



شبیه‌سازی و بهبود عملکرد ترانسدیوسر تانپیلز به روش اجزاء محدود و مقایسه آن با نتایج عملی تست‌های الکتروآکوستیکی

نوروز محمد نوری^{۱*}، حمید رضا غرویانی^۲، علی ولی‌پور چهارده چریک^۳

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*mnouri@iust.ac.ir، 1684813114، صندوق پستی

چکیده

آکوستیک زیرآبی، به علت کاربردهای زیادی که دارد، به موضوعی پراهمیت برای محققان بدل شده است. چیدمانی از ترانسدیوسرهای الکتروآکوستیکی، که آرایه نامیده می‌شود، به عنوان ابزارهای فرستنده و گیرنده امواج صوتی در زیر آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. پرکاربردترین ترانسدیوسر مورد استفاده در آرایه‌ها، ترانسدیوسر تانپیلز است. برای طراحی و تحلیل این ترانسدیوسرها می‌توان از روش‌های مختلف تحلیلی یا حل عددی استفاده کرد. در این مقاله تلاش شده با استفاده از مدل اجزاء محدود، رفتار این ترانسدیوسر به‌طور کامل شبیه‌سازی شده و مهم‌ترین پارامترهای سنجش عملکرد آن مورد بررسی قرار گیرند. همچنین، برای صحت سنجی مدل اجزاء محدود، نمونه این ترانسدیوسر نیز ساخته شده و مورد تست‌های الکتروآکوستیکی قرار می‌گیرد. با مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی شده با مدل تست شده، مشاهده می‌شود که مدل اجزاء محدود می‌تواند رفتار الکتریکی و آکوستیکی ترانسدیوسر را به‌خوبی پیش‌بینی کند. ضمن اینکه افزودن عوامل میراکننده به سیستم می‌تواند باعث افزایش پهنای باند فرکانسی شود. در نهایت سعی شده تا با ایجاد تغییراتی در ساختار ترانسدیوسر، پاسخ فرکانسی آن‌ها تا حد امکان بهبود داده شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۲
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۳
ارائه در سایت: ۰۲ مهر ۱۳۹۳
کلیدواژه‌ها:
ترانسدیوسر تانپیلز
تست‌های الکتروآکوستیکی
شبیه‌سازی اجزاء محدود
پاسخ فرکانسی
پاسخ ولتاژ ارسالی

Simulation and optimization of Tonpilz transducer by FEM and comparing the results with electroacoustic tests

Nowrouz Mohammad Nouri^{1*}, Hamid Reza Gharavian², Ali Valipour³

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
P.O.B. 1684613114 Tehran, mnouri@iust.ac.ir*

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 February 2014
Accepted 10 May 2014
Available Online 24 September 2014

Keywords:
Tonpilz Transducer
Electroacoustic Tests
Finite Element Simulation
Frequency Response
Transmit Voltage Response

ABSTRACT

Systems of recognition and location identification of underwater moving bodies which using acoustic waves are called sonar. Electroacoustic transducers have an important role in underwater communication systems such as Sonar. A set of electroacoustic transducers which is called sonar array, can be used for sending and receiving underwater sound. The most widely used transducer in these arrays are Tonpilz transducer. In this paper, a full simulation of Tonpilz transducer is given and the most important factors for evaluating transducer performance are checked experimentally and numerically. Also for validation of finite element model, the sample of transducer was designed and made. This transducer was tested in two methods, electrically and acoustically. Electrical behavior was tested by Impedance gain analyzer devise. Acoustic test was carried in the acoustic pool. Then the result of FEM compared with experimental results. With comparing FEM results and tested model, it is observed that the finite element model can predict electrical and acoustical behavior of Tonpilz transducer so well. Finally it is tried to improve frequency response of transducer with making changes in the structure. While the addition of damping factors can increase frequency bandwidth.

۱- مقدمه

اهمیت زیادی دارد. سیستم‌های سونار، سیستم‌های ردیابی و موقعیت سنجی در زیر آب هستند [۱،۲]. در این سیستم‌ها از امواج آکوستیکی برای ارتباط استفاده می‌شود. ترانسدیوسرهای الکتروآکوستیکی فرستنده‌ها و گیرنده‌های زیرآبی این امواج هستند [۳]. یکی از پرکاربردترین انواع این ترانسدیوسرها،

حدود ۷۵ درصد از مساحت کره زمین را آب تشکیل داده است. طبیعی است که با توجه به این سطح عظیم از دریاها و اقیانوس‌ها، ارتباطات زیرآبی

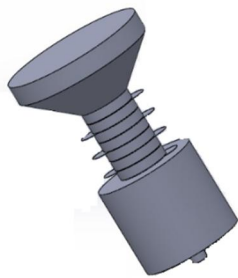
در تحقیق حاضر سعی شده تا رفتار فرکانسی یک نمونه ترانس‌دیوسر تانپیلز به‌طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور تلاش برای مدل‌سازی تمام جزئیاتی که در واقعیت وجود دارد و امکان بررسی این جزئیات در مدل‌های تحلیلی وجود ندارد، ضروری است. پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود، مدل واقعی ترانس‌دیوسر نمونه، ساخته شده و مورد تست‌های الکتروآکوستیکی قرار گرفته است. در نهایت نیز راه‌هایی برای بهبود پاسخ ترانس‌دیوسر و دستیابی به مشخصات مطلوب ارائه شده است. این بهبود بخشیدن شامل جابه‌جا کردن فرکانس رزونانس، افزایش پهنای باند فرکانسی و بهبود فرستندگی ترانس‌دیوسر است. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر پیش‌بینی عملکرد یک ترانس‌دیوسر تانپیلز با استفاده از مدل اجزاء محدود و معتبرسازی آن براساس نتایج، تست نمونه ساخته شده و نیز ارائه راه‌کارهایی برای بهبود پاسخ فرکانسی آن است.

2- ترانس‌دیوسر تانپیلز

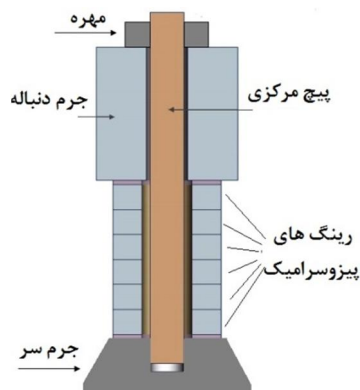
ترانس‌دیوسرهای تانپیلز از بخش‌های اصلی جرم سر، جرم دنباله، رینگ یا دیسک‌های پیروزرامیک و پیچ نگه‌دارنده ساخته شده‌اند. اجزای دیگری نظیر الکترودهای فلزی، چسب، عایق‌های لاستیکی و غیره نیز ممکن است برحسب نیاز در ساختار این ترانس‌دیوسرها مورد استفاده قرار گیرد. شکل 1 نمای کلی از یک ترانس‌دیوسر تانپیلز را نشان می‌دهد.

