

بررسی ساختاری و عملکردی الکتروآکوستیکی آرایه های یدک شونده با المان های سه گانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

کد مقاله: ۵۵۰۲۱

رضا مردانی^{۱*}، محمدرضا کازرانی وحدانی^۲،
کامران هژبری فرد^۳

چکیده

سونار آرایه ای یدک شونده، به یک سیستم مبدلی نصب شده، روی یک کابل در پشت یک زیردریایی یا کشتی سطحی، گفته می شود. این آرایه ها مزایایی نسبت به سونارهای دارای دام و نصب شده روی کشتی یا زیردریایی داشته که عبارتند از: فرکانس پایین تر، برد تشخیص بیشتر و کاهش تأثیرات سر و صدای وسیله حامل. امروزه بر روی مواد و شکل های مختلف پیزوسرامیک ها، شیلنگ حامل، مایع پرکننده تطبیق و دیگر موارد، جهت افزایش کارایی سونارها تحقیق می شود. یکی از این موارد پیزوسرامیک های چند حالته بوده که پوشش فلزی داخلی آنها به دو، چهار، شش و غیره، قسمت مساوی تقسیم شده ولی پوشش خارجی پیوسته است. در این پایان نامه، هدف اصلی بررسی تأثیر پیزوسرامیک چند حالته در مقایسه با پیزوسرامیک ساده استوانه ای در هیدروفون سونار یدک شونده می باشد. برای این بررسی، یک نمونه پیزوسرامیک استوانه ای در فرکانس شعاعی 15 kHz طراحی و در دو نوع معمولی و چند حالته ساخته می شود. پس از آن محفظه مناسبی جهت آب بندی و روغن بندی آن طراحی و ساخته خواهد شد. به منظور ثابت بودن شرایط، در ابتدا پیزوسرامیک ساده مونتاژ و اندازه گیری های آکوستیکی و الکترونیکی انجام شده و پس از آن نمونه چند حالته نصب و همان اندازه گیری ها تکرار خواهد شد. همچنین مقایسه کاملی بین پیزوسرامیک استوانه ای ساده و چند حالته انجام و ویژگی های چند حالته بررسی خواهد شد. در نهایت یک آرایه یدک شونده ۱۵ حساسه ای با جزئیات کامل طراحی خواهد شد.

واژگان کلیدی: آرایه های یدک شونده، هیدروفون ها، طریقه ساخت هیدروفون آرایه یدک شونده.

- ۱- دانشیار فیزیک مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران
mardani_r@mut.ac.ir
- ۲- دانشیار فیزیک مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران
Kazerani@mut.ac.ir
- ۳- کارشناس ارشد رشته مهندسی برق گرایش الکتروآکوستیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران
kamran.hozhabri.72.6120@gmail.com

