونی پیشرفته، گامی مؤثر در ارتقاء توانمندی‌های فناورانه کشور بوده و می‌تواند به افزایش امنیت و پایداری در خلیج فارس و آب‌های پیرامونی کمک شایانی نماید.

مراجع

- [1] R.J. Urick, Principles of underwater sound-2, DOI (1975).
- [2] O.C. Rodríguez, Fundamentals of underwater acoustics, Springer2023.
- [3] O. Kazemi Ahouei, A. Hasani Baferani, Hydrophones and Hydrophone Arrays: Definitions and Applications, Journal of Vibration and Sound, 14 (2025) 126-150.
- [4] D.H. Johnson, D.E. Dudgeon, Array processing: Concepts and techniques, NJ, Englewood Cliffs: PrenticeHall, DOI (1993).
- [5] H.L. Van Trees, Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory, John Wiley & Sons2002.
- [6] M. Reza, M. Hossain, M. Hossein, M. Rashid, Robust uniform concentric circular array beamforming in the existence of look direction disparity, 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE), IEEE, 2016, pp. 1-4.
- [7] D. Desai, N. Mehendale, A review on sound source localization systems, Archives of computational methods in engineering, 29 (2022) 4631-4642.
- [8] A.D. Aref, M.J. Jannati, V.T. Vakili, Design and simulation of a secure and robust underwater acoustic communication system in the Persian Gulf, Communications and Network, 3 (2011) 99-112.
- [9] J. Capon, High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proceedings of the IEEE, 57 (2005) 1408-1418.
- [10] V. Bountourakis, Spatial audio signal processing for passive sonar applications, DOI (2024).

- [11] L. Jiao, X. Yang, T. Quan, J. Wang, High-precision DOA estimation for underwater acoustic signals based on sparsity adaptation, *Frontiers in Marine Science*, 9 (2022) 1022494.
- [12] A.D. Brown, *Electronically scanned arrays MATLAB® modeling and simulation*, Crc Press 2017.
- [13] J. Grythe, A. Norsonic, *Beamforming algorithms-beamformers*, Technical Note, Norsonic AS, Norway, DOI (2015).
- [14] J. Grythe, A. Norsonic, *Acoustic camera and beampattern*, Technical Note Norsonic, Oslo, Norway, DOI (2015).