



طراحی و شبیه‌سازی یک ترانسدیوسر سونار پهن باند و اعتبارسنجی با آزمایش‌های تجربی

امین یوسفی¹، محمد مهدی ابوترابی^{2*}

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 اسفند 1394

پذیرش: 01 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 05 خرداد 1395

کلید واژگان:

ترانسدیوسر

تانپیلز

فرکانس رزونانس

امپدانس الکتریکی

پاسخ ولتاژ ارسالی

دانش مبدل‌های صوتی پهن‌بند از فناوری‌های جدید و مهم در حوزه سونار محسوب می‌شود که با توجه به برخورداری کشور ایران از منابع آبی دریایی، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. در این مقاله پس از مقایسه عملکرد انواع ترانسدیوسرها در این حوزه، یک ترانسدیوسر پهن‌بند با مشخصات امپدانس و آکوستیکی معلوم که توانایی ارسال و دریافت امواج را دارد، طراحی، شبیه‌سازی، ساخته و تست شده است. در ابتدا، ابعاد کلی یک ترانسدیوسر پهن‌بند به کمک مدل‌سازی پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی تقریب زده شده و سپس با افزایش درجات آزادی مدل‌های تحلیلی، مشخصات تمام اجزای ترانسدیوسر در یک حالت بهینه برای داشتن پهنای باند بالا به دست آمده است. مدل طراحی شده، به کمک نرم‌افزار المان محدود کامسول مولتی‌فیزیک به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده تا در ضمن مقایسه با روش طراحی تحلیلی، حل دقیق تری صورت گرفته باشد. سرانجام ترانسدیوسر مذکور ساخته و تست شده‌است تا داده‌های تئوری به دست آمده با نتایج تجربی اعتبار سنجی شوند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک، با دقت مناسبی توانسته است فرکانس رزونانس و بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی ترانسدیوسر پهن‌بند مورد نظر را پیش‌بینی کند. خطای مدل‌سازی سه بعدی انجام شده در پیش‌بینی فرکانس رزونانس و بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی، به ترتیب 3.8% و 5.7% است. استفاده از روش‌های پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی هرچند تقریب اولیه‌ای برای ابعاد ترانسدیوسر به دست می‌دهد ولی در تعیین فرکانس رزونانس و محل رخ دادن بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی درصد خطای بیشتری نسبت به شبیه‌سازی المان محدود دارد.

Design and Simulation of a Broadband Sonar Transducer and the Experimental Validation

Amin Yousefi, Mohammad Mahdi Abootorabi*

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 March 2016
Accepted 20 April 2016
Available Online 25 May 2016

Keywords:
Transducer
Tonpilz
Resonance Frequency
Electrical Impedance
Transmitting Voltage Response

ABSTRACT

Knowledge of broadband transducers is a new technology in the field of sonar science. Considering that Iran has sea water resources, its importance becomes more and more. In this article, after studying the performance of the kinds of transducers in the field of sonar transducers, a proper broadband transducer with the specific impedance and acoustical characteristics that can send and receive signals, is designed, simulated, fabricated and tested. At first, overall dimension of a broadband transducer with lumped parameter model and electrical equivalent circuit model was approximated and then, with increasing the degrees of freedom of analytical models, all characteristics of the optimum transducer parts were obtained in order to have a large bandwidth. By using finite element software (COMSOL Multiphysics), the designed model was simulated and the obtained results have been compared with analytical design solution. Finally, the transducer was fabricated and tested in order to validate the modeled and simulated data by comparing them with practical ones. The obtained experimental results showed that the simulation with COMSOL Multiphysics can predict the resonance frequency and maximum transmitting voltage response (TVR) of the broad bandwidth transducer with reasonable precision. The prediction error of resonance frequency and maximum TVR by COMSOL is 3.8% and 5.7%, respectively. The use of lumped parameter and electrical equivalent circuit models gives an initial approximation for transducer dimensions, but in determination of the resonance frequency and the frequency of maximum TVR has a higher error in comparison with the finite element method.

1- مقدمه

مسافت یابی کردن¹، سامانه‌ای است که با استفاده از انتشار صوت در آب، اندازه‌گیری و تخمین برخی کمیت‌ها یا تولید و تغییر علائم خاص را انجام می‌دهد [2,1]. سونارها به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند که

انتشار صوت در آب مهم‌ترین پدیده‌ای است که برای کشف، شناسایی و ردیابی شناورها و آبیان به کار می‌رود [1]. سونار به معنای "ناوبری صوتی و

¹ Sound Navigation and Ranging

جفت کردن مد طولی ترانس‌دیوسر با مد پیچشی جرم‌سر و شبیه‌سازی آن با روش المان محدود و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده با نمونه ساخته شده، پهنای باند ترانس‌دیوسر را افزایش دادند. سورس و همکاران [12] اثر تغییرات قطر و طول جرم‌ها را در ترانس‌دیوسر تانپیلز مورد استفاده در سیستم‌های تصویری، برای دست یافتن به قدرت تابشی بیشتر و وزن کمتر بررسی کردند. تامسون و همکاران [13] با بررسی و تحلیل عملکرد ترانس‌دیوسر با مواد پیزوالکتریک دارای ضریب جفت شونده‌گی الکترومکانیکی بالا و مقایسه آن‌ها با ترانس‌دیوسرهای استفاده کننده از سرامیک‌های پیزوالکتریک معمولی، نتیجه گرفتند که ترانس‌دیوسرهایی که از مواد پیزوالکتریک دارای ضریب جفت شونده‌گی الکترومکانیکی بالا استفاده می‌کنند، دارای پهنای باند بیشتری هستند.