۱- مقدمه

سونارهای آرایه‌ای یک‌شونده یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در حوزه‌های نظامی، دریانوردی، و اکتشافات زیرسطحی هستند. این سامانه‌ها به‌ویژه در نیروی دریایی کشورهای پیشرفته، به‌عنوان ابزار اصلی در شناسایی، ردیابی، و طبقه‌بندی اهداف زیرسطحی مانند زیردریایی‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. سونارهای آرایه‌ای یک‌شونده (Towed Array Sonars) به‌واسطه کشیده‌شدن از پشت شناور، فاصله قابل توجهی از منابع نویز و لرزش‌های مکانیکی خود شناور می‌گیرند، که این ویژگی باعث بهبود نسبت سیگنال به نویز در داده‌های دریافتی می‌گردد. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری در ابعاد و امکان استفاده در عمق‌ها و فرکانس‌های مختلف، از مزایای بارز این سیستم‌ها به‌شمار می‌رود. کاربرد سونارهای یک‌شونده به دو صورت فعال و غیرفعال صورت می‌گیرد. در حالت فعال، سیگنال صوتی از سوی سونار به محیط زیرآب ارسال شده و بازتاب آن از اهداف دریافت می‌شود. اما در حالت غیرفعال، تنها سیگنال‌های صوتی تولید شده توسط اهداف (مانند صدای موتور زیردریایی‌ها) دریافت و تحلیل می‌شوند. به دلیل این تنوع عملکرد، سونارهای یک‌شونده توان عملیاتی بالایی را برای کاربران فراهم می‌کنند (Urick, 1983). آرایه‌های یک‌شونده معمولاً از مجموعه‌ای از حساسه‌ها (المان‌های گیرنده)، بردهای الکترونیکی، کابل‌های توان و داده و پوشش‌های لاستیکی ساخته می‌شوند که بر روی یک کابل بکسل مرکزی سوار شده‌اند. این ساختار به حفظ استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری در هنگام جمع‌شدن یا کشیده‌شدن آرایه کمک می‌کند. شیلنگ‌های پوششی حاوی روغن‌های خاصی همچون پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌اورتان (PU) هستند که هم خاصیت عایقی دارند و هم از تغییر شکل مکانیکی جلوگیری می‌کنند. ایده اولیه استفاده از سونارهای یک‌شونده به جنگ جهانی اول و سال ۱۹۱۷ بازمی‌گردد که توسط دکتر اچ. سی. هایس مطرح شد. (Burdic, 2002) از آن زمان تاکنون تلاش‌های بسیاری برای افزایش کارایی، بهبود برد، و افزایش دقت این سامانه‌ها صورت گرفته است. یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک چندحالتی یا چندمدی (Multimode Piezoelectric Transducers) است. این مبدل‌ها با بهره‌گیری از الکترودهی چندبخشی، قادر به تولید و دریافت امواج صوتی در مدهای مختلف هستند و این ویژگی باعث افزایش انعطاف‌پذیری الگوهای پرتو و دقت بالا در تعیین موقعیت اهداف می‌شود. تحقیقات متعددی از دهه ۹۰ میلادی تاکنون به بررسی این نوع از سرامیک‌های پیزوالکتریک پرداخته‌اند. در سال ۱۹۹۷، باتلر و کاونا فمفاهی دربارۀ انتقال الگوی پرتو در سرامیک‌های چندمدی ارائه دادند. در ادامه، پژوهش‌هایی نظیر کارهای هینگ لیونگ در سال ۲۰۰۲ و کو سانگ هاوان در سال ۲۰۰۴ نیز به توسعه این فناوری کمک کردند. این تحقیقات نشان دادند که با استفاده از تقسیم الکترودها به چند بخش، می‌توان تحریک هدفمندی در مدهای مختلف ایجاد کرد و به خواص اکوستیکی بسیار بهتری در مقایسه با طراحی‌های کلاسیک دست یافت. (Balanis, 2005) پیشرفت‌های اخیر در حوزه مبدل‌های چندحالتی نه‌تنها در سونارهای نظامی، بلکه در ارتباطات صوتی زیرآبی و ساخت هیدروفون‌های دقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طراحی هیدروفون‌های استوانه‌ای با الگوهای دل‌وار یا جهت‌دار، نمونه‌ای از این کاربردهای نوین است. این نوع طراحی‌ها، قابلیت دریافت سیگنال در یک جهت خاص را بهینه کرده و در عین حال حساسیت بالا در بازه وسیعی از فرکانس‌ها را تضمین می‌کنند (WS, Burdic, 2002). هدف اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل رفتار مبدل‌های چندحالتی پیزوالکتریک در قالب یک آرایه خطی یک‌شونده استوانه‌ای است. تمرکز ویژه بر طراحی، مدل‌سازی و آزمایش یک نمونه واقعی از هیدروفون چندحالتی استوانه‌ای قرار دارد که بتواند به‌صورت دقیق، امواج آکوستیکی زیرآب را دریافت کرده و تحلیل کند. این تحقیق از جنبه‌های تئوری، عددی، و تجربی به موضوع پرداخته و نتایج آن می‌تواند در بهینه‌سازی آرایه‌های سوناری یک‌شونده و افزایش دقت عملکرد در شرایط واقعی زیرآب مؤثر باشد. در نهایت، امید است که یافته‌های این پژوهش بتواند گامی مؤثر در توسعه سامانه‌های دریایی پیشرفته، به‌ویژه در حوزه پایش و حفاظت مرزهای دریایی، ارتباطات زیرسطحی، و سامانه‌های خودران زیردریایی بردارند (RJ, 1983).

۲- تعریف مفاهیم پایه

۲-۱- سونارهای آرایه‌ای یک‌شونده

سونارهای آرایه‌ای یک‌شونده یکی از انواع با اهمیت سونار بوده که به دو صورت فعال و غیرفعال استفاده می‌شوند. این نوع سونار به دلیل یک‌شدن آرایه مبدل آن و فاصله‌ای که از شناور می‌گیرد از نویز شناور دور بوده و بدلیل کشیده شدن راحت و عدم محدودیت ابعاد می‌توان در فرکانس‌ها و عمق‌های مختلف از آن استفاده نمود. آرایه‌های یک‌شونده دهه‌ها سال است که در نیروی دریایی کشورهای مختلف استفاده می‌شود و یک تجهیز اصلی توانمند در تشخیص، ردیابی و طبقه بندی کشتی‌ها و شناورهای زیرسطحی می‌باشد. (Nuttall & Cray, 2001) این آرایه‌ها مزیت‌هایی نسبت به سونارهای دارای دام و نصب شده روی کشتی یا زیردریایی داشته که عبارتند از: فرکانس پایین‌تر، برد تشخیص بیشتر و کاهش تأثیرات سر و صدای وسیله حامل. شیلنگ آرایه-

