



## طراحی و شبیه‌سازی یک آرایه تشکیل شده از ترانسدیوسرهای تانپیلز با وجود مواد پوشش‌دهنده محافظ

محمد علی حیدری<sup>1</sup>، محمد مهدی ابوترابی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی 89195-741، abootorabi@yazd.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

در این پژوهش، یک آرایه‌ی سوناری فعال  $3 \times 3$  از ترانسدیوسرهای تانپیلز، در حضور مواد پوشش‌دهنده پرکاربرد پلی‌اورتان، کورپرن، لاستیک سیلیکونی و نئوپرن، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود کامسول مولتی‌فیزیک به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی که شامل خصوصیات مهم یک آرایه سوناری است مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. این خصوصیات شامل حساسیت فرستندگی (پاسخ ولتاژ ارسالی)، الگوی پرتو، توان تشعشعی کلی و حساسیت گیرندگی آرایه است. مواد پوشش‌دهنده در آرایه‌ها وظایف مهمی را بر عهده دارند که یکی از مهمترین دلایل استفاده از آنها، جلوگیری از ورود آب و آلودگی‌ها به درون محفظه سونار است. خصوصیات عملکردی آرایه با وجود پوشش، تفاوت‌های زیادی با حالت بدون پوشش دارد؛ در نتیجه بررسی و تحلیل این پوشش‌ها دارای اهمیت فراوانی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با وجود مواد پوشش‌دهنده محافظ روی آرایه، حساسیت فرستندگی و حساسیت گیرندگی نسبت به حالت بدون پوشش کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش در حساسیت فرستندگی و حساسیت گیرندگی را ماده نئوپرن به اندازه  $1/4\%$  و  $2/2\%$  دارد. فرکانس تشدید آرایه با پوشش محافظ لاستیک سیلیکونی،  $32 \text{ kHz}$  است که نسبت به دیگر مواد محافظ آرایه، بیشترین مقدار را دارد. همچنین مشخص شد که مواد پوشش‌دهنده محافظ بر روی پهنای پرتو آرایه بی‌تأثیر هستند اما پهنای باند فرکانسی آرایه را افزایش می‌دهند. ماده نئوپرن بیشترین افزایش در پهنای باند به اندازه  $5 \text{ kHz}$  را نشان می‌دهد.

آرایه  
سونار  
ترانسدیوسر  
تانپیلز  
کامسول مولتی‌فیزیک

## Design and simulation of an array consisted of Tonpiliz transducers with protective coating materials

Mohammad Ali Heidari, Mohammad Mahdi Abootorabi\*

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

\* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

### Keywords

Array  
Sonar  
Transducer  
Tonpiliz  
COMSOL Multiphysics

### Abstract

In this research, a  $3 \times 3$  active sonar array consisted of Tonpiliz transducers with the common protective coating materials, i.e. polyurethane, corprene, silicone rubber and neoprene has been simulated by COMSOL Multiphysics finite-element software, where the simulation results, including the important characteristics of a sonar array have been analysed and compared. These characteristics include Transmitting Voltage Response (TVR), beam pattern, total radiated power, and Receiving Voltage Sensitivity (RVS). The array coating materials cover major tasks in arrays, one of them is to prevent water and contaminants from entering into the chamber of the array. The performance characteristics of the array with the coating differ significantly with respect to the uncoated one; hence, their investigation and analysis is crucially vital. The simulation results indicated that at the presence of protective coating materials in arrays, the TVR and RVS are reduced in comparison with the uncoated ones while the most reduction in TVR and RVS belongs to neoprene respectively 1.4% and 2.2%. The resonance frequency of the array with the silicone rubber protective layer was measured to be  $32 \text{ kHz}$  which is the greatest with to the other coating materials. It was also found that the coating materials have no effect on beam width, but increase the band width of the array. Neoprene exhibited the greatest increase in band width as much as  $5 \text{ kHz}$ .

### 1- مقدمه

اغلب به صورت آرایه‌ای از ترانسدیوسرها هستند که در یک محفظه در کنار هم قرار گرفته‌اند و به دو دسته سونار فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [1]. در سونار فعال، سیگنال صوتی

سونار<sup>1</sup> به معنی فاصله‌یابی و نوبری توسط صداست. سونارها

<sup>1</sup> Sonar

Please cite this article using:

M. A. Heidari, M. M. Abootorabi, Design and simulation of an array consisted of Tonpiliz transducers with protective coating materials, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 11-19, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. A. Heidari, M. M. Abootorabi, Design and simulation of an array consisted of Tonpiliz transducers with protective coating materials, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 11-19, 2016 (in Persian)

- 1- حفاظت الکتریکی و فیزیکی در برابر آب دریا و املاح آن
  - 2- حفاظت فیزیکی در برابر ضربه اشیا مغروق و آبیان
  - 3- حفظ آرایش و چیدمان ترانسدیوسرها در برابر نیروی جریان آب و ارتعاشات وارده
  - 4- تطبیق صوتی ترانسدیوسر و آب به منظور ارسال و دریافت مناسب صوت
  - 5- کاهش تأثیرات نویزهای صوتی و غیر صوتی (الکتریکی-ارتعاشی)
  - 6- پیشگیری از تجمع و رشد گیاهان و جانورانی مانند خزه بر روی ترانسدیوسر. این مواد باعث جذب صوت شده و محل‌های مناسبی برای تجمع حباب‌های هوا هستند.
- از مهمترین مواد پوشش‌دهنده می‌توان به پلی‌اورتان، کورپرن، لاستیک سیلیکونی و نئوپرن اشاره کرد [2].
- یکی از نرم‌افزارهای مورد توجه برای شبیه‌سازی آرایه، نرم‌افزار المان محدود کامسول مولتی‌فیزیک<sup>5</sup> است. نرم‌افزار کامسول امکان ترکیب فیزیک‌های مختلف برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده فیزیکی را فراهم می‌کند [7]. در این نرم‌افزار، یک مدل می‌تواند شامل یک یا چند رابط فیزیکی باشد تا تمام فعل و انفعالاتی که در دنیای واقعی وجود دارد را شبیه‌سازی کند.

بعضی از این محیط‌های چند فیزیکی به صورت پیش فرض در نرم‌افزار در نظر گرفته شده‌اند، مانند رابط پیزوالکتریک که شامل ترکیب مکانیک جامدات و الکترواستاتیک است [8]. مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار، با روش عددی به حل معادلات دیفرانسیلی می‌پردازد. با توجه به حل بسیار دقیق این نوع از مدل‌سازی و همچنین پیچیدگی‌های آرایه، مدل‌سازی المان محدود بهترین گزینه برای تحلیل و طراحی آرایه تشکیل شده از ترانسدیوسرهای تانپیلز است.