شکل 2 نمای برش خورده ترانس‌دیوسر تانپیلز را نشان می‌دهد. اجزای مختلف یک ترانس‌دیوسر تانپیلز و نحوه قرار گرفتن آن‌ها در کنار یکدیگر در شکل 2 قابل ملاحظه است.

مطابق شکل 2، برای مونتاژ یک ترانس‌دیوسر تانپیلز، ابتدا چند رینگ پیروزرامیک به‌صورت هم‌مرکز روی هم قرار داده می‌شوند. برحسب نیاز بین رینگ‌های پیروزرامیک از الکترودهای فلزی یا لایه‌های دیگر استفاده می‌شود. جرم سر و جرم دنباله در جلو و عقب رینگ‌ها قرار می‌گیرند. سپس،



شکل 1 شماتیک ترانس‌دیوسر تانپیلز مدل شده در نرم‌افزار نقشه‌کشی



شکل 2 نمایی از یک ترانس‌دیوسر تانپیلز

ترانس‌دیوسرهای تانپیلز هستند. تانپیلز واژه‌ای با ریشه‌ای آلمانی است که به شکل قارچی این ترانس‌دیوسرها اشاره دارد. ترانس‌دیوسرهای تانپیلز، عموماً با فرکانس رزونانس، پهنای باند فرکانسی، پاسخ ولتاژ ارسالی و پارامترهایی از این دست شناخته می‌شوند [4]. روش‌های مختلفی برای طراحی و تحلیل این ترانس‌دیوسرها وجود دارد. این روش‌ها به‌طور کلی به دو گروه روش‌های تحلیلی و روش‌های حل عددی تقسیم می‌شوند. معمولاً، در یک الگوریتم طراحی استاندارد، طراحی با توجه به یک یا چند پارامتر مطلوب مانند فرکانس رزونانس و پهنای باند فرکانسی و با استفاده از مدل‌های ساده و یک بعدی تحلیلی شروع می‌شود. مزیت این کار به‌دست آوردن ابعاد تقریبی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده ترانس‌دیوسر تانپیلز در یک زمان کوتاه است [5,6]. در یک مدل پارامتر متمرکز متداول، یک ترانس‌دیوسر تانپیلز به‌صورت مدل جرم و فنر شکل مدل می‌شود. سپس، با استفاده از روابط ارتعاشاتی و معلوم بودن فرکانس رزونانس (فرکانس طراحی) سیستم، می‌توان ابعاد بخش‌های اصلی ترانس‌دیوسر را محاسبه نمود [7]. مدل مدار الکتریکی معادل، یک مدل یک‌بعدی دیگر است. این مدل شباهت زیادی با مدل پارامتر متمرکز دارد. تفاوت این دو روش در آن است که در روش مدار الکتریکی معادل، از عناصر الکتریکی و قوانین مدار برای تحلیل رفتار سیستم استفاده می‌شود [8]. مدل شرم و بوتلر یکی از مدل‌های متداول ارائه شده با استفاده از مدارهای الکتریکی برای یک ترانس‌دیوسر تانپیلز است [9]. مدل‌های ماتریسی، روش دوبعدی تحلیل ترانس‌دیوسرهای الکتروآکوستیکی هستند؛ یعنی، علاوه بر مدهای رزونانسی ضخامتی، مدهای شعاعی را هم مورد بررسی قرار می‌دهند [10]. اولاً به کمک مدل ماتریسی، یک دیسک استوانه‌ای پیروزالکتریک را برای اولین بار مورد بررسی قرار داد [11]. در یک مدل ارتقاء یافته نسبت به این مدل، مانچینگ مدل ماتریسی را ارائه نمود که هم مواد پیروزالکتریک و هم مواد ایزوتروپیک را برای رینگ‌های استوانه‌ای و دیسک در بر می‌گرفت [12]. بزرگ‌ترین عیب مدل‌های تحلیلی این است که با بالا رفتن پیچیدگی‌های ساختاری مدل عملاً استفاده از آن‌ها غیرممکن می‌شود.

پیدایش روش اجزاء محدود به حل مسائل پیچیده الاستیسیته و تحلیل سازه‌ها در مهندسی عمران و هوافضا برمی‌گردد. اجزاء محدود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است [13,14]. با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری ترانس‌دیوسرهای تانپیلز و محدودیت‌های موجود در روش‌های مدل‌سازی تحلیلی، استفاده از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی این المان‌ها اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی پیشرفت‌های حاصله در پردازشگرهای کامپیوتری نیز عامل تشویق‌کننده دیگری برای استفاده از این روش است.

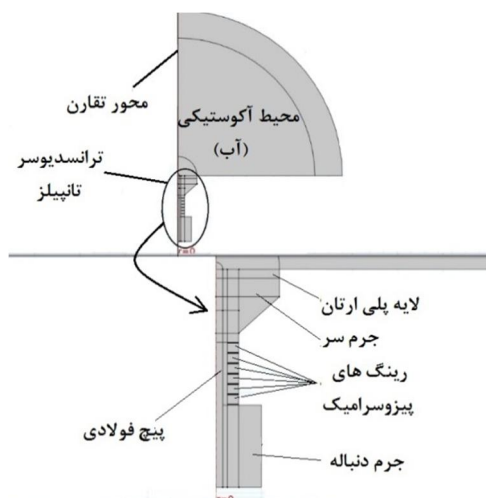
تست‌های الکتروآکوستیکی ترانس‌دیوسر تانپیلز برای ارزیابی و تعیین عملکرد یک ترانس‌دیوسر تانپیلز مورد استفاده قرار می‌گیرند [15]. همان‌گونه که از نام این تست‌ها بر می‌آید، می‌توان آن‌ها را به دو گروه تست‌های الکتریکی و تست‌های آکوستیکی تقسیم کرد. تست‌های الکتریکی عمدتاً به بررسی خواص الکتریکی و مکانیکی ذاتی ترانس‌دیوسر مانند فرکانس رزونانس آن می‌پردازند، اما در تست‌های آکوستیکی، انتشار موج صوتی از ترانس‌دیوسر و کیفیت این انتشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر دو گروه این تست‌ها در شناسایی کامل رفتار یک ترانس‌دیوسر الکتروآکوستیکی اهمیت دارند، در عین حال تست‌های آکوستیکی که ناظر بر رفتار انتشاری ترانس‌دیوسر هستند از اهمیت بیشتری برخوردارند.

پیچ مورد استفاده در مدل باید دارای طولی باشد که بتواند تمام اجزا را در بر گرفته و در انتهای آن نیز مهره بسته شود. در این پژوهش از پیچ M_3 استفاده شده است. اثر سوراخکاری پیچ در قطعات جرم سر و جرم دنباله در شکل‌های 4 و 5 قابل مشاهده است.