های یکدشونده پر از روغن‌های پلی وینیل کلراید (PVC)^۱ و پلی اورتان (PU)^۲ هستند، که می‌توانند از طول ۶۰۰ متر و قطر بین ۳۰ تا ۹۰ میلی متر استفاده شوند. کلیه حساسه‌ها، بردهای الکترونیکی لازم، کابل انتقال توان و داده، شیلنگ پوشش روی یک سیم‌بکسل مرکزی نصب شده که استحکام مکانیکی در کشیده شدن آرایه و جمع شدن آن را تضمین می‌کند. در جنگ جهانی اول، سال ۱۹۱۷، ایده استفاده از سونارهای یکدشونده توسط دکتر اچ.سی.هایس، مطرح شد. (Acoustical Society of America, 2012) تلاش‌های بسیاری در خصوص افزایش برد و بازده سونارهای آرایه‌ای یکدشونده انجام شده و در حال انجام است. یکی از کارهایی که چندسالی است در خصوص آن تحقیقاتی انجام شده استفاده از پیزوسرامیک‌های چند مد یا چند حالت است. این نوع پیزوسرامیک‌ها دارای کوتینگ چند قسمتی هستند. در سال ۱۹۹۷ باتلر و کاوناگ اطلاعاتی در خصوص چگونگی انتقال بیم پترن در سرامیک‌های چند مد ارائه دادن هینگ لیونگ در سال ۲۰۰۲ یک رینگ پیزوالکتریک را برای دو حالت الکترو دو و سه قسمتی مورد بررسی قرار داد. (Burdic, 2002) در این تحقیق نشان داده شد که ویژگی‌های پیزوسرامیک در مدهای بالاتر بهبود می‌یابد. در سال ۲۰۰۴ باتلر و رایس توصیفی در خصوص چگونگی استفاده از استوانه چند مد جهت انتقال بیم پترن ارائه دادند آنها در خصوص نحوه اعمال پتانسیل الکتریکی به پیزوسرامیک چند مدی جهت تحریک تک قطبی و دوقطبی تحقیقاتی انجام داده‌اند و در نهایت باتلر در سال ۲۰۰۴ در آمریکا یک اختراع ثبت نمود (McConnell et al: 2006) در این اختراع یک استوانه با کوتینگ داخلی هشت قسمت را ساخته و بررسی نمودند. در تحقیقات مربوط به این اختراع، سه مد اول مورد اندازه‌گیری و تست قرار گرفت. که فرکانس تشدید هر مد به طور مستقل اندازه‌گیری شد. همچنین این نوع پیزوسرامیک را می‌توان برای اندازه‌گیری فشار و گرادیان فشار استفاده نمود. در سال ۲۰۰۰ در کنفرانس اقیانوسی گزارشی در خصوص استفاده از مبدل‌های جهت دار جهت بهبود عملکرد مودم‌های صوتی زیر آب ارائه گردید. (Pyo et al : 2021) در این گزارش با ترکیب کنترل‌شده سه حالت اصلی ارتعاشی یک استوانه پیزوالکتریک، به جهت دلخواه دست یافته‌اند. در سال ۲۰۲۱ سانتون پوی، یک ترانسیدوسر تانپیلز باند پهن با استفاده از سرامیک‌های ناهمگن و چند حالت را شبیه‌سازی نموده و یک نمونه عملی را ارائه داده‌اند (Sineiro & Hofler, 2003) در سال ۱۹۷۴، کو سانگ هاوان و بقیه، یک هیدروفون چند مد کروی که با استفاده از جداسازی الکترودهی داخلی و خارجی سرامیک ساخته شده بود گزارش دادند (Sherman & Butler, 2007) آنها نمونه با کوتینگ معمولی را با مدل کروی و نمونه کوتینگ جدا را با مدل استوانه‌ای بررسی نمودند و به نتایج زیر رسیدند:

الف) فرکانس تشدید حالت همه جهته مدل کروی در مقایسه با مدل استوانه‌ای برای همان قطر متوسط به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است.

ب) مدل کره دارای حالت یکسانی را در تحریک دوقطبی می‌دهد در حالی که مدل استوانه دارای الگوهای حالت دوقطبی مختلف است. سینیرو و دیگران در سال ۲۰۰۳ به بررسی مبدل‌های جهتی چند حالتی برای شبکه‌های بی‌سیم زیر آب پرداختند. (Butler & Butler, 2004) در این گزارش هم تحلیل و شبیه‌سازی انجام داده و هم نمونه‌هایی را ساخته و تست نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از پیزوسرامیک‌های چند حالتی باعث افزایش برد و بهبود دریافت سیگنال می‌شود. دوایل ایان در سال ۲۰۲۱ در تر کارشناسی ارشد خود، به بررسی سرامیک کریستالی چند حالتی پرداخته است. (Li et al: 2004) در این تحقیق با استفاده از سیستم فروالکتریک تک کریستالی به طراحی مبدل با ساختار بسیار ناهمسانگرد پرداخته است. علاوه بر ناهمسانگردی تک کریستال، از چند حالتی شدن پیزوسرامیک‌ها به صورت تک قطبی، دوقطبی و چهار قطبی استفاده و عملکرد ترانسیدوسرها را افزایش داده است.

۳- روش پژوهش

در این پژوهش، به بررسی و تحلیل فناوری مبدل چندحالتی، به‌ویژه در کاربرد آن در طراحی و بهینه‌سازی هیدروفون‌های استوانه‌ای جهت‌دار پرداخته شده است. روش پژوهش مبتنی بر تحلیل نظری، مدل‌سازی ریاضی، استفاده از روابط فیزیکی مربوط به ارتعاشات مکانیکی در مواد پیزوالکتریک، و همچنین بررسی ساختار الکترونی چندبخشی بر روی مواد پیزوسرامیکی بوده است. در مرحله اول، با تحلیل ریاضی سه نوع الگوی پرتو ارتعاشی (همه‌جهته، دو قطبی و دل‌وار)، معادلات مربوطه استخراج گردید تا تأثیر ترکیب آن‌ها در تولید الگوهای دل‌وار بررسی شود. این تحلیل نظری با استفاده از روابط هندسی میدان صوتی دو بعدی و سه بعدی حاصل از ترکیب حالات ارتعاش مختلف را توصیف می‌کند این مدل‌ها در ادامه برای تعیین شاخص‌های جهت‌گیری و عرض پرتو به کار رفتند. در مرحله دوم، مشخصات فیزیکی یک مبدل استوانه‌ای واقعی از جنس تیتانات زیرکونات سرب (PZT) با ساختار چهار ربعی مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های ماده، شامل ضرایب کوپلینگ، فرکانس‌های تشدید و ثابت‌های پیزوالکتریک، از طریق داده‌های تجربی استخراج شده و در جدول ۳-۲ آورده شده‌اند. این مشخصات در تحلیل نحوه ارتعاش