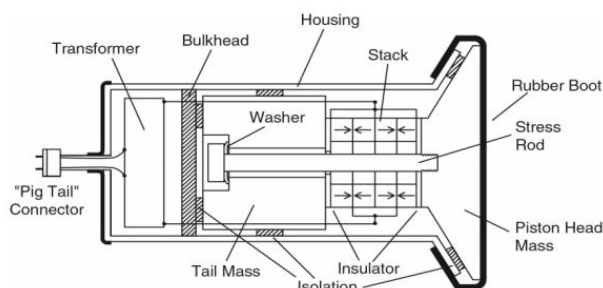


Fig. 1 Components of a Tonpilz transducer [5]

شکل 1 اجزای یک ترانسدیوسر تانپیلز [5]

توسط فرستنده<sup>1</sup> ارسال می‌شود. این موج صوتی به هدف برخورد کرده و به صورت بازتاب به گیرنده<sup>2</sup> باز می‌گردد. در سونار غیر فعال، آشکارسازی و تخمین براساس صداهایی که از خود هدف منتشر می‌شود، مانند نویز ماشین‌آلات، نویز ناشی از حرکت و صدای تولیدی از سونار غیرفعال هدف، انجام می‌گیرد. این امواج توسط گیرنده سونار دریافت و پردازش می‌شوند. با پردازش سیگنال انعکاسی از هدف، امکان آشکارسازی و تخمین پارامترهای مجهول به وجود می‌آید [2]. توسعه و پیشرفت ترانسدیوسرهای الکتروآکوستیک زیرآبی به سرعت در قرن 20 انجام گرفت و به عنوان یک دانش رو به رشد با کاربردهای بسیار مهم در زمینه‌های مختلف تا به حال ادامه پیدا کرده است. این رشته، علوم مختلف از جمله مکانیک، الکترونیک، مغناطیس و فیزیک حالت جامد را ترکیب می‌کند و به نحوی، از تمام این علوم در توسعه خود استفاده می‌نماید. در حالت کلی، یک ترانسدیوسر وسیله یا فرایندی است که انرژی را از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌کند. یک ترانسدیوسر الکتروآکوستیک، انرژی الکتریکی را به انرژی صوتی و بالعکس تبدیل می‌نماید [3]. برای بدست آوردن جهت‌دهی مورد نیاز، تعیین موقعیت هدف، از بین بردن نویزها و بدست آوردن توان کافی در سونار-های فعال و غیرفعال، از آرایه‌ای از ترانسدیوسرها استفاده می‌شود. دیگر مزیت آرایه‌ها، انعطاف در شکل و فرمان‌پذیری پرتوها<sup>3</sup> است [4]. آرایه‌های سونار معمولاً از ترانسدیوسرهای تانپیلز<sup>4</sup> در طرح‌های مختلف تشکیل شده‌اند. واژه تانپیلز از ترکیب دو کلمه آلمانی به معنای صوت و قارچ ساخته شده‌است و دلیل آن، شکل خاص این ترانسدیوسر است که به قارچ شباهت دارد. شکل ترانسدیوسر تانپیلز، امکان ساخت آرایه‌های بزرگ سوناری که شامل صدها ترانسدیوسر هستند را در پیکربندی‌های مختلف مانند کروی، استوانه‌ای و مسطح فراهم می‌کند. این موضوع یکی از دلایل استفاده گسترده از ترانسدیوسر تانپیلز در کاربردهای سونار است. شکل 1 نمایی از تمام اجزای یک ترانسدیوسر تانپیلز را نشان می‌دهد [5].

در سامانه‌های سوناری، مجموعه ترانسدیوسرها و مدارهای الکترونیکی مربوطه، به شکل‌های مختلفی پوشش داده شده و محافظت می‌شوند. بنابراین، آرایه علاوه بر ترانسدیوسر و اجزای تقویت و تطبیق، معمولاً دارای پوشش ویژه‌ای است که وظایف زیر را بر عهده دارد [6]:

<sup>1</sup> Projector

<sup>2</sup> Hydrophone

<sup>3</sup> Beam Steering

<sup>4</sup> Tonpilz

<sup>5</sup> COMSOL Multiphysics

آکوستیکی در فرکانس تشدید، بهتر است ترانسدیوسر در فرکانس تشدید کار کند.

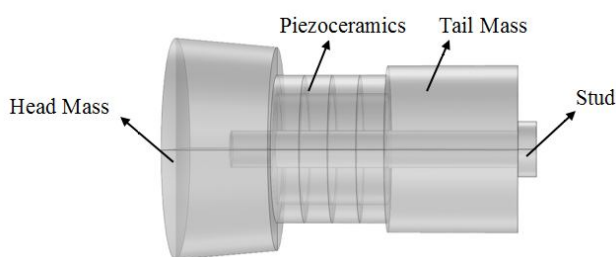


Fig. 2 The main components of the simulated Tonpiliz transducer

شکل 2 اجزای اصلی ترانسدیوسر تانپیلز شبیه‌سازی شده

رینگ‌های پیزوالکتریک را می‌توان مهمترین قسمت از تانپیلز دانست زیرا حرکت و نوسان به وسیله آنها انجام می‌گیرد. توان آکوستیکی بدست‌آمده از ترانسدیوسر به طور مستقیم با حجم رینگ پیزوالکتریک رابطه دارد. مود 33 در رینگ‌ها، از نظر مکانیکی در حالت سری و از نظر الکتریکی در حالت موازی است و همین امر اجازه کاربرد ولتاژ متناوب را به سیستم می‌دهد. برای این منظور، باید جهت پلاریزه شدن رینگ‌های متوالی به صورت مخالف باشد [10]. جرم دنباله از جنس فولاد ضدزنگ انتخاب شده‌است تا به دلیل سنگین بودن، ارتعاشات قسمت انتهایی ترانسدیوسر کاهش یابد. مهم‌ترین وظیفه جرم سر، انتقال ارتعاشات تولید شده به وسیله پیزوالکتریک‌ها به محیط آب است. چون مشخصه امپدانس صوتی آلومینیوم به آب نزدیک است، معمولاً برای این قسمت از آلومینیوم استفاده می‌شود. دلیل طراحی مخروطی جرم سر، کاهش جرم بدون تغییر در شعاع سطح تماس با آب است. با این کار می‌توان نسبت جرم دنباله به جرم سر را به یک حالت مطلوب رساند و از تحمیل وزن اضافی به مجموعه جلوگیری کرد. پیزوالکتریک استفاده شده در این پژوهش از جنس PZT-8 است. تعداد این سرامیک‌ها معمولاً زوج و بین 2 تا 12 است که بسته به خروجی‌های مورد نظر، تغییر می‌کند [11]. ترانسدیوسر طراحی شده در اینجا شامل 4 عدد رینگ پیزوالکتریک است. پیزوالکتریک PZT-8 دارای ضرایب ثابتی است که در مرجع [2] ذکر شده‌اند. برای اعمال ولتاژ به سطوح رینگ‌های پیزوالکتریک، معمولاً الکترودهای نازک مسی بین آنها قرار داده می‌شود و ولتاژ مورد نظر به این الکترودها اعمال می‌گردد. جنس میله نگهدارنده، از فولاد انتخاب شده‌است. این میله، علاوه بر نگهداری قطعات ترانسدیوسر در کنار هم، وظیفه ایجاد یک پیش تنش به ساختار ترانسدیوسر را نیز بر عهده دارد [10].