3- شبیه‌سازی به کمک مدل اجزاء محدود

روش اجزاء محدود توسط تورنر در سال 1956 ارائه شد [17]. اساس روش اجزاء محدود بر تقسیم کردن مساله به تعداد محدودی از المان‌ها و ترکیب جواب‌های آن‌ها برای دستیابی به جواب مساله اصلی است [18]. این مدل می‌تواند جامع‌ترین و بهترین روش برای شبیه‌سازی ترانس‌دیوسرهای الکتروآکوستیکی باشد، چرا که، علاوه بر دقت بالا، امکان مدل‌سازی کامل تمام جزئیات موجود در مدل واقعی را فراهم می‌کند. شکل 6 نمایی از مدل ترسیم شده در نرم‌افزار اجزاء محدود را نشان می‌دهد.

شکل 6 ترانس‌دیوسر تانپیلز شبیه‌سازی شده با 6 رینگ پیروسرامیک را در نرم‌افزار اجزاء محدود نشان می‌دهد. این مدل یک مدل دوبعدی با تقارن محوری است که در مقایسه با یک مدل سه‌بعدی تعداد مش بسیار کمتری دارد و حل آن بسیار سریع‌تر انجام می‌شود. قسمت بالایی شکل 6 محیط آکوستیکی اطراف ترانس‌دیوسر و قسمت پایین شکل 6 خود ترانس‌دیوسر را با بزرگنمایی نشان می‌دهد. بخش‌های مختلف ترانس‌دیوسر در شکل نام‌گذاری شده‌اند. در بین رینگ‌های پیروسرامیک، الکترودهای مسی و لایه‌های پلی-استر قرار گرفته‌اند. در سطح خارجی جرم سر و در محل تماس با محیط آکوستیکی، یک لایه نازک پلی‌ارتان نیز مدل شده است. در پروسه شبیه‌سازی، ابتدا مشخصات کلی حل مساله انتخاب می‌شود. در این بخش حوزه حل (حوزه فرکانس یا زمان)، چند بعدی بودن مساله (دوبعدی یا سه‌بعدی) و غیره تعریف می‌شوند. با توجه به روابط موجود و خروجی‌های مد نظر، حل در حوزه فرکانس صورت می‌گیرد. سپس، هندسه کلی ترانس‌دیوسر تانپیلز معرفی و بخش‌های مختلف ترانس‌دیوسر ترسیم می‌شوند. انتخاب و تعیین جنس مواد قسمت‌های مختلف ترانس‌دیوسر گام بعدی است. سپس، نوبت به مش‌زنی می‌رسد. برای هندسه‌های دوبعدی بهتر است از مش دانه‌مربعی استفاده شود. اندازه هر المان نیز با سرعت صوت و فرکانس کاری ارتباط دارد [19]. در گام بعدی عملکرد ترانس‌دیوسر تانپیلز در یک بازه فرکانسی معلوم با گام مشخص مورد بررسی قرار داده می‌شود. در نهایت خروجی‌های مورد نظر استخراج



شکل 6 شکل شماتیک محیط آکوستیکی و ترانس‌دیوسر تانپیلز مدل شده در نرم‌افزار اجزاء محدود

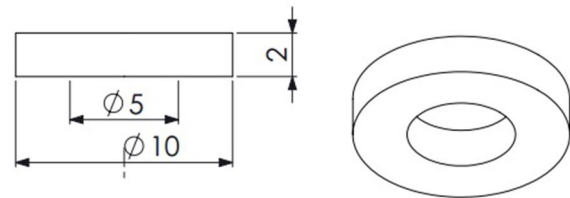
مجموعه به کمک یک پیچ به هم سفت می‌شود. پیچ از یک سمت تا حدود نیمی از عمق جرم سر پیشروی کرده و از طرف دیگر در بیرون جرم دنباله با یک مهره سفت می‌شود.

1-2- اجزاء به کار رفته در ترانس‌دیوسر تانپیلز نمونه

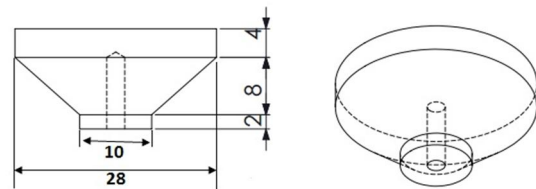
ترانس‌دیوسر مورد نظر در تحقیق حاضر، براساس یک فرکانس رزونانس کاری دلخواه، دارای اجزایی با مشخصات زیر است. مطابق شکل 3 از رینگ پیروسرامیکی با ابعاد شعاع خارجی 5mm، شعاع داخلی 2.5mm و ضخامت 2mm استفاده شده است. جنس رینگ پیروسرامیک PZT8 است. خواص الکتریکی و مکانیکی این رینگ در [16] ارائه شده است.

شایان ذکر است که انتخاب تعداد رینگ‌های پیرو سرامیک به فرکانس کاری مورد نظر مرتبط است. تعداد رینگ‌ها معرف یک طول برآیند از رینگ‌ها است. این طول برآیند باید به اندازه‌ای باشد که فرکانس رزونانس مد ضخامتی مرتبط با آن از مرتبه فرکانس رزونانس مطلوب برای کل سیستم شود. در مقاله حاضر و با توجه به فرکانس رزونانسی مطلوب 25 کیلوهرتز، از 6 رینگ پیروسرامیک استفاده شده است.

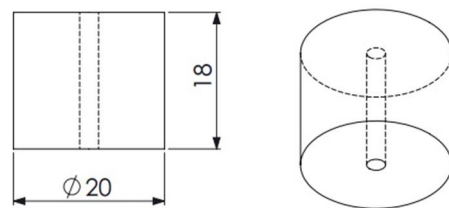
در اکثر مدل‌های متداول، برای جرم سر به فرم یک مخروط ناقص در نظر گرفته می‌شود، شکل 4 نمای شماتیکی از جرم سر مدل شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل جرم سر مخروطی است که شعاع در قسمت تماس با رینگ‌های پیروسرامیک کم بوده و در قسمت فوقانی زیاد می‌شود. شعاع سطح خارجی با توجه به فرکانس رزونانس و سرعت صوت در محیط آکوستیکی محاسبه می‌شود. جنس این عضو آلومینیوم 6061 است. به‌طور معمول قسمت جرم دنباله به‌صورت یک استوانه در نظر گرفته می‌شود. از این رو و با توجه به جنس‌های انتخاب شده، بایستی ابعادی برای جرم دنباله در نظر گرفته شود که جرم آن حدوداً 3 تا 4 برابر جرم سر باشد. نمای شماتیکی از جرم دنباله مدل شده در شکل 5 نشان داده شده است. جنس این قطعه فولاد ابزار است.



شکل 3 رینگ پیروسرامیک مورد استفاده



شکل 4 جرم سر آلومینیومی



شکل 5 جرم دنباله فولادی

جهت‌مندی و توان آکوستیکی نیز به‌درستی محاسبه شوند، دو رابطه (4) و (5) مقادیر مشابهی برای پاسخ ولتاژ ارسالی به‌دست می‌دهند. روابط محاسبه جهت‌مندی و توان آکوستیکی در مرجع [7] ارائه شده است.