1 Polyvinyl chloride (Pvc)

2 Polyurethane (Pu)

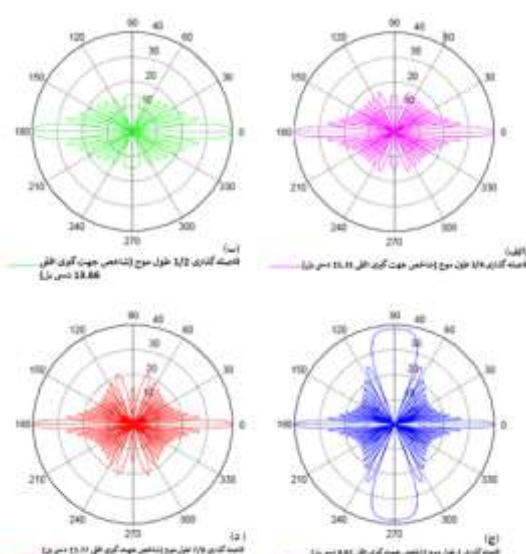
استوانه در حالت‌های مختلف و تعیین فرکانس‌های تشدید $n=0$ و $n=1$ با استفاده از معادلات (۳-۵) و (۳-۶) استفاده شده است. در ادامه، برای تحلیل تأثیر تقسیم الکتروود داخلی استوانه به چهار یا چند بخش، به یافته‌های پژوهش‌های پیشین مانند مطالعه تحلیل اجزاء محدود بر روی مبدل حلقه‌ای پیزوالکتریک استاندارد شده است. (Sherman & Butler, 2007) این تقسیم الکتروود منجر به تحریک قوی‌تر حالت‌های بالاتر ارتعاشی و ایجاد پاسخ‌های متفاوت نسبت به فشار و گرادیان فشار شده است. پردازش سیگنال‌های چندحالتی مطرح شده است. ولتاژهای مختلط خروجی از هر الکتروود به صورت برداری ترکیب شده تا الگوهای دریافت دل‌وار شبیه‌سازی شود. برای ترکیب ولتاژها به منظور تولید ولتاژ مختلط دل‌وار تعریف و با شرایط مرزی خاص منجر به استخراج مقدار R شد. در بخش نهایی، الگوهای پرتو سه‌بعدی و شاخص‌های جهت‌گیری مربوط به یک استوانه دل‌وار و همچنین آرایه‌ای از ۱۵ استوانه محاسبه شده است. (Balanis, 2005)

۴- بحث و یافته‌ها

مهمترین موضوع در طراحی یک آرایه تعداد المان‌های بکار رفته در آن می‌باشد. در نمونه طراحی شده در این پایان نامه آرایه دربردارنده ۱۵ المان استوانه‌ای شکل می‌باشد. برای سرهم کردن استوانه‌های پیزوسرامیکی به صورت یک آرایه خطی، نیاز به یک سازه محکم با کمترین مزاحمت در برابر دریافت سیگنال‌های آکوستیکی است. با توجه به بررسی‌های انجام شده و ابعاد پیزوسرامیک‌ها، یک قاب استوانه‌ای با شش میله فولاد ضد زنگ به طول ۱۳۰ cm و قطر ۹ cm و دو درپوش برنزی در قسمت بالا و پایین به صورت موازی مناسب می‌باشد. فضای داخلی ایجاد شده توسط چیدمان میله‌ها درست به اندازه کافی برای قرارگیری مبدل‌های استوانه‌ای بزرگ است. (Burdic, 2002) یکی از پارامترهای مهم در طراحی آرایه خطی فاصله مرکز تا مرکز پیزوسرامیک‌ها است. با توجه به پارامترهای جدول ۲ برای محاسبه الگوی پرتو افقی و شاخص جهت‌گیری برای یک آرایه خطی از پانزده استوانه با فاصله مرکز تا مرکز d ، نتایج محاسبات برای حالت‌های $1/2*\lambda$ ، $3/4*\lambda$ ، $7/8*\lambda$ و $d=1*\lambda$ در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج محاسبات دیده می‌شود که حالت $d=7/8*\lambda$ دارای بیشترین شاخص جهت‌گیری افقی، $15/8\text{dB}$ می‌باشد. بنابراین فاصله مرکز تا مرکز سرامیک‌های استوانه‌ای در آرایه همین عدد در نظر گرفته شد. (Butler et al, 1997)

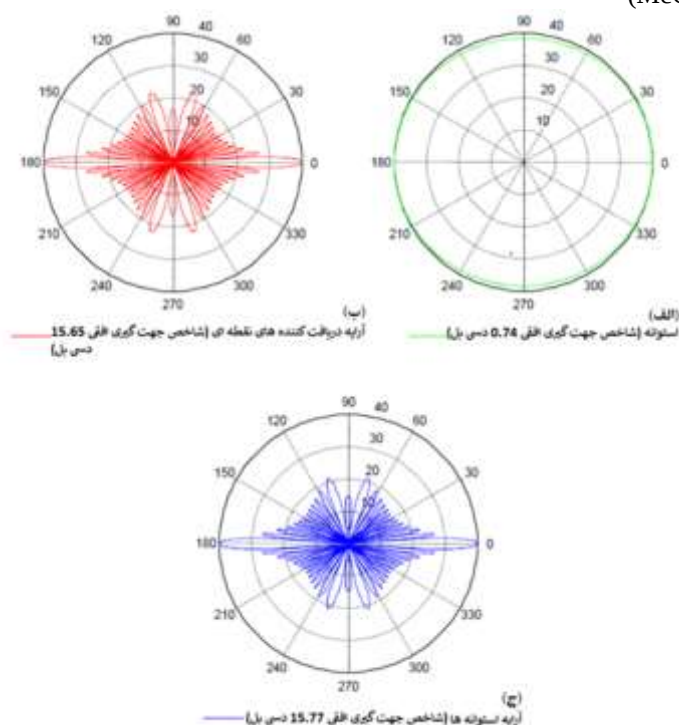
جدول ۱- پارامترهای آرایه معین

پارامتر	توضیح	مقدار
f	فرکانس تشدید	15 kHz
c	سرعت صوت	1500 m/s
λ	طول موج c/f	9.5 cm
n	تعداد استوانه‌ها	15
L	طول استوانه	2.25cm



شکل ۱ الگوهای پرتو افقی نظری برای فواصل مختلف مرکز تا مرکز استوانه‌ها (Sigalas, Economou, 1992).