در مقاله حاضر به علت رویکرد چندگانه فیزیکی ترانسدیوسر، نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک برای شبیه‌سازی انتخاب شده‌است. وجود کلمه مولتی‌فیزیک در عنوان این نرم‌افزار به این علت است که دامنه وسیعی از ماژول‌های مختلف از قبیل مکانیک سیالات، انتقال حرارت، انتقال جرم، مباحث مربوط به برق و الکترونیک، مباحث فیزیک و شیمی محض و حتی بروزترین دانش‌ها از قبیل لایه نازک، محیط‌های پلاسما و لایه‌های شفاف را شامل می‌شود [9].

جستجوهای انجام شده نشان می‌دهد که به علت کاربردهای نظامی آرایه‌ها، در زمینه شبیه‌سازی آرایه‌های سوناری و بررسی تأثیر مواد پوشش‌دهنده محافظ آنها، مطالعات منتشر شده‌ای وجود ندارد. هدف از این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی یک آرایه سوناری فعال  $3 \times 3$  صفحه‌ای از ترانسدیوسرهای تانپیلز، با فرکانس تشدید 30 kHz، در حضور مواد پوشش‌دهنده پر کاربرد و بدست آوردن مشخصات و ویژگی‌های آرایه است. نتایج بدست آمده نشان داد که لایه محافظ آرایه روی حساسیت فرستندگی و حساسیت گیرندگی مؤثر است ولی پهنای پرتو را تغییر نمی‌دهد. علاوه بر این، از بین لایه‌های مختلف محافظ آرایه، لاستیک سیلیکونی فرکانس تشدید آرایه را افزایش می‌دهد و ماده نئوپرن بیشترین پهنای باند را برای آرایه بوجود می‌آورد.

## 2- ترانسدیوسر تانپیلز و آرایه

ترانسدیوسرهای تانپیلز شامل رینگ‌های پیزوالکتریک با مود 33 هستند که بین یک جرم سر آلومینیومی و یک جرم دنباله فولادی به وسیله یک میله فولادی که از بین آنها عبور می‌کند، محکم فشرده شده‌اند. این پیکربندی به قطعات اجازه می‌دهد به صورت طولی در فرکانس‌های پایین یا متوسط بین 1 تا 50 کیلوهرتز نوسان داشته باشند [5]. شکل 2 نمایی از اجزای اصلی ترانسدیوسر تانپیلز شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. فرکانس تشدید در بیشتر مسائل و طراحی‌های مهندسی مکانیک به دلیل ایجاد تغییر مکان‌های زیاد، یک عامل مخرب محسوب می‌شود ولی در عملکرد ترانسدیوسرهای آکوستیکی زیرآبی به دلیل ایجاد سطح فشار صوت بالا در آب، نقش به‌سزایی ایفا کرده و بسیار مطلوب است. حرکت اصلی ترانسدیوسر تانپیلز با اعمال یک ولتاژ متناوب به رینگ‌های پیزوالکتریک که باعث ایجاد نوسان در آنها می‌شود، ایجاد می‌گردد. این تغییر مکان متناوب پیروهوا، از طریق نوسان جرم سر به محیط آکوستیکی منتقل می‌شود و موج صوتی را در محیط آب ایجاد می‌کند. به دلیل بزرگ‌تر شدن دامنه نوسانات و به تبع آن افزایش فشار

## 1-2- طراحی ترانسدیوسر تانپیلز

روش‌های مختلفی برای طراحی ترانسدیوسر وجود دارد. هدف از این مقاله، شبیه‌سازی آرایه است؛ بنابراین به طور گسترده به جزئیات طراحی ترانسدیوسر پرداخته نشده است. از مهمترین روش‌ها برای طراحی ترانسدیوسر، روش اجزای محدود است که در پژوهش حاضر، به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک انجام شده است. مشخصات ترانسدیوسر تانپیلز مورد نظر در این مقاله، در جدول 1 ذکر شده است. علاوه بر مشخصات ذکر شده در جدول 1، موارد زیر نیز در حین طراحی باید در نظر گرفته شود [2]:

- 1- با توجه به فاصله مجاز بین المان‌ها در آرایه که در قسمت 2-2 ذکر خواهد شد، شعاع سطح فعال (سطح تماس با آب) ترانسدیوسر نباید از 12/5 mm تجاوز کند.
  - 2- نسبت جرم دنباله به جرم سر بین 1 و 10 منطقی است ولی معمولاً بین 2 و 4 انتخاب می‌شود.
  - 3- رینگ پیزوالکتریک با حداقل سطح ممکن و با قطر 10 تا 15 میلی‌متر و ضخامت 2 تا 4 میلی‌متر انتخاب شود.
  - 4- نسبت مساحت سطح فعال به مساحت رینگ پیزوالکتریک 5 به 1 باشد.
  - 5- بیشینه مقدار حساسیت فرستندگی ترانسدیوسر، که در جدول 1 ذکر شده است، باید در فرکانس تشدید رخ دهد. از نمودار ادمیتانس الکتریکی ترانسدیوسر، برای یافتن فرکانس تشدید استفاده می‌شود؛ زیرا بیشینه ادمیتانس الکتریکی دقیقاً در فرکانس تشدید رخ می‌دهد.
- با توجه به شرایط ذکر شده، ابعاد ترانسدیوسر تانپیلز طراحی شده در شکل 3 آمده است.

جدول 1 مشخصات ترانسدیوسر تانپیلز

Table 1 The properties of the Tonpiliz transducer

فرکانس تشدید	پهنای باند	الگوی پرتو	حساسیت فرستندگی	حساسیت گیرندگی	پهنای پرتو
30 kHz	< 5 kHz	کله فندی	≈ 135 dB	≈ -170 dB	1

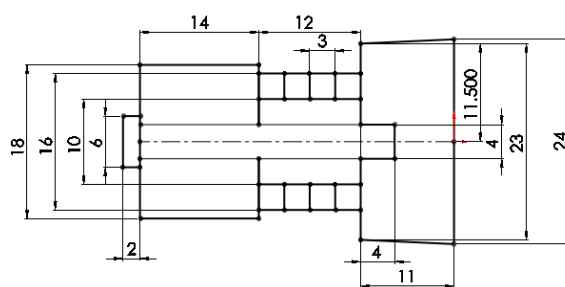


Fig. 3 Dimensions of the designed Tonpiliz transducer in millimeters

شکل 3 ابعاد ترانسدیوسر تانپیلز طراحی شده برحسب میلی‌متر

## 2-2- آرایه

برنامه‌های کاربردی نیروهای دریایی، محرک اصلی برای توسعه سیستم‌های سونار است. گسترش آرایه‌های آکوستیکی بزرگ ارتباط نزدیکی به ساختمان کشتی‌ها و زیردریایی‌های جدید دارد.