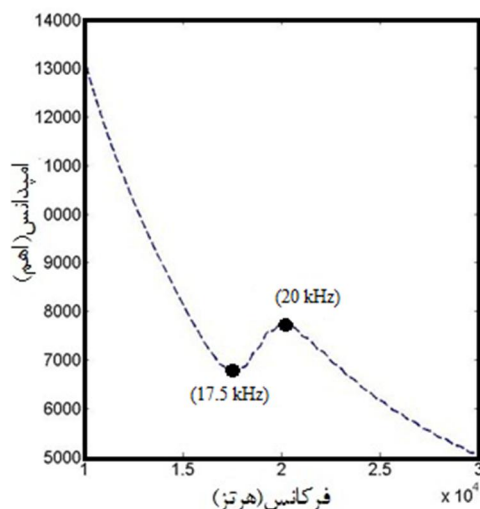
3-2- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود برای ترانسدیوسر تانپیلز که در قسمت‌های قبلی معرفی شد انجام می‌شود. عنوان شد که مهم‌ترین فاکتورهای سنجش عملکرد ترانسدیوسر تانپیلز در این پژوهش امپدانس الکتریکی و پاسخ ولتاژ ارسالی هستند. به‌همین منظور، در ادامه نمودار این دو کمیت به‌صورت تابعی از فرکانس ترسیم شده است. شکل 7 امپدانس الکتریکی ترانسدیوسر تانپیلز را به‌صورت تابعی از فرکانس نشان می‌دهد.

در شکل 7، امپدانس الکتریکی با واحد اهم نشان داده شده است. علت این امر هم این است که در کار آزمایشگاهی نتایج برای امپدانس الکتریکی به‌صورت اهم گزارش می‌شوند. بازه فرکانسی 10kHz تا 30kHz به‌عنوان بازه حل مساله انتخاب شده است. مشاهده می‌شود که کمینه امپدانس الکتریکی در فرکانسی نزدیک به 17.5kHz و بیشینه آن در فرکانسی نزدیک به 20kHz رخ داده است. این فرکانس‌ها به‌ترتیب مبین فرکانس‌های رزونانس و آنتی رزونانس هستند. در این بازه فرکانسی هیچ مد رزونانسی دیگری مشاهده نمی‌شود.

شکل 8 پاسخ ولتاژ ارسالی را نشان می‌دهد. بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی و فرکانس رخ دادن آن به کمک ترسیم خطوط افقی و عمودی مشخص شده‌اند. انتظار می‌رود که بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی در فرکانس رزونانس رخ داده باشد. بین فرکانس رخ دادن بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی و کمترین امپدانس الکتریکی تفاوت کمی مشاهده می‌شود. این تفاوت می‌تواند به‌علت متفاوت بودن بازده‌های الکتریکی و آکوستیکی ترانسدیوسر باشد [6]. بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی نیز در حدود 132dB است. تحلیل کامل این نمودار در کنار نتایج تست‌های آکوستیکی ارائه می‌شود.

با توجه به محیط گرافیکی نرم‌افزار اجزاء محدود، می‌توان خروجی‌هایی را به تغییر شکل اجزاء، موج آکوستیکی تولیدی، میدان الکتریکی ایجاد شده در پیروزوسرامیک‌ها و غیره مشاهده کرد. شکل 9 جابه‌جایی اجزاء ترانسدیوسر تانپیلز را در فرکانس رزونانس ترانسدیوسر نشان می‌دهد.



شکل 7 نمودار امپدانس الکتریکی (اهم) برحسب فرکانس ترانسدیوسر تانپیلز

می‌شوند. مهم‌ترین خروجی‌های مد نظر امپدانس الکتریکی ورودی و پاسخ ولتاژ ارسالی هستند.

3-1- پارامترهای سنجش عملکرد مدل شبیه‌سازی شده در مدل اجزاء محدود

ترانسدیوسرهای تانپیلز معمولاً برای کار در یک بازه فرکانسی طراحی می‌شوند. ترانسدیوسرها در این بازه بهترین عملکرد ارسال و دریافت موج صوتی را دارند. بهترین فرکانس کاری این ترانسدیوسرها، فرکانس رزونانس آنها است. فرکانس رزونانس، فرکانسی است که در آن امپدانس الکتریکی ورودی کمترین مقدار خود را دارد [20,21]. اثرات رفتارهای مکانیکی و بارگذاری آکوستیکی در امپدانس الکتریکی مستتر است. از طرف دیگر ترانسدیوسر طراحی شده بایستی شدت صوت مورد نظر را نیز تامین کند. معیار استاندارد برای اندازه‌گیری شدت صوت این ترانسدیوسرها، پاسخ ولتاژ ارسالی است. پاسخ ولتاژ ارسالی یک فرستنده، از فشار اندازه‌گیری شده در فاصله 1 متری آن قابل حصول است [22,23]. در این پژوهش از دو معیار فرکانس رزونانس و پاسخ ولتاژ ارسالی به‌عنوان پارامترهای سنجش عملکرد ترانسدیوسر تانپیلز استفاده شده است. امپدانس الکتریکی به‌صورت نسبت ولتاژ به جریان در ترمینال‌های الکتریکی ورودی تعریف می‌شود. به بیان ساده، می‌توان رابطه (1) را نوشت:

$$Z_{ul} = \frac{V}{I} \quad (1)$$

در رابطه (1)، Z_{ul} امپدانس الکتریکی ورودی، V ولتاژ اعمال شده و I جریان ایجاد شده در ترانسدیوسر است. یعنی با اعمال یک ولتاژ معلوم به ترانسدیوسر و اندازه‌گیری جریان به‌وجود آمده، امپدانس الکتریکی ورودی محاسبه می‌شود. این روشی است که در تست به کمک دستگاه تحلیل‌کننده امپدانس نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ترسیم امپدانس الکتریکی ورودی به‌صورت تابعی از فرکانس، فرکانس‌های رزونانس و آنتی رزونانس پیدا می‌شوند. فرکانس‌های رزونانس نقاط مینیمم و فرکانس‌های آنتی رزونانس نقاط ماکزیمم نمودار فوق‌الذکر هستند.