بر اساس قضیه حاصلضرب، الگوی پرتو برای آرایه‌ای خطی از استوانه‌ها برابر است با الگوی پرتو یک آرایه خطی با المان‌های نقطه‌ای در الگوی پرتو یک استوانه. الگوی پرتو برای آرایه‌ای از استوانه‌های تقریباً همه‌جهته و یک آرایه خطی از المان‌های نقطه‌ای تقریباً برابر است. این نکته را می‌توان ۲ برای آرایه‌ای خطی با فاصله گذاری $d=7/8*\lambda$ بین المان‌ها دید. (McConnell et al: 2006)



شکل ۲- الگوهای پرتو برای آرایه‌ای خطی از ۱۵ المان نقطه‌ای، المان استوانه‌ای و آرایه خطی ۱۵ تایی استوانه‌ها ($d=7/8*\lambda$). (Kushwaha, 1996)

۴-۱ طراحی آرایه نهایی

برای آنکه آرایه خطی با المان‌های استوانه بتواند به خوبی امواج آکوستیکی را به داخل آب منتقل کند یا بایستی محفظه آرایه از روغن پر شود یا پوشش لاستیکی در تماس مستقیم با پیروسرامیک‌ها باشد در طراحی نمونه تک و دو المانی از چسباندن مستقیم لاستیک و در بقیه قسمت‌ها از طراحی استاندارد آرایه خطی استفاده شده است. (Pyo et al : 2021)



شکل ۴ استوانه پیروسرامیک دو تایی و نحوه قرارگیری آن. (عکس گرفته شده توسط نویسندگان تحقیق)

شکل ۳ استوانه پیروسرامیک تکی و نحوه قرارگیری آن.

طرح نهایی آرایه هیدروفون خطی چند حالتی نشان داده شده است. با توجه به مشکلات تهیه پیروسرامیک‌ها در این قسمت یک آرایه ۱۵ المانی طراحی می‌شود که قابلیت ساخت را داشته ولی بدلیل مشکلات بودجه‌ای ساخته نشد. در جدول ۲ ابعاد قسمت‌های مختلف آرایه نشان داده شده است. (Sherman & Butler, 2007)

جدول ۲ ابعاد قسمت‌های مختلف آرایه

پارامترها	اندازه (میلی‌متر)
طول آرایه	۱۴۰۰
قطر آرایه	۱۰۳
طول میله استیل	۱۳۰۰
قطر میله استیل	۳
طول سرپوش برنجی	۲۰
قطر سرپوش برنجی	۹۳
قطر داخلی استوانه	۹۳
قطر خارجی استوانه	۱۰۳
قطر داخلی رینگ لاستیکی	۸۱
قطر خارجی رینگ لاستیکی	۹۳
فاصله گذاری استوانه مرکز به مرکز	۸۳
قطر داخلی لوله لاستیکی	۹۳
قطر خارجی لوله لاستیکی	۱۰۳

۴-۲- ساخت یک المان هیدروفون

همانگونه که قبلاً ذکر شد، یک نمونه هیدروفون تک استوانه ای ساخته شد. ۳ مواد مورد استفاده برای ساخت هیدروفون تک استوانه ای را فهرست کرده است. (Burdic, 2002)

جدول ۳- فهرست مواد مورد استفاده در هیدروفون

کمیت	توضیح
۱	استوانه چهار ربعی با مشخصات زیر STEMiNC (modified PZT-4) striped 4 quadrant cylinder, 15 kHz, radially poled, 81mm OD x 66 mm ID x 22.5 mm length, part number SMC2622T13111SP
۱	رابط ۵ پین
۱۵/۸"	میله پلاستیکی دلرین با قطر ۱۳/۴ اینچ شیلد حرارتی پلاستیکی لحیم روغن لحیم کاری ترکیب پاتینگ پلی اورتان

نمونه هیدروفون تک استوانه ای به صورت زیر ساخته شد. یک شاسی آلومینیومی با ابعاد و شکل مناسب به گونه ای طراحی و ساخته شد که بتوان هم یک و هم دو پیزوسرامیک را بر روی آن مونتاژ نمود. قطعات تفلونی، چوب پنبه مصنوعی و رابط ۵ پین به صورت مناسبی روی شاسی نصب شده است. دیافراگم لاستیکی به ضخامت دو میلی متر با چسب مخصوص بر روی قطعات چسبانده شده است. چهار سیم سیگنال به چهار الکتروود داخلی استوانه پیزوالکتریک لحیم شد. سیم زمین به خارج استوانه لحیم شد. (Sherman & Butler, 2007)