وظیفه اصلی سونارهای فعال در زیردریایی‌ها، ردیابی کشتی‌ها و دیگر زیردریایی‌ها است. اجتناب از برخورد با مین‌ها و صخره‌های دریایی و ارتباطات زیرآبی از دیگر وظایف مهم سونارهای فعال است. ردیابی فعال به آرایه‌های فرستنده بزرگ در محدوده فرکانسی 2 تا 10 کیلوهرتز برای کارکردهای با بعد متوسط، و فرکانس‌های خیلی بالاتر به منظور اجتناب از برخورد با موانع نیاز دارد [1]. آرایه سوناری اغلب شامل صدها ترانسدیوسر است تا بتواند توان آکوستیکی مورد نیاز را در جهات تعریف شده تأمین کند. ترانسدیوسرها در یک آرایه، روی یک صفحه، استوانه یا سطح کره قرار می‌گیرند و روی بدنه کشتی یا زیر دریایی محصور می‌شوند. به منظور ایجاد بیشینه فشار آکوستیکی و فرمان‌پذیری پرتوها، ترانسدیوسرها در یک بسته در کنار هم قرار می‌گیرند [1].

اولین قدم در طراحی یک آرایه، در نظر گرفتن پیکربندی آرایه است. آرایه مورد نظر در این مقاله، یک آرایه صفحه‌ای به شکل مربع است که از 9 ترانسدیوسر تانپیلز با فواصل مساوی تشکیل شده است و به صورت فعال عمل می‌کند، یعنی هم فرستنده و هم گیرنده است. برای طراحی، ابتدا فاصله بین ترانسدیوسرها تعیین شده است. این فاصله باید کمتر از نصف طول موج ایجاد شده در محیط آب باشد [2]. حداکثر فاصله بین المان‌ها برابر است با:

$$\lambda = \frac{c}{f_{res}} = \frac{1500 \text{ m/s}}{30 \text{ kHz}} = 50 \text{ mm} \rightarrow \frac{\lambda}{2} = 25 \text{ mm} \quad (1)$$

که  $\lambda$  طول موج،  $c$  سرعت صوت در محیط آب و  $f_{res}$  فرکانس تشدید (جدول 1) است.

فاصله مرکز به مرکز دو ترانسدیوسر مجاور نباید از 25 mm تجاوز کند. در صورتی که فاصله بین ترانسدیوسرها از مقدار بیان شده بیشتر شود، خروجی‌ها و پاسخ‌های فرکانسی آرایه دچار نوسانات زیاد و پرش می‌شود که مطلوب نیست و پاسخ صحیحی از آرایه بدست نمی‌آید. در اینجا، فاصله مرکز به مرکز ترانسدیوسرهای مجاور، 25 mm در نظر گرفته شده است.

## 3- مدل‌سازی آرایه

شبیه‌سازی آرایه در محیط آکوستیک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک انجام گرفته است. برای شبیه‌سازی آرایه باید ماژول‌های

محاسبه شده است. مقدار ضخامت و خواص مواد پوشش‌دهنده در دمای 25 درجه سلسیوس در جدول 2 ذکر شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آرایه با وجود مواد پوشش‌دهنده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

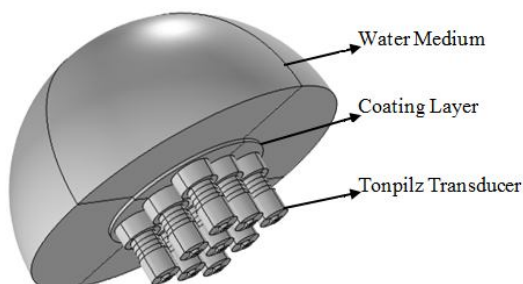


Fig. 4 The simulated sonar array

شکل 4 آرایه سوناری شبیه‌سازی شده

جدول 2 ضخامت و خواص مواد پوشش‌دهنده [2]

Table 2 The thicknesses and specifications of the coating materials [2]

نئوپرن	لاستیک سیلیکونی	کورپرن	پلی‌اورتان	
0/5	0/12	0/49	0/3	مدول الاستیک (GPa)
1400	1150	1000	1080	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
0/48	0/48	0/45	0/48	ضریب پواسون
598	319	700	526	سرعت صوت (m/s)
2/5	1/3	2/9	2/2	ضخامت پوشش (mm)

### 3-1- حساسیت فرستندگی

حساسیت فرستندگی ( $TVR$ ) در فاصله 1 متر از سطح جرم سر با ولتاژ مؤثر 1 V محاسبه می‌شود و یکی از مهمترین مشخصه‌های عملکردی ترانسدیوسر و آرایه است. مقدار  $TVR$  از رابطه (2) بدست می‌آید [12].

$$TVR = 20 \log \frac{P_{rms}/V_{rms}}{1 \mu Pa V^{-1}} \quad (2)$$

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} P P^*} \quad (3)$$

که  $P_{rms}$  فشار مؤثر و  $V_{rms}$  ولتاژ مؤثر نام دارد و در رابطه (3)،  $P^*$  مزدوج مختلط فشار است.

هرچه تعداد ترانسدیوسرها در آرایه بیشتر باشد، مقدار حساسیت نیز بیشتر خواهد بود و این امر یکی از دلایل استفاده از آرایه است. در صورتی که آرایه به درستی شبیه‌سازی شده باشد، بیشینه مقدار  $TVR$  باید در فرکانس تشدید رخ دهد [2]. شکل 5 نمودار حساسیت فرستندگی آرایه با و بدون مواد پوشش‌دهنده، در محدوده فرکانسی 20 تا 40 کیلوهرتز را نشان