در این پژوهش، ابتدا به طراحی ترانس‌دیوسر تانپیلز پهن‌بند با روش‌های تحلیلی پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی پرداخته و افزایش پهنای باند ترانس‌دیوسر، با بهینه‌سازی مشخصات هندسی و پارامترهای مؤثر بر ترانس‌دیوسر انجام شده است. سپس این ترانس‌دیوسر در نرم‌افزار المان محدود کامسول مولتی‌فیزیکی¹ شبیه‌سازی و برای اعتبارسنجی، ساخته شده و تست‌های الکتروآکوستیکی بر روی آن انجام گردیده است. نتایج تجربی نشان دادند که شبیه‌سازی سه بعدی در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکی به خوبی توانسته است فرکانس رزونانس و بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی را پیش‌بینی کند.

2- مشخصه‌های عملکردی ترانس‌دیوسر

سطح فشار صوت یک فرستنده صوتی برابر حداکثر شدت صوت تشعشعی منبع در زوایای مختلف در فاصله‌ی یک متری از مرکز صوتی فرستنده است و به‌صورت رابطه‌ی (1) به دست می‌آید.

$$SL = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

که P_{ref} برابر فشار یک میکرو پاسکال در محیط دریا است و P_{rms} برابر فشار متوسط محوری وارده به محیط است [10].

پاسخ ولتاژ ارسالی برای یک پروژکتور که نشان‌دهنده فشار تولیدی ترانس‌دیوسر روی محور و در فاصله‌ی 1 متری و با ولتاژ محرک 1 ولت است، با روابط (2) تا (4) تعریف می‌شود:

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

$$A_{rms} = \frac{P_{rms} V_{app}}{r_{measured}} \quad (3)$$

$$A_{ref} = \frac{(1 \times 10^{-6} \text{ Pa})(1 \text{ V})}{1 \text{ m}} \quad (4)$$

که V_{app} ولتاژ اعمالی به پیزوها و $r_{measured}$ فاصله شعاعی با سطح پیستون است که طبق استاندارد هر دو برابر واحد هستند [14]. حساسیت ولتاژ دریافتی مدار باز برای یک هیدروفون به‌صورت رابطه‌ی (5) تعریف می‌شود که نسبت دامنه ولتاژ تولیدی (V_{rms}) را به دامنه فشار یک موج صوتی صفحه‌ای نشان می‌دهد. طبق استاندارد، فشار این موج صفحه‌ای برابر یک میکرو پاسکال در نظر گرفته می‌شود. در حالت کلی، حساسیت ولتاژ دریافتی به فرکانس، جهت موج صفحه‌ای ضمنی، خواص مواد فعال مثل سرامیک‌های پیزوالکتریک و هندسه‌ی هیدروفون بستگی دارد.

سونار فعال هم فرستنده و هم گیرنده‌ی امواج و سونار غیرفعال فقط گیرنده‌ی امواج است. سونار فعال و سیستم‌های ارتباطی صوتی بر مبنای ترانس‌دیوسرهای الکتروآکوستیکی پایه‌ریزی می‌شوند که پروژکتور تولید موج صوتی می‌کند و متعاقباً هیدروفون موج تولید شده را از یک مسیر مستقیم از پروژکتور یا انعکاس آن از یک هدف را دریافت و آشکار می‌کند [3]. امواج صوتی به این دلیل انتخاب شده‌اند که نسبت به سایر امواج، تضعیف یا میرایی کمتری در آب دارند [4].

برای مقایسه ترانس‌دیوسرها از این جهت که کدام یک عملکرد بهتری برای کاربردهای زیرآبی دارند، می‌توان آن‌ها را از نظر نیروی تولیدی مقایسه کرد. پارامتری که توانایی یک ترانس‌دیوسر در تولید نیروی لازم به‌عنوان پروژکتور را تعیین می‌کند، مقدار ولتاژ یا جریان محرکی است که بدون آسیب می‌تواند به ترانس‌دیوسر اعمال شود. ترانس‌دیوسرهای پیزوالکتریک نسبت به سایر ترانس‌دیوسرهای الکتروآکوستیک، توانایی تحمل ولتاژ محرک بالاتر و تولید نیروی بیشتری دارند و از این نظر، کارآمدترین گزینه از میان ترانس‌دیوسرهای الکتروآکوستیک