۴-۳- تست نمونه هیدروفون تک المانی

در مهرماه ۱۴۰۱، هیدروفون تک استوانه ای در استخر آزمایشگاه مرجع هیدروفیزیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز و حوضچه تست صنایع الکترونیک شیراز تست شد. در این تست حساسیت گیرندگی و راستاوری هیدروفون چندحالتی تک استوانه ای اندازه گیری شد. در حال حاضر دو مجموعه اندازه‌گیری آکوستیکی در صنایع الکترونیک شیراز و دانشگاه صنعتی مالک اشتر وجود دارد. ابعاد حوضچه دانشگاه ۱۱ متر عمق، ۱۱ متر عرض و ۴۰ متر طول بوده و ابعاد حوضچه صنایع الکترونیک ۳ متر عمق، ۳ متر عرض و ۳ متر طول بوده که هر دو روباز هستند. اندازه‌گیری حساسیت با استفاده از هیدروفون استاندارد B&K مدل ۸۱۰۴ انجام شده است. این روش معروف به روش مقایسه‌ای در کالیبراسیون بوده و به صورت زیر انجام می‌شود. یک هیدروفون استاندارد B&K در فاصله یک متری پروژکتور تحت تست قرار می‌گیرد. پس از آن توسط پروژکتور سیگنال‌هایی از فرکانس ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز ارسال و توسط هیدروفون دریافت می‌گردد. ولتاژ ورودی به پروژکتور و دریافتی از هیدروفون با استفاده از دو کانال اسیلوسکوپ اندازه‌گیری و در هر فرکانسی یادداشت می‌شود. (Sineiro & Hofler, 2003) پس از آن با استفاده از نمودار حساسیت گیرندگی هیدروفون و رابطه‌های ریاضی مربوط به حساسیت فرستندگی و گیرندگی، ترانسدوسر کالیبره می‌شود. نتایج اندازه‌گیری در جدول ۴ نشان داده شده است.

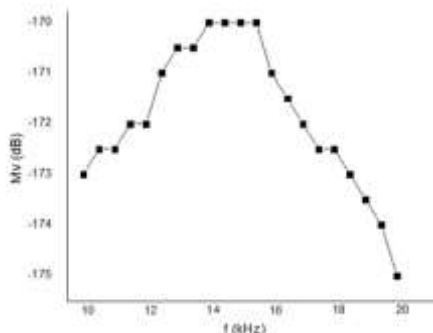
جدول ۴- حساسیت فرستندگی و گیرندگی

f(kHz)	Sv(dB)	Mv(dB)
۱۰	۱۴۰	-۱۷۳
۱۰/۵	۱۴۰	-۱۷۲/۵
۱۱	۱۴۰/۵	-۱۷۲/۵
۱۱/۵	۱۴۰/۵	-۱۷۲
۱۲	۱۴۰/۷	-۱۷۲
۱۲/۵	۱۴۰/۷	-۱۷۱
۱۳	۱۴۱	-۱۷۰/۵
۱۳/۵	۱۴۱	-۱۷۰/۵
۱۴	۱۴۱/۲	-۱۷۰
۱۴/۵	۱۴۱/۳	-۱۷۰
۱۵	۱۴۲	-۱۷۰
۱۵/۵	۱۴۱/۵	-۱۷۰
۱۶	۱۴۱/۵	-۱۷۱
۱۶/۵	۱۴۱/۵	-۱۷۱/۵
۱۷	۱۴۱/۵	-۱۷۲
۱۷/۵	۱۴۱	-۱۷۲/۵
۱۸	۱۴۱	-۱۷۲/۵
۱۸/۵	۱۴۰	-۱۷۳
۱۹	۱۳۹/۵	-۱۷۳/۵
۱۹/۵	۱۳۹	-۱۷۴
۲۰	۱۳۸	-۱۷۵

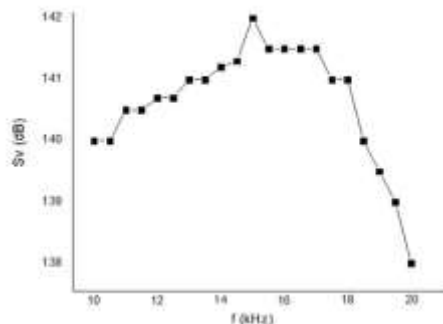
در حالی که هیدروفون بی حرکت بود، سنجش های حساسیت ولتاژ میدان آزاد در بازه فرکانس های ارسالی از ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز صورت گرفت. سپس هیدروفون چرخانده شد و سنجش های حساسیت ولتاژ میدان آزاد در هر تکیه گاه برای فرکانس فعال ۱۵ کیلوهرتز انجام شد. سنجش های حساسیت ولتاژ میدان آزاد برای هر ربع از ۴ هیدروفون انجام شد. سپس سنجش های جهت گیری انجام شد. در هر زاویه چرخش، داده ولتاژ سری زمانی برای هر چهار ربع ثبت شد. برای هر زاویه چرخش، مجموعه تست شدت ولتاژ و فاز از داده های ولتاژ سری زمانی را با استفاده از تبدیل فوریه محاسبه کرد. برای دومین مجموعه تست ها، هیدروفون به صورت افقی بر میله سوار شد. با استفاده از گردان، هیدروفون حول مرکز آکوستیک خود چرخانده شد. همان سنجش های جهت قبلی انجام شد. این سنجش ها در این پایان نامه با عنوان سنجش های افقی هیدروفون مورد اشاره قرار می گیرند.

۴-۴- پردازش نتایج تست هیدروفون

شدت های حساسیت ولتاژ میدان آزاد برای هر هیدروفون برای دامنه ای از فرکانس ها توسط مجموعه تست فراهم شد. شکل ۳۳ نموداری از شدت های حساسیت ولتاژ میدان آزاد برای هر یک از ربع ها برای فرکانس هایی از ۱۰ کیلوهرتز تا ۳۰ کیلوهرتز را نشان می دهد. نمودارهای حساسیت ولتاژ میدان آزاد معمولاً در فرکانس تشدید (رزونانس) به اوج می رسند. برای این استوانه، فرکانس تشدید ۱۵ کیلوهرتز است (Burdic, 2002).