فشار آکوستیکی، مکانیکی و الکتریکی را با هم ترکیب کرد تا به نتیجه مطلوب رسید زیرا یک ترانسدیوسر سونار از سه قسمت آکوستیک، ساختار مکانیکی و پیزوالکتریک تشکیل شده است [7]. جرم دنباله به صورت گیردار مدل شده است و هر کدام از پیروها تحت ولتاژ 1 V قرار گرفته‌اند. شکل 4 نمایی از آرایه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. محیط بی‌نهایت آب به صورت یک نیم‌کره، بر روی پوشش محافظ آرایه قرار می‌گیرد. شعاع نیم‌کره با توجه به محیط فضای دور برابر 1/5 m در نظر گرفته شده است [12]. برای اجتناب از ایجاد کاویتاسیون [2]، عمق کاری آرایه 500 m در نظر گرفته شده است. کاویتاسیون باعث بروز مشکلاتی در نحوه عملکرد و ایجاد نویز در سیستم می‌شود. ماده پوشش‌دهنده، بین سطح ترانسدیوسرها و آب قرار داده می‌شود. مواد پوشش‌دهنده باید بتوانند نوسانات جرم سر را به محیط آب منتقل کنند و تغییر شکل بازگشت‌پذیر داشته باشند، بنابراین این مواد به صورت الاستیک مدل‌سازی شده‌اند. از تغییر خواص مواد پوشش‌دهنده در محیط مرطوب صرف‌نظر شده است. شکل اصلی یک آرایه سوناری، بسیار پیچیده است ولی به دلیل اینکه هدف از این پژوهش، بررسی اثر لایه پوشش بر روی مشخصات آرایه است و به منظور ساده‌سازی، می‌توان آرایه را به صورت شکل 4 در نظر گرفت. بین سطح ترانسدیوسرها، لایه محافظ و سطح آب باید تماس برقرار باشد و محور مرکزی ترانسدیوسر وسط با محور مرکزی لایه پوشش‌دهنده و نیم‌کره محیط آب باید در یک راستا باشد تا تقارن حفظ شود. به منظور دقت در شبیه‌سازی، بزرگترین اندازه المان‌ها،  $\frac{1}{5}$  کمترین طول موج در نظر گرفته می‌شود، زیرا در این حالت بیشترین دقت در محاسبات بدست می‌آید [9]. کمترین طول موج برابر با سرعت صوت در آب تقسیم بر بزرگترین فرکانس استفاده شده در حوزه فرکانسی، یعنی فرکانس تشدید است.

خروجی این مدل، پاسخ ولتاژ ارسالی<sup>1</sup> (حساسیت فرستندگی)، حساسیت گیرندگی<sup>2</sup>، الگوی پرتو<sup>3</sup> و توان تشعشعی کلی<sup>4</sup> آرایه با و بدون وجود مواد پوشش‌دهنده است. ضخامت لایه پوشش‌دهنده در عمل معمولاً  $\frac{1}{4}$  یا  $\frac{1}{8}$  انتخاب می‌شود [2]. در اینجا از نسبت  $\frac{1}{8}$  برای ضخامت لایه پوشش محافظ، استفاده شده است.

طول موج برای هر کدام از مواد پوشش‌دهنده به طور جداگانه با توجه به سرعت صوت در ماده و فرکانس تشدید 30 کیلوهرتز

<sup>1</sup> Transmitting Voltage Response (TVR)

<sup>2</sup> Receiving Voltage Sensitivity (RVS)

<sup>3</sup> Beam pattern

<sup>4</sup> Total radiated power

از طرفی به دلیل فرض یکنواخت بودن سرعت، مقدار نیرو ثابت می‌ماند؛ بنابراین در فرکانس تشدید، ادمیتانس مقدار بیشینه خود را دارد. واحد اندازه‌گیری ادمیتانس زیمنس است [3].

نتایج بدست آمده از شکل‌های 5 و 7 در جدول 3 ذکر شده‌است. همان‌گونه که در جدول 3 مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه حساسیت فرستندگی ( $TVR_{max}$ ) برای مواد پوشش‌دهنده بررسی شده، نزدیک به یکدیگر هستند و تفاوت زیادی با هم ندارند. البته در حالت بدون پوشش محافظ، مقدار حساسیت آرایه بیشتر از حالت با پوشش است. علاوه بر این، پهنای باند در حضور مواد پوشش‌دهنده، افزایش پیدا کرده‌است و این افزایش در تمام این چهار ماده مشاهده می‌شود. ماده نئوپرن بیشترین افزایش را در پهنای باند از خود نشان می‌دهد. بنابراین، اگر محدوده فرکانس کاری بیشتر مورد نیاز باشد، می‌توان از ماده نئوپرن به عنوان پوشش محافظ آرایه استفاده کرد. خروجی مهم دیگر، مقدار فرکانس تشدید در حضور مواد پوشش‌دهنده است.

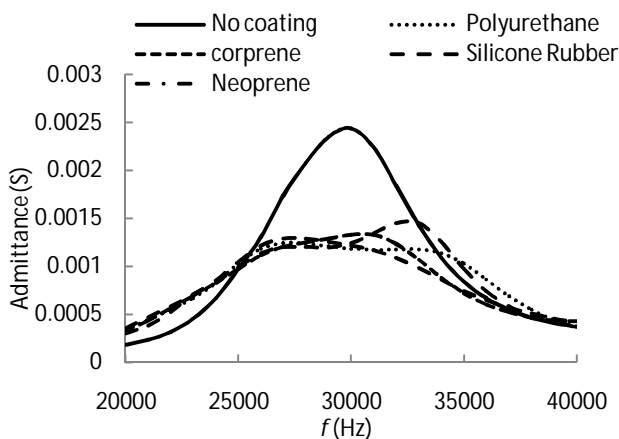


Fig. 7 Electrical Admittance vs. frequency in the presence of various coating materials

شکل 7 نمودار ادمیتانس الکتریکی بر حسب فرکانس در حضور مواد پوشش‌دهنده

جدول 3 نتایج بدست آمده از شکل‌های 5 و 7

Table 3 The obtained results from the figures 5 and 7

لاستیک	کوپرن	پلی اورتان	بدون پوشش	
سیلیکون	ن	اورتان	پوشش	
ی				
155.2	155.85	155.4	155.5	157.38
2	9	1	1	
14	11	11	13	9
27	32	30	27	30

در مقایسه با آرایه بدون پوشش، برای مواد پلی‌اورتان و نئوپرن، فرکانس تشدید کاهش یافته، ماده کوپرن فرکانس تشدید را

می‌دهد. از روی نمودار  $TVR$  می‌توان پهنای باند آرایه را بدست آورد [11]. هرچه پهنای باند بیشتر باشد، آرایه می‌تواند در محدوده فرکانسی بیشتری کار کند. برای بدست آوردن پهنای باند باید به اندازه 3 dB از مقدار بیشینه  $TVR$  کم کرد و پهنای باند را اندازه گرفت. شکل 6 روش بدست آوردن پهنای باند را نشان می‌دهد.