همچنین، پاسخ ولتاژ ارسالی عبارت از فشار در فاصله 1 متری فرستنده به‌ازای ولتاژ 1 ولت بوده که با توجه به فشار مرجع برای محیط (برای آب 1μPa و برای هوا 20μPa) محاسبه می‌شود. پاسخ ولتاژ ارسالی به‌صورت رابطه (2) تا (4) تعریف می‌شود [7]:

$$TVR = 20 \log \left(\frac{A_{rms}}{A_{ref}} \right) \quad (2)$$

$$A_{rms} = \frac{(1\mu Pa)(1V)}{1m} \quad (3)$$

$$A_{rms} = \frac{(P_{rms})(V_{rms})}{r_{measured}} \quad (4)$$

در برخی از مراجع نیز، پاسخ ولتاژ ارسالی به‌صورت رابطه (5) تعریف شده است [7]:

$$TVR = 170.8dB + 10 \log_{10} W_a + DI \quad (5)$$

در رابطه (5) جمله 170.8dB متناظر با فشار 1μPa و در فاصله یک متری از فرستنده، DI اندیس جهت‌مندی و W_a توان آکوستیکی است. در صورتی که از ولتاژ تحریک یک ولت استفاده شود و فاکتورهای اندیس



شکل 11 جرم دنباله فولادی (سمت راست) و رینگ پیزوسرامیک (سمت چپ)



شکل 12 پیچ M_3 تمام رزوه فولادی خشکه



شکل 13 ترانسدیوسر تانپیلز با ورق‌های پلی استر

علاوه بر قطعات بالا که تصویر آن‌ها نیز مشاهده می‌شود، چند قسمت دیگر نیز در ترانسدیوسر ساخته شده که به شرح زیر هستند:

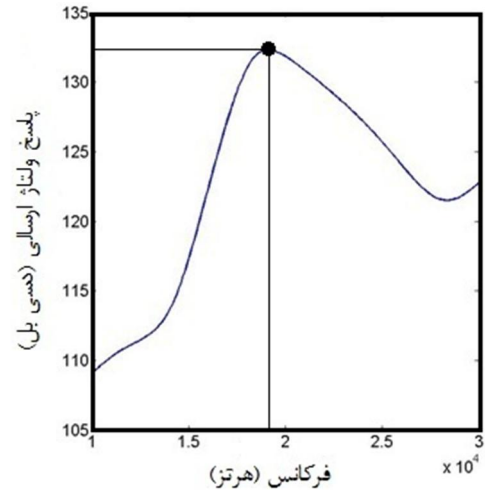
- 1- الکتروود: الکتروود از ورق مسی با ضخامت 80 میکرون انتخاب شده و سطح مقطعی برابر با رینگ پیزو دارد. سعی شده با دادن زائده‌ای به کنار این الکتروود، محلی برای لحیم‌کاری نیز در نظر گرفته شود.
- 2- ورق پلی‌استر: دارای سطح مقطعی مشابه رینگ پیزو و ضخامت 120 میکرون است که بین رینگ‌های پیزوسرامیک قرار می‌گیرد.
- 3- پوشش پلی‌ارتان: این پوشش لایه‌ای به ضخامت حدود 2 میلی‌متر است که به صورت یک استوانه نازک روی قسمت جرم سر قرار می‌گیرد. هدف از استفاده از این لایه نیز انطباق آکوستیکی بهتر است.

5- معرفی تست‌های الکتروآکوستیکی

تست‌های تجربی انجام شده برای ترانسدیوسر تانپیلز در دو دسته تست‌های الکتریکی و تست‌های آکوستیکی قرار می‌گیرند. تست‌های الکتریکی به کمک دستگاه تحلیل‌گر بهره امپدانس انجام شده و منحنی امپدانس الکتریکی ترانسدیوسر و به تبع آن فرکانس‌های رزونانس و آنتی رزونانس آن را معلوم می‌کنند. تست‌های آکوستیکی بایستی در حوضچه‌هایی که از ابعاد مناسب برای تست برخوردار است انجام شده و برای انجام این تست‌ها نیاز به هیدروفون کالیبره شده، فیلتر بالا گذر، اسیلوسکوپ، منبع ولتاژ DC، تولید کننده سیگنال و آمپلی فایر است. در ادامه تجهیزات به کار رفته در هر تست و نتایج به دست آمده مورد ارزیابی قرار داده شده‌اند.

5-1- تست‌های الکتریکی

تست‌هایی هستند که در آن‌ها تنها پاسخ الکتریکی و مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تست‌های الکتریکی عمدتاً به کمک دستگاه آنالیزکننده امپدانس انجام می‌شوند.

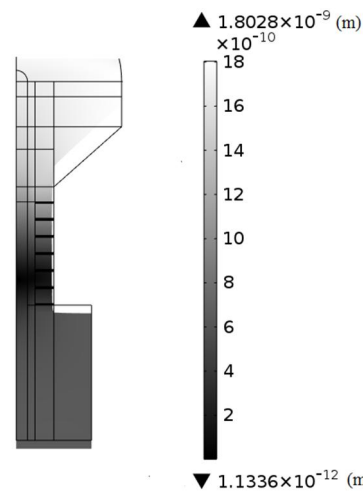


شکل 8 نمودار پاسخ ولتاژ ارسالی بر حسب فرکانس ترانسدیوسر تانپیلز

مشخص است که در فرکانس رزونانس، جابه‌جایی‌های مختلف تشکیل‌دهنده ترانسدیوسر تانپیلز بسیار مناسب است. به عبارت دیگر، قسمت جرم دنباله کمترین جابه‌جایی و قسمت جرم سر نیز بیشترین جابه‌جایی را دارند. گویی ترانسدیوسر به‌طور یکنواخت از سمت جرم سر کشیده شده است. به همین علت است که مطلوب است تا ترانسدیوسرهای الکتروآکوستیکی در فرکانس رزونانس خود کار کنند. میزان جابه‌جایی اجزاء مختلف نیز از مرتبه نانو است.

4- مدل ساخته شده برای تست‌های الکتروآکوستیکی

در این قسمت، قطعات بخش‌های مختلف ترانسدیوسر مطابق با ترانسدیوسر مدل شده در نرم‌افزار اجزاء محدود، ساخته شده و تصاویر آن‌ها در شکل‌های 10 تا 13 به نمایش در می‌آیند.



شکل 9 جابه‌جایی کل اجزاء ترانسدیوسر تانپیلز در فرکانس رزونانس



شکل 10 دو نما از جرم سر آلومینیومی

و با پردازش می‌توان پارامترهای مختلف مورد نیاز را به‌دست آورد.

6- نتایج تست‌ها

در این قسمت، نتایج تست‌های انجام شده بر روی ترانسدیوسر ساخته شده در دو گروه تست الکتریکی و تست آکوستیکی ارائه می‌شود.

6-1- نتایج تست الکتریکی

در این بخش نمودار امیدانس الکتریکی به‌دست آمده توسط تست الکتریکی برای ترانسدیوسر تانپیلز ارائه می‌شود. این تست به کمک دستگاه آنالیز کننده امیدانس انجام شده است. با انتخاب بازه فرکانسی مورد نظر و همچنین گام فرکانسی، می‌توان نمودار امیدانس الکتریکی را به‌دست آورد. در شکل 16، امیدانس الکتریکی در بازه فرکانسی 10kHz تا 30kHz و با گام فرکانسی 100Hz توسط دستگاه رسم شده است. تلاش شده تا شرایط مختلف تست نظیر ولتاژ تحریک الکتریکی، شرایط محیط آکوستیکی و غیره مشابه با شرایط به‌کار رفته در شبیه‌سازی است.

در شکل 16، محل رخ دادن کمینه و بیشینه امیدانس الکتریکی مشخص شده است. فرکانسی که در آن کمینه امیدانس الکتریکی وجود دارد نیز در سمت بالای شکل 16 نمایش داده شده است. مشخص است که کمترین مقدار امیدانس الکتریکی در حدود فرکانس 16.9kHz رخ می‌دهد. همانند شبیه‌سازی، هیچ مد رزونانسی دیگری در این بازه مشاهده نمی‌شود. جدول 1 نتایج تست الکتریکی و شبیه‌سازی را در کنار هم نشان می‌دهد.