شکل ۶- نمودار حساسیت گیرندگی ترانسیدوسر
(Joannopoulos, Johnson, Winn, Meade, 2008).



شکل ۵- نمودار حساسیت فرستندگی ترانسیدوسر

۴-۵- قطعات لازم جهت ساخت آرایه ۱۵ المانی

در ادامه، قطعات لازم جهت ساخت آرایه هیدروفون خطی ۱۵ المانی ارائه خواهد شد. جدول ۵ فهرست تجهیزات بکار رفته را نشان می دهد.

جدول ۵- فهرست تجهیزات لازم جهت آرایه خطی ۱۵ المانی

ابعاد (mm)	قطعات
۱۴۰۰	طول آرایه
۱۰۳	قطر آرایه
۱۳۰۰	طول میله استیل
۳	قطر میله استیل
۲۰	طول سرپوش برنجی
۹۳	قطر سرپوش برنجی
۹۳	قطر داخلی استوانه
۱۰۳	قطر خارجی استوانه
۸۱	قطر داخلی رینگ لاستیکی
۹۳	قطر خارجی رینگ لاستیکی
۸۳	فاصله گذاری استوانه مرکز به مرکز
۹۳	قطر داخلی لوله لاستیکی
۱۰۳	قطر خارجی لوله لاستیکی

جدول ۶- شاخص های جهت گیری و عرض های پرتو هیدروفون نظری در برابر حقیقی

حقیقی	نظری		شاخص های جهت گیری و عرض های پرتو	
حقیقی	شاخص جهت گیری دو بعدی	عرض پرتو	شاخص جهت گیری دو بعدی	عرض پرتو
---	۰/۰ دسی بل	---	۲/۱ دسی بل	---
۶۲/۰ درجه	۳/۰ دسی بل	۹۰/۰ درجه	۴/۷ دسی بل	۶۲/۰ درجه
دل وار	۳/۴ دسی بل	۱۳۱/۸ درجه	۶/۱ دسی بل	۷۵/۶ درجه

۵- نتیجه گیری

سونارهای یکدشونده به عنوان یکی از پیشرفته ترین تجهیزات آکوستیکی مورد استفاده در صنایع دریایی و دفاعی، قابلیت های چشمگیری در شناسایی، ردیابی و طبقه بندی اهداف سطحی و زیرسطحی دارند. یکی از مزایای کلیدی این نوع سونارها، جداسازی مکانیکی آن ها از نویزهای ناخواسته ناشی از شناور حامل است، که این امر به طور چشمگیری کارایی سیستم را در شناسایی اهداف بهبود می بخشد. با وجود پیشرفت های فناوری، هنوز هم آرایه های یکدشونده به دلیل انعطاف پذیری در ابعاد، سازگاری با محیط های مختلف زیر آب، و امکان استفاده از عناصر حسگر متعدد، مورد توجه ویژه قرار دارند. استفاده از مواد خاص مانند روغن های PU و PVC در شیلنگ های پوششی، و استقرار تجهیزات الکترونیکی بر روی یک کابل مرکزی مستحکم، اطمینان از

استقامت مکانیکی آرایه در شرایط دریایی را تضمین می‌کند. ویژگی‌هایی چون فرکانس کاری پایین، برد بلند، و توانایی کاهش اثر نویز، این سامانه‌ها را به تجهیزات راهبردی در سیستم‌های سونار تبدیل نموده‌اند. یکی از محورهای مهم این تحقیق، بررسی فناوری پیزوسرامیک‌های چندحالتی برای استفاده در هیدروفون‌های استوانه‌ای جهت‌دار بوده است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که طراحی الکترودهای چندبخشی بر روی پیزوسرامیک‌های استوانه‌ای منجر به تحریک مدهای ارتعاشی مختلف $n=0$ ، $n=1$ و $n=2$ می‌شود. این پدیده امکان ایجاد الگوهای پرتو متفاوت نظیر همه‌جهته، دوقطبی و دل‌وار را فراهم می‌سازد. توانایی تغییر بین این الگوها یا ترکیب آن‌ها، کارایی میدل را در کاربردهای مختلف به‌شدت افزایش می‌دهد. با تحلیل معادلات ارتعاشی برای استوانه‌های پیزوالکتریک، مشخص گردید که تقسیم‌بندی الکتروود داخلی به چهار یا چند بخش باعث تحریک بهتر مدهای بالاتر می‌شود. همچنین، امکان اندازه‌گیری همزمان فشار و گرادیان فشار فراهم می‌گردد که برای کاربردهای دقیق و حساس زیرآبی اهمیت فراوان دارد. از منظر فنی، در این پروژه طراحی و مدل‌سازی آرایه‌ای از ۱۵ المان استوانه‌ای صورت گرفت. با تحلیل عددی الگوهای پرتو در فواصل مختلف مرکز به مرکز بین استوانه‌ها، بهترین حالت در فاصله $d=7/8\lambda$ با شاخص جهت‌گیری افقی $15/8$ dB تعیین شد. این مقدار، بیشینه تمرکز انرژی آکوستیکی را در جهت دل‌خواه تضمین کرده و پهنای باریکی از پرتو را تولید می‌کند، که برای کاربردهایی نظیر مکان‌یابی هدف، اهمیت زیادی دارد. در ادامه طراحی، یک نمونه تک‌المان از هیدروفون استوانه‌ای چندحالتی ساخته و در محیط آزمایشگاهی (استخر آکوستیکی و حوضچه تست) آزمون شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های حساسیت‌گیری و جهت‌گیری، صحت طراحی تئوری را تأیید کرد. در این آزمون‌ها، با استفاده از هیدروفون مرجع B&K و روش کالیبراسیون مقایسه‌ای، عملکرد میدل در دامنه فرکانسی ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که شدت حساسیت‌گیری برای فرکانس‌های مختلف پایدار و قابل قبول بوده و در حالت جهت‌دار نیز پاسخ قابل پیش‌بینی و مؤثری از چهار ربع پیزوسرامیک ثبت شد. همچنین آزمون‌های زاویه‌ای با چرخش هیدروفون در محورهای مختلف، توانایی جهت‌گیری و کنترل الگو را اثبات کرد. این ویژگی‌ها می‌توانند در توسعه مودم‌های صوتی زیرآب، سونارهای پسیو و اکتیو و سامانه‌های نظارتی نقش حیاتی ایفا نمایند. این پژوهش گامی مؤثر در مسیر طراحی و تحلیل سیستم‌های سونار پیشرفته دریایی به‌شمار می‌رود. ترکیب مفاهیم تئوریک پیزوالکتریک با طراحی دقیق الکترومکانیکی و تست عملی نمونه‌ها، نشان داد که می‌توان با استفاده از پیزوسرامیک‌های چندحالتی، میدل‌هایی با قابلیت بالا در تفکیک و جهت‌یابی صوتی تولید نمود. توسعه چنین فناوری‌هایی، چه در حوزه دفاعی و چه در کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی (مانند پایش اقیانوسی و مطالعات زمین‌شناسی زیرآب)، می‌تواند نقش بسزایی در خودکفایی کشور و پیشرفت فناوری دریایی داشته باشد.