برای بدست آوردن فرکانس تشدید، باید نمودار ادمیتانس الکتریکی را بر حسب فرکانس رسم کرد (شکل 7). فرکانسی که در آن، ادمیتانس مقدار بیشینه خود را دارد، فرکانس تشدید است [2]. ادمیتانس الکتریکی به صورت نسبت  $\frac{I}{V}$  بیان می‌شود. که  $I$  شدت جریان و ولتاژ  $V$  ولتاژ مدار است. معادل مکانیکی شدت جریان و ولتاژ به ترتیب، سرعت یکنواخت نوسان سطح تماس ترانسدیوسر با آب ( $u$ ) و نیروی وارد شده به آب توسط سطح مرتعش ( $F$ ) است؛ بنابراین می‌توان ادمیتانس را به صورت نسبت  $\frac{u}{F}$  نیز بیان نمود [11]. در فرکانس تشدید، سطح تماس با آب، بیشترین سرعت خود را دارد.

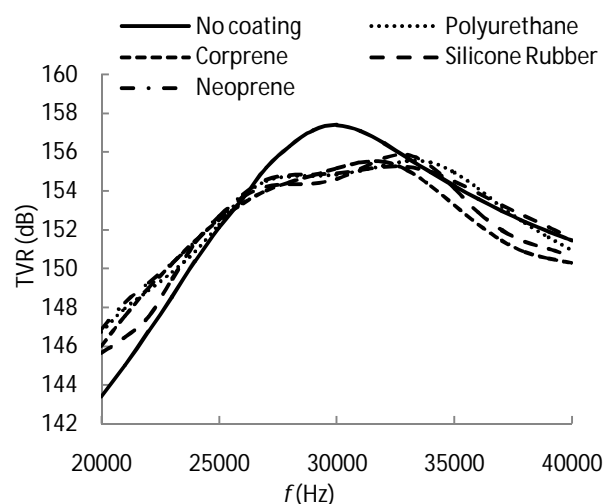


Fig. 5 The TVR of the array in the presence of coating materials

شکل 5 حساسیت فرستندگی آرایه در حضور مواد پوشش‌دهنده

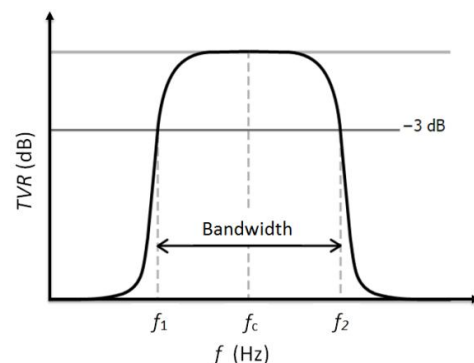


Fig. 6 Determination of array band width

شکل 6 روش بدست آوردن پهنای باند آرایه

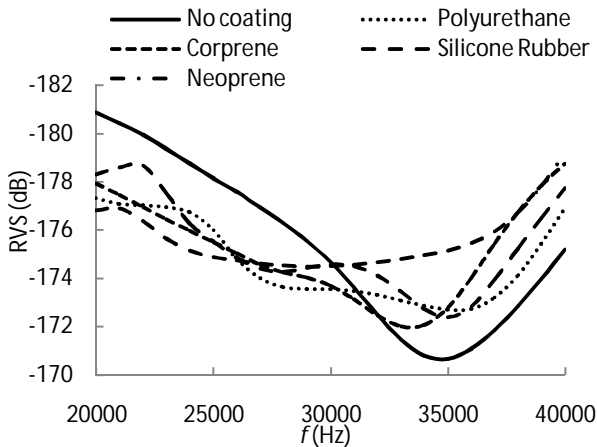


Fig. 8 The RVS of the array in the presence of various coating materials  
شکل 8 حساسیت گیرندگی برای آرایه در حضور مواد پوشش‌دهنده مختلف

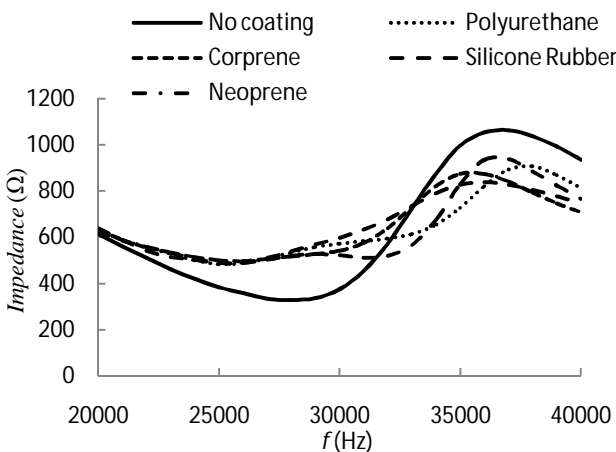


Fig. 9 Electrical impedance vs. frequency in the presence of various coating materials

شکل 9 نمودار امپدانس الکتریکی بر حسب فرکانس با وجود مواد پوشش‌دهنده مختلف

جدول 4 نتایج بدست آمده از شکل‌های 8 و 9

Table 4 The obtained results from the figures 8 and 9

بدون پوشش	پلی‌اورتان	کورپرن	لاستیک سیلیکونی	نتوپرن	$RVS_{max}$ (dB)
-170/7	-172/7	-172/0	-172/4	-174/5	فرکانس ضد تشدید (kHz)
28	25	26	25	25	

### 3-3- الگوی پرتو

الگوی تشعشعی پرتو در فرستنده صوت، نشانگر تغییرات نسبی تشعشع منبع مولد صوت در زوایای مختلف است و در گیرنده صوت، بهره نسبی در زوایای مختلف را نشان می‌دهد. الگوی پرتو به صورت نرمال شده و معمولاً لگاریتمی بیان می‌شود و مقدار حداکثر آن برابر صفر دسی‌بل است. با ترسیم شدت صوت در زوایای مختلف انحراف از محور مرکزی یک ترانسدیوسر،

ثابت نگه داشته و لاستیک سیلیکونی باعث افزایش فرکانس تشدید شده‌است. با توجه به جدول 3 می‌توان مواد را براساس مقدار کاهش فرکانس تشدید دسته‌بندی کرد و با توجه به نیاز طراحی، ماده مناسب را برگزید.

در صورتی که مقدار حساسیت فرستندگی و فرکانس تشدید بالا مد نظر باشد، می‌توان از لاستیک سیلیکونی به عنوان ماده محافظ آرایه استفاده کرد.