با مقایسه فرکانس رزونانس به‌دست آمده از مدل اجزاء محدود که حدود 17.5kHz بود با فرکانس رزونانس به‌دست آمده از تست تجربی مشخص می‌شود که خطای مدل‌سازی انجام شده برای این نمونه حدود 3.5% است. این یعنی که دقت مدل‌سازی انجام شده مطلوب و رضایت بخش است. از مدل‌های تحلیلی انتظار می‌رود که فرکانس رزونانس ترانسدیوسر فوق‌الذکر در حدود 20 تا 22 کیلوهرتز باشد. این مطلب بیانگر این است که در صورت استفاده از مدل‌های تحلیلی در هندسه‌های پیچیده، به‌علت دشوار بودن مدل‌سازی کامل تمام جزئیات، دقت این مدل‌ها به‌شدت کم می‌شود.

6-2- نتایج تست آکوستیکی

قبلاً اشاره شد که تست‌های آکوستیکی مهم‌ترین تست‌های سنجش عملکرد



شکل 16 منحنی امیدانس الکتریکی برحسب فرکانس

جدول 1 مقایسه نتایج تست الکتریکی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

خطای مدل‌سازی (%)	فرکانس رزونانس تست تجربی (kHz)	فرکانس رزونانس مدل اجزاء محدود (kHz)
3/5	16/9	17/5

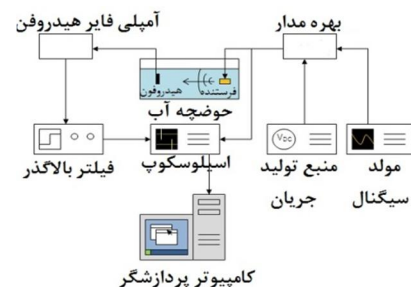
شکل 14 دستگاه آنالیزکننده امیدانس را نشان می‌دهد [24]. برای تست کافی است تا دو فیش دستگاه به دو سر ترمینال‌های مثبت و منفی ترانسدیوسر وصل شود. هدف اصلی دستگاه فوق ارزیابی مقاومت داخلی یک ترانسدیوسر در یک بازه فرکانسی خاص است. بدین منظور دستگاه با ارسال یک پالس، جریان خروجی روی ترمینال‌های ترانسدیوسر را اندازه‌گیری کرده و به کمک این ولتاژ و جریان، امیدانس ترانسدیوسر را در یک بازه فرکانسی ترسیم می‌کند. مهم‌ترین خروجی مورد نظر در این قسمت منحنی امیدانس الکتریکی و به تبع آن، فرکانس رزونانس سیستم است.

5-2- تست‌های آکوستیکی

در سنجش عملکرد یک ترانسدیوسر الکتروآکوستیکی، تست‌های آکوستیکی اهمیت زیادی دارند. برخلاف تست‌های الکتریکی، برای انجام تست‌های آکوستیکی نیاز به تجهیزات و امکانات بیشتری است. شکل 15 به‌صورت شماتیک حلقه‌کاری اجزاء تست آکوستیکی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطابق شکل 15، برای انجام تست‌های آکوستیکی نیاز به یک حوضچه آب، یک هیدروفون کالیبره شده، یک فیلتر بالاگذر، یک اسپلوسکوپ، یک منبع ولتاژ DC، یک تولیدکننده سیگنال و غیره تشکیل شده است. سیستم بالا می‌تواند برای سنجش عملکرد یک ترانسدیوسر چه به‌صورت یک گیرنده و چه به‌صورت یک فرستنده مورد استفاده قرار گیرد. برای تست در حالت فرستندگی، ترانسدیوسر تانپیلز در آب قرار گرفته و یک هیدروفون استاندارد کالیبره شده، که در این تست هیدروفون B&K8103 است، نیز به‌عنوان گیرنده در یک فاصله استاندارد از آن قرار می‌گیرد [25]. پس از قرار گرفتن فرستنده و گیرنده در فاصله یک متری از یکدیگر، با ارسال یک موج سینوسی با دامنه تحریک مشخص به فرستنده، ارسال موج در یک بازه فرکانسی صورت می‌گیرد. همزمان هیدروفون نیز تغییرات فشار به وجود آمده ناشی از انتشار موج را دریافت می‌کند. سپس، این سیگنال به یک کامپیوتر رفته

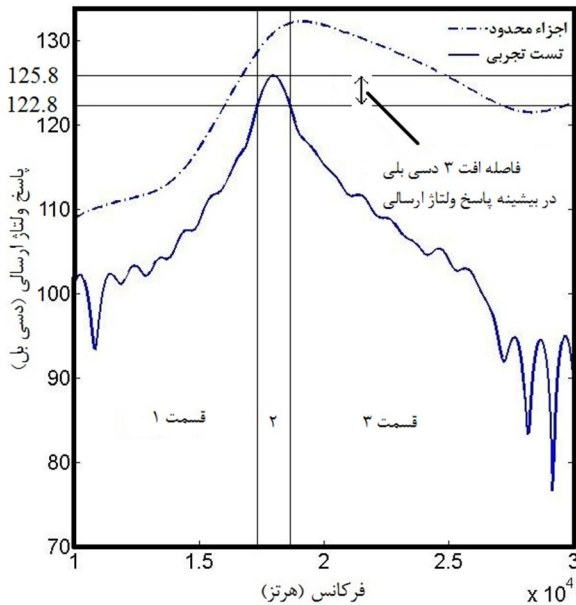


شکل 14 دستگاه تحلیلگر بهره امیدانس



کامپیوتر پردازشگر

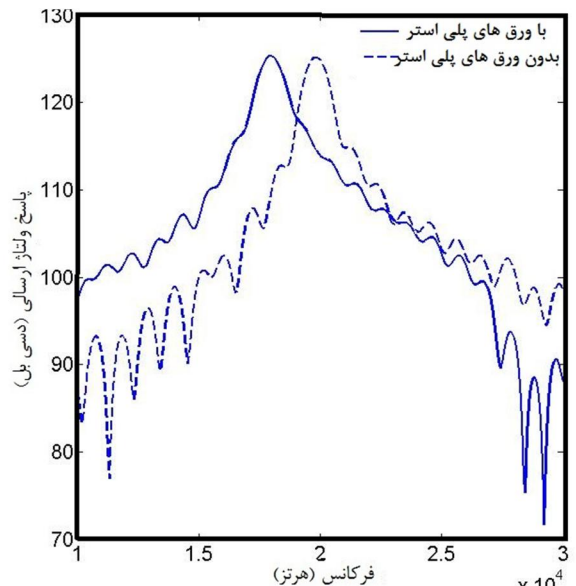
شکل 15 سیستم ارزیابی عملکرد آکوستیکی یک ترانسدیوسر