منابع

- Acoustical Society of America. (2012). American National Standard: Procedures for calibration of underwater electroacoustic transducers.
- Alessandro, B., Piero, G., & Luigi, T. (2008). NURC: Celebrating 50 years of international partnerships in ocean research and operations. *Oceanography*, 21, 231–250.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory* (Vol. 8, pp. 21–31). John Wiley & Sons.
- Bobber, R. J. (1988). *Underwater electroacoustic measurements*. Peninsula Publishing.
- Burdic, W. S. (2002). *Underwater acoustic system analysis*. Peninsula Publishing.
- Burdic, W. S. (2002). *Underwater acoustic system analysis*. Peninsula Publishing.
- Butler, A. L., Butler, J. L., & Rice, J. (2001). A trimodal directional transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 2363.
- Butler, A. L., Butler, J. L., Dalton, W. L., & Rice, J. A. (2000). Multimode directional telesonar transducer. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Proceedings* (Vol. 2, pp. 1289–1292).
- Butler, J. L., & Butler, A. L. (Inventors). (2004, May 11). Multimode synthesized beam transduction apparatus (U.S. Patent No. 6,734,604). Image Acoustics Inc.
- Butler, J. L., Butler, A. L., & Rice, J. A. (2004). A tri-modal directional transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 658–665.
- Butler, S. C., Butler, J. L., Butler, A. L., & Cavanagh, G. H. (1997). A low-frequency directional flextensional transducer and line array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 308–314.
- Doyle, I. M., & Hu, S.-L. J. (2021). Investigation of a multimode transducer using piezoelectric single crystals (Master's thesis, University of Rhode Island).

- Ellis, D. D. (2006). Effect of cardioid and limaçon directional sensors on towed array reverberation response. *Canadian Acoustics*, 34, 102–103.
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Ko, S. H., Brigham, G. A., & Butler, J. L. (1974). Multimode spherical hydrophone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 1890–1898.
- Kushwaha, M. S. (1996). Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review B*, 53(1), 463.
- Lemon, S. G. (2004). Towed-array history, 1917–2003. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29, 365–373.
- Li, H. L., Hu, J. H., & Chan, H. L. (2004). Finite element analysis on piezoelectric ring transformer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 51, 1247–1254.
- McConnell, J. A., Jensen, S. C., & Rudzinsky, J. P. (2006). Forming first- and second-order cardioids with multimode hydrophones. In *OCEANS 2006* (pp. 1–6).
- McCutcheon, E., & Haggett, M. T. (2019, April 9–11). Counting the ASW calories: Maximising sonar performance under weight and size constraints. In *Underwater Defence Technology (UDT)*, ExCeL London, England.
- Nuttall, A. H., & Cray, B. A. (2001). Approximations to directivity for linear, planar, and volumetric apertures and arrays. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26, 383–398.
- Pyo, S., Afzal, M. S., Lim, Y., Lee, S., & Roh, Y. (2021). Design of a wideband tonpilz transducer comprising non-uniform piezoceramic stacks with equivalent circuits. *Sensors*, 21, 2680.
- Richard, S. (2020). Geospectrum launches scaled down traps sonar for USVs. *Janes*.
- Sherman, C. H., & Butler, J. L. (2007). *Transducers and arrays for underwater sound* (Vol. 4, pp. 117–128). Springer.
- Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (1992). Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*, 158(2), 377–382.
- Sineiro, G. D., & Hofler, J. T. (2003). Underwater multimode directional transducer evaluation (Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA).
- Souto, F. (2013). Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare. *Proceedings of Acoustics*, 297, 159–230.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of underwater sound*. Peninsula Publishing.