### 3-2- حساسیت گیرندگی

در شبیه‌سازی انجام شده، سونار فعال مورد بررسی قرار گرفته‌است یعنی آرایه به صورت فرستنده و گیرنده عمل می‌کند. در حالت گیرندگی، موج صوتی به آرایه برخورد می‌کند و با ایجاد فشار روی رینگ‌های پیزوالکتریک، باعث به وجود آمدن ولتاژ در آنها می‌شود [5]. این ولتاژ توسط دستگاه‌های پردازش سیگنال دریافت می‌شود و فاصله و جهت هدف شناسایی می‌گردد. حساسیت گیرندگی برابر است با [12]:

$$RVS = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{P_{in}} \right) \quad (4)$$

که  $RVS$  حساسیت گیرندگی،  $V_{out}$  ولتاژ خروجی از ترانسدیوسر و  $P_{in}$  فشار اعمال شده به سطح تماس ترانسدیوسر با آب است. حساسیت گیرندگی از مقدار  $TVR$  نیز قابل محاسبه است [2]:

$$RVS = TVR + 20 \log |Z| - 20 \log (f) - 294 \text{ dB} \quad (5)$$

که  $Z$  امپدانس کلی ترانسدیوسر و  $f$  فرکانس کاری است. در شکل 8 نمودار حساسیت گیرندگی آرایه شبیه‌سازی شده با پوشش‌های محافظ مختلف نشان داده شده است.

برای بدست آوردن فرکانس ضد تشدید آرایه، باید نمودار امپدانس الکتریکی بر حسب فرکانس رسم شود (شکل 9). امپدانس الکتریکی عکس‌ادمیتانس الکتریکی است و به صورت  $\frac{V}{I}$  یا  $\frac{F}{u}$  بیان می‌شود [11]. در حالت گیرندگی و در فرکانس ضد تشدید، سطح تماس با آب بیشترین سرعت را دارد؛ بنابراین، امپدانس الکتریکی در فرکانس ضد تشدید مقدار کمینه خود را دارد [2]. نتایج بدست آمده از شکل‌های 8 و 9 در جدول 4 ذکر شده است. با توجه به جدول 4 می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقدار حساسیت گیرندگی مربوط به مواد محافظ آرایه، متعلق به کورپرن و کمترین مقدار، متعلق به نتوپرن است و البته در حالت بدون پوشش، مقدار حساسیت بیشتر از حالت با پوشش است. به عبارت دیگر، وجود پوشش محافظ روی آرایه مقدار حساسیت گیرندگی آرایه را کاهش می‌دهد. همان‌گونه که در جدول 4 ذکر شده است، وجود پوشش محافظ، فرکانس ضد تشدید آرایه را هم کاهش می‌دهد.

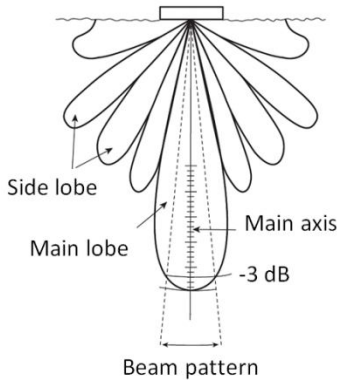


Fig. 10 The beam pattern of a transducer [1]

شکل 10 الگوی پرتو برای یک ترانسدیوسر [1]

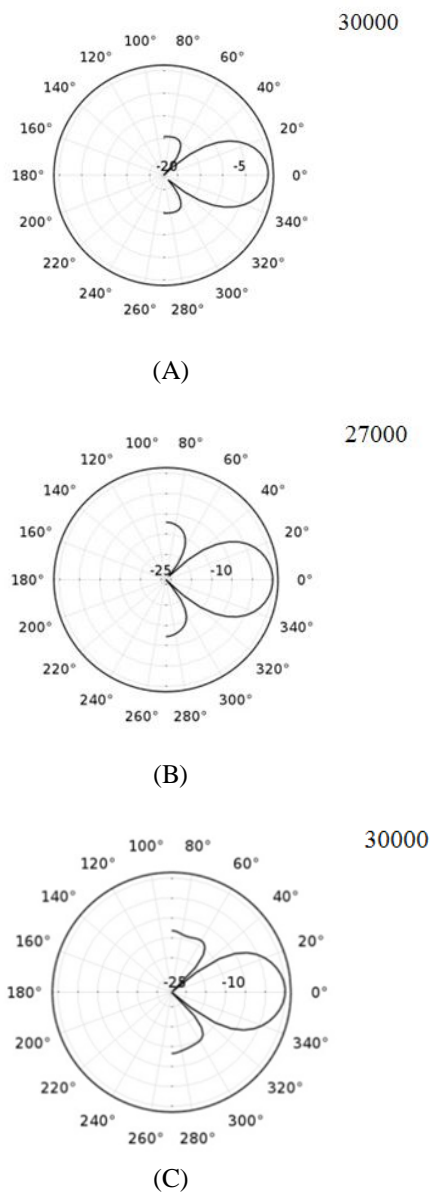


Fig. 11 The array beam pattern in the case of a) Array with no coating, with coatings b) Polyurethane c) Corprene

شکل 11 الگوی پرتو آرایه در حالت الف) بدون پوشش، با پوشش‌های ب) پلی‌اورتان ج) کورپرن

تصویری همانند شکل 10 برای الگوی پرتو به دست می‌آید. بیشترین انرژی ترانسدیوسر در حالت ارسال، در گلبرگ اصلی<sup>1</sup> و مابقی انرژی در گلبرگ‌های جانبی<sup>2</sup> قرار دارد. اگر سمت هدف معین بوده و امکان کنترل سمت فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد، تضعیف گلبرگ‌های جانبی و باریک بودن گلبرگ اصلی باعث افزایش برد و بهبود نسبت سیگنال به نویز خواهد شد [4]. از روی نمودار الگوی پرتو، پهنای پرتو<sup>3</sup> قابل محاسبه است. به این منظور باید یک کمان به شعاع 3 dB کمتر از نوک قله گلبرگ اصلی زد تا گلبرگ را در دو نقطه قطع کند (شکل 10). زاویه بین این دو نقطه، پهنای پرتو را در فرکانس مورد نظر نشان می‌دهد. پهنای پرتو زاویه‌ای است که در آن، بیشترین توان تشعشعی منتشر می‌گردد. هرچه این زاویه کوچکتر باشد، برد سیگنال ارسالی بیشتر است [11].

در شکل 11 برای اجتناب از طولانی‌شدن مطالب، الگوی پرتو فقط برای آرایه بدون پوشش و آرایه با پوشش‌های پلی‌اورتان و کورپرن نشان داده شده است. قسمت‌های مختلف شکل 11، در فرکانس تشدید آرایه که بالای هر شکل نوشته شده است، رسم شده‌اند. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که پهنای پرتو با وجود مواد پوشش‌دهنده مختلف تغییری ندارد و بودن یا نبودن لایه محافظ آرایه، تغییر زیادی در پهنای پرتو ایجاد نمی‌کند. میزان پهنای پرتو در آرایه‌ی با و بدون پوشش، 40° است. علاوه بر این، حجم گلبرگ جانبی برای هر چهار ماده بیشتر از حالت بدون پوشش است که نشان دهنده کاهش انرژی سیگنال خروجی از آرایه در حضور مواد پوشش‌دهنده آرایه می‌باشد.