شکل 17 مقایسه پاسخ ولتاژ فرستندگی مدل اجزاء محدود و تست تجربی

جدول 2 مقایسه نتایج تست آکوستیکی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

خطا	فرکانس بیشینه پاسخ (dB)	فرکانس بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (kHz)	خطا	بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (dB)	بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (dB)
خطا	فرکانس بیشینه پاسخ (dB)	فرکانس بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (kHz)	خطا	بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (dB)	بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی (dB)
(%)	بیشینه پاسخ ولتاژ تست (kHz)	ارسالی اجزاء محدود (kHz)	(%)	ارسالی تست (dB)	ارسالی محدود (dB)
	(kHz)	محدود (kHz)	(dB)	(dB)	(dB)
3/2	18/1	18/7	4/9	125/8	132



شکل 18 بررسی وجود یا عدم وجود ورق‌های پلی‌استر در پاسخ ولتاژ ارسالی

پهنای باند به حدود 1.25kHz رسیده است. یعنی با استفاده از این ورق‌ها، پهنای باند فرکانسی افزایش یافته است. این بدین معناست که با توجه به نیازهای متفاوت می‌توان با افزودن عامل میراکنندگی به سیستم، پهنای باند فرکانسی را افزایش داد. در مورد نتایج شکل 18 نیز این نکته شایان ذکر است که افزودن ورق‌های پلی‌استر به نمونه، علاوه بر تاثیر بر پهنای باند فرکانسی، فرکانس رزونانس را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد که این نکته را

یک ترانس‌دیوسر تانپیلز هستند. در این قسمت پاسخ ولتاژ ارسالی به دست آمده از تست تجربی با مقدار پیش‌بینی شده آن به کمک مدل اجزاء محدود مقایسه می‌شود.

در شکل 17، مهم‌ترین پارامتر به دست آمده از تست آکوستیکی یک ترانس‌دیوسر تانپیلز با مقدار به دست آمده برای آن از مدل اجزاء محدود مقایسه می‌شود. رفتار کلی ترانس‌دیوسر در مدل اجزاء محدود و تست تجربی مشابه یکدیگر است. برای بررسی دقیق‌تر این دو نمودار می‌توان آن را به سه قسمت کلی تقسیم کرد. برای این منظور فرکانسی که در آن بیشینه پاسخ ولتاژ ارسالی رخ می‌دهد پیدا می‌شود. سپس، خطی موازی با محور افقی و گذرنده از این نقطه رد می‌شود. خط دیگری موازی با همین خط و متناظر با افت 3 دسی بلی در پاسخ ولتاژ ارسالی رسم می‌شود. این خط، منحنی پاسخ ولتاژ ارسالی را در دو نقطه قطع می‌کند. با رسم خطوطی موازی با محور عمودی و گذرنده از این نقاط، می‌توان فرکانس‌های متناظر با افت سه دسی - بلی که پهنای باند فرکانسی را نشان می‌دهند پیدا کرد. شکل 17 نیز به سه قسمت قبل از پهنای باند فرکانسی، پهنای باند فرکانسی و بعد از پهنای باند فرکانسی تقسیم می‌شود. مشاهده می‌شود که بهترین تطابق بین نتایج در پهنای باند فرکانسی رخ می‌دهد. یعنی بازه‌ای که به عنوان بازه کاری ترانس‌دیوسر تعریف می‌شود. این مطلب با توجه به مفهوم پهنای باند فرکانسی نیز قابل درک است. علت بزرگ گرفتن بازه فرکانسی، مشاهده کلی رفتار ترانس‌دیوسر و اطمینان از نبودن مدهای رزونانسی دیگر در نزدیکی مد اصلی است.

بیشترین خطا بین مدل اجزاء محدود و تست تجربی در شکل 17، در بخش 3 یعنی بعد از پهنای باند فرکانسی مشاهده می‌شود. علت بیشتر بودن خطا در بخش 3 در مقایسه با بخش 1 می‌تواند این باشد که در مدل اجزاء محدود، در فرکانس‌های بالاتر مش ریزتری مورد نیاز است. در تحلیل - های مودال، معمولا بهترین دقت در حوالی مد رزونانسی وجود دارد و در اطراف آن خطا زیاد خواهد بود. این مطلب نیز می‌تواند توجیه بیشتر بودن خطای بخش‌های 1 و 3 در مقایسه با بخش 2 باشد. عوامل خطایی که تا این لحظه ذکر شد، عواملی هستند که مربوط به شبیه‌سازی می‌شوند. دسته دیگری از خطاها می‌توانند، خطاهای مونتاژ یا خطای اپراتور باشد. یکی از عواملی که می‌تواند باعث ایجاد خطا در جواب‌ها بشود، پوشش پلی‌ارتان مورد استفاده است. وجود هوا در مدل قالب‌گیری شده، نجسبیدن یکنواخت پوشش به جرم سر و غیره می‌توانند باعث تضعیف موج ارسالی شوند. عامل دیگری نیز که می‌تواند باعث ایجاد خطا شود میزان سفت‌شدگی پیچ است. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود با این فرض انجام شده است که تمامی المان‌ها به صورت کاملا ایده‌آل به هم چسبیده اند. یعنی اگر پیچ به اندازه‌ای سفت نشود که نتواند المان‌ها را به طور کامل به هم بچسباند، خطا ایجاد خواهد شد. ضمن اینکه رعایت دقیق فاصله یک متری برای خواندن فشار نیز اهمیت زیادی دارد. در جدول 2، مهم‌ترین نتایج حاصل از تست آکوستیکی در مدل اجزاء محدود و تست تجربی با هم مقایسه شده‌اند.

عنوان شد که علت استفاده از لایه‌های پلی‌استر افزایش پهنای باند فرکانسی ترانس‌دیوسر بوده است. اگر نمونه ساخته شده بدون استفاده از این لایه‌ها مورد تست قرار بگیرد، پاسخ زیر مشاهده می‌شود:

پهنای باند فرکانسی متداول برای ترانس‌دیوسرهای تانپیلز معمولا عددی در حدود 1kHz است. مقداری که با دقت در نمودار بالا برای نمونه بدون ورق‌های پلی‌استر هم مشاهده می‌شود. در مدل تانپیلز با ورق‌های پلی‌استر،