### 3-4- توان تشعشعی کلی

شکل 12 نمودار توان تشعشعی کلی ( $P_{tot}$ ) آرایه در حضور مواد پوشش‌دهنده محافظ آرایه را نشان می‌دهد که بیانگر انرژی منتشر شده در محیط آب است. با توجه به شکل 12، توان تشعشعی کلی آرایه با وجود پوشش کمتر شده است و ماده لاسطیک سیلیکونی بیشترین توان تشعشعی آرایه و ماده نئوپرن کمترین توان را بدست می‌دهد. همچنین مشخص است که توان تشعشعی کلی در فرکانس تشدید هرکدام از مواد، بیشترین مقدار را دارد و اختلاف توان در فرکانس‌های دیگر بسیار زیاد است. این موضوع نشان می‌دهد که برای طراحی یک آرایه باید از فرکانس تشدید استفاده کرد و عملکرد آن را در این فرکانس در نظر گرفت [6].

<sup>1</sup> Main lobe  
<sup>2</sup> Side lobe  
<sup>3</sup> Beam width



جانبی الگوی پرتو آرایه در حالت آرایه با پوشش بیشتر از حالت بدون پوشش است که نشان دهنده کاهش انرژی سیگنال خروجی آرایه در حالتی است که از لایه محافظ برای آرایه استفاده می‌شود.

- وجود لایه محافظ آرایه باعث کاهش توان تشعشعی کلی آرایه نسبت به حالت بدون پوشش شده‌است؛ اما لاستیک سیلیکونی در بین این چهار ماده محافظ رایج، بیشترین توان تشعشعی آرایه را بدست می‌دهد.

در مجموع، با توجه به شبیه‌سازی انجام شده و بررسی مواد پوشش‌دهنده آرایه، می‌توان گفت لاستیک سیلیکونی در بین چهار ماده مورد بررسی در این پژوهش و با خواص عنوان شده، به علت داشتن حساسیت فرستندگی و گیرندگی زیاد و فرکانس تشدید و توان تشعشعی کلی بالاتر نسبت به دیگر مواد پوشش‌دهنده پر کاربرد مورد بحث، امتیازات بیشتری دارد و گزینه مناسبی برای طراحی و ساخت آرایه‌ها با لایه محافظ است.

## 5- مراجع

- [1] M. Bahadori, *An Introduction To Underwater Acoustics And SONAR Technology*, Tehran: Naghoos, 2014. (in Persian)
- [2] C. Sherman, J. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound (Underwater Acoustics)*, New York: Springer, 2007.
- [3] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, California: Peninsula Publishing, 1983.
- [4] A. D. Waite, *Sonar for Practicing Engineers*, Third Edition, New Jersey: John Wiley & sons, 2008.
- [5] B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, California: Peninsula Publishing, 1988.
- [6] J. F. Tressler, *Piezoelectric and Acoustic Material for Transducer Applications*, New York: Springer, 2008.
- [7] <http://www.comsol.com>, Last accessed 6 February, 2016.
- [8] O.C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, New York: McGraw-Hill, 1986.
- [9] V. Vadde, B. Lakshmi, *Characterization and FEM-based Performance Analysis of a Tonpilz Transducer for Underwater Acoustic Signaling Applications*, COMSOL Conference, Bangalore, 2011.
- [10] N. M. Nouri, H. R. Gharavian, A. Valipour, Simulation and optimization of Tonpilz transducer by FEM and comparing the results with electroacoustic tests, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 63-70, 2014 (In Persian)
- [11] D. Stansfield, *Underwater Electroacoustic Transducers*, California: Peninsula Publishing, 1991.
- [12] L. Qihu, *Digital Sonar Design in Underwater Acoustic*, New York: Springer, 1995.

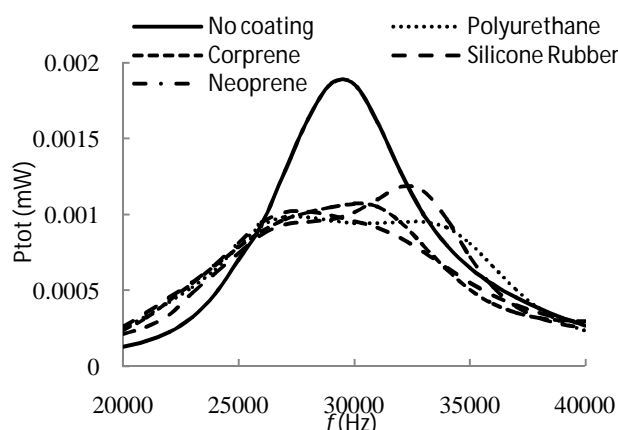


Fig. 12 The total radiation power of the simulated array in the presence of coating materials

شکل 12 توان تشعشعی کلی آرایه شبیه‌سازی شده در حضور مواد پوشش‌دهنده

## 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک آرایه سوناری فعال  $3 \times 3$  از ترانسدیسورهای تانپیلز در حضور مواد پوشش‌دهنده پر کاربرد پلی‌اورتان، کورپرن، لاستیک سیلیکونی و نئوپرن، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود کامسول مولتی‌فیزیک برای نخستین بار شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی که شامل خصوصیات مهم یک آرایه سوناری است مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این خصوصیات شامل حساسیت فرستندگی، حساسیت گیرندگی، الگوی پرتو و توان تشعشعی کلی آرایه است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، نتایج زیر از این تحقیق قابل بیان است:

- مقدار بیشینه حساسیت فرستندگی آرایه با وجود مواد پوشش‌دهنده محافظ، نزدیک به یکدیگر است و تفاوت زیادی مشاهده نمی‌شود ولی وجود پوشش، حساسیت فرستندگی را نسبت به آرایه بدون پوشش کاهش می‌دهد. بیشترین و کمترین کاهش در حساسیت فرستندگی را به ترتیب ماده نئوپرن به اندازه 1/4% و ماده لاستیک سیلیکونی به اندازه 1/0% نشان می‌دهد. مقدار فرکانس تشدید آرایه با وجود لایه محافظ پلی‌اورتان و نئوپرن 10% کاهش و با وجود لاستیک سیلیکونی، 6/7% افزایش یافته است. وجود لایه کورپرن به‌عنوان لایه محافظ آرایه، تأثیری بر فرکانس تشدید ندارد.

- وجود پوشش محافظ، حساسیت گیرندگی و فرکانس ضد تشدید آرایه را نسبت به حالت بدون پوشش، کاهش می‌دهد.

- پهنای باند فرکانسی آرایه، در حضور مواد پوشش‌دهنده افزایش پیدا کرده‌است و ماده نئوپرن بیشترین افزایش در پهنای باند به اندازه 55/6% را نشان می‌دهد.

- وجود پوشش محافظ در مقدار پهنای پرتو آرایه بی تأثیر است ولی الگوی پرتو آرایه را تغییر می‌دهد. حجم گلبرگ‌های