- [2] A. Everest, *Master Handbook of Acoustics*, 4th Edition, Toronto: McGraw-Hill, 2000.
- [3] R. P. Hodges, *Underwater Acoustics Analysis, Design and Performance of Sonar*, Chichester, UK: Wiley, 2010.
- [4] A. D. Waite, *Sonar for Practicing Engineers*, England: Wiley, 2001.
- [5] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, London: Springer, 2002.
- [6] K. CEPNI, *A Methodology for Designing Tonpilz-Type Transducers*, MSc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, September 2011.
- [7] C. Sherman, J. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound (Underwater Acoustics)*, New York: Springer, 2007.
- [8] O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, California: Peninsula Publishing, Los Altos, CA, 1988.
- [9] C. Sherman, J. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound (Underwater Acoustics)*, New York: Springer, 2007.
- [10] D. M. Jovanović, V. Paunović, M. Radmanović, V. V. Mitić. Metal rings and discs Matlab/Simulink 3D model for ultrasonic sandwich transducer design, *Science of Sintering*, Vol. 44, pp. 287-98, 2012.
- [11] A. Iula, R. Carotenuto, M. Pappalardo, An approximated 3-D model of the Langevin transducer and its experimental validation, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, No. 6, pp. 2675-2680, 2002.
- [12] M. D. Radmanovic, D. D. Mancic, *Designing and Modelling of the Power Ultrasonic Transducers*, Chapter 2, Switzerland: MP Interconsulting, 2004.
- [13] D. Legner, J. Wackerfuß, S. Klinkel, W. Wagner, An advanced finite element formulation for piezoelectric beam structures, *Computational Mechanics*, Vol. 52, No. 6, pp. 1331-1349, 2013.
- [14] K. Jaehwan, K. Heung Soo, Finite element analysis of piezoelectric underwater transducers for acoustic characteristics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 452-460, 2010.
- [15] B. Klein, N. E. Altun, M. Colebrook, M. Pawlik, Electroacoustic measurements of mixed quartz and iron oxide mineral systems, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 110-111, No. 0, pp. 12-17, 2012.
- [16] *piezoelectric material: PZT-8-Annon Piezo Technology Co*, Accessed 20 November 2013, <http://www.annon-piezo.com/pzt-8.asp>.
- [17] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, L. P. Topp, Stiffness and deflection analysis of complex structures, *Journal of Aeronautical Society*, Vol. 23, pp. 805-823, 1956.
- [18] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *Finite Element Method: Volume 1, Fifth Edition (Finite Element Method Ser)*, California: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [19] P. Daryabor, M. Farzin, F. Honarvar, Calculating the lamb wave modes in an aluminum sheet bonded to a composite layer with FEM and experiment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013. (In Persian).
- [20] B. Zheng, D. Lederman, J. H. Sumkin, M. L. Zuley, M. Z. Gruss, L. S. Lovy, D. Gur, *A Preliminary Evaluation of Multi-probe Resonance-frequency Electrical Impedance Based Measurements of the Breast*, *Academic Radiology*, Vol. 18, No. 2, pp. 220-229, 2011.
- [21] U. Minnesota, Acoustic emission sensor integrally mounted to machine tool element has insulated layer of piezoelectric material to transmit output voltage in response to acoustic emission to preempt tooling fracture : *Patent Cooperation Treaty* No. WO 8912,528 (28 Dec. 1989), NDT & E International, Vol. 27, No. 4, pp. 218, 1994.
- [22] J. Lardies, J. P. Guilhot, A very wide bandwidth constant beamwidth acoustical end-fire line array without side lobes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 120, No. 3, pp. 557-566, 1988.
- [23] A. Stimac, B. Ivančević, K. Jambrošić, Directivity pattern of neurosurgical endoscopic ultrasonic probes, *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1-8, pp. 813-818, 2002.
- [24] *4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer*, Accessed on 13 January 2014, [http://www.home.agilent.com/en/pd-1000003398%3Aeps%3Apro-pn-4194A/impedance-gain-phase-analyzer?&cc=IR&lc=eng/\(Visited on 2014-01-13\)](http://www.home.agilent.com/en/pd-1000003398%3Aeps%3Apro-pn-4194A/impedance-gain-phase-analyzer?&cc=IR&lc=eng/(Visited on 2014-01-13)).
- [25] *Hydrophones-Brüel & Kjær*, Accessed on 22 December 2013, [http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/hydrophones/8103/ \(Visited on 2013-12-22\)](http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/hydrophones/8103/).

نیز باید در طراحی در نظر داشت. علت جابه‌جایی فرکانس رزونانس نیز تغییر کردن سختی معادل در حضور ورق‌های پلی‌استر است.

7- نتیجه‌گیری

برای طراحی یک آرایه آکوستیکی با مشخصات فرکانسی مطلوب و معین، ابتدا لازم است تا ترانس‌دیوسرهای تشکیل‌دهنده آن به دقت مدل‌سازی شوند. ترانس‌دیوسرهای تانپیلز پرکاربردترین ترانس‌دیوسرهای مورد استفاده در سیستم‌های سونار هستند. در این پژوهش، تلاش شد تا به کمک مدل اجزاء محدود، شبیه‌سازی کاملی از رفتار یک ترانس‌دیوسر تانپیلز ارائه شود. با معرفی مراحل ساخت، مونتاژ و تست ترانس‌دیوسر نیز، دقت شبیه‌سازی انجام شده بررسی شد. ضمن اینکه با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده و بررسی نتایج به دست آمده، راه‌هایی برای بهبود پاسخ فرکانسی به دست آمد. بهبود پاسخ فرکانسی شامل جابه‌جا کردن فرکانس رزونانس، افزایش پهنای باند فرکانسی و افزایش پاسخ ولتاژ ارسالی می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، مطالب زیر به‌عنوان مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر ارائه می‌شوند:

- ✓ با مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده و تست‌های الکتریکی و آکوستیکی، مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین جواب‌های تست و مقادیر پیش‌بینی شده وجود دارد.
- ✓ همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود در فرکانس رزونانس، کمترین امپدانس الکتریکی ورودی و بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی را داریم. ضمن اینکه در این فرکانس، جابه‌جایی جرم سر نسبت به جرم دنباله بیشترین مقدار را دارد.
- ✓ برای جابه‌جایی فرکانس رزونانس می‌توان جرم‌های قسمت جرم سر یا جرم دنباله را تغییر داد. به‌عنوان مثال، با سبک کردن ترانس‌دیوسر می‌توان فرکانس رزونانس را افزایش داد. افزایش سطح رینگ‌های پیروزرامیک نیز راه دیگری برای افزایش فرکانس رزونانس است.
- ✓ با افزودن عوامل میراکننده به ترانس‌دیوسر می‌توان پهنای باند فرکانسی را افزایش داد. ورق‌های نازک پلی‌استر استفاده شده عاملی است که خاصیت میراکنندگی به سیستم اضافه می‌کند.
- ✓ افزودن ترم‌های میراکننده می‌تواند باعث کاهش پاسخ ولتاژ ارسالی شود. یعنی افزایش پهنای باند فرکانسی به قیمت کاهش پاسخ ولتاژ ارسالی تمام شود. برای حل این مشکل نیز معمولاً در سیستم‌های سونار از آرایه‌ای از ترانس‌دیوسرها استفاده می‌شود.
- ✓ دقت در مونتاژ و ساخت می‌تواند باعث کاهش خطا در جواب‌های به دست آمده شود. دقت در قالب‌گیری پوشش پلی‌ارتان، اطمینان از چسبیدن کامل پوشش به قسمت جرم سر، سفت کردن کافی پیچ و غیره از جمله مواردی هستند که باید به آن‌ها دقت شود.

8- مراجع

- [1] Acoustical Oceanography, in: *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, Fourth Edition, USA: CRC Press, pp. 21-60, 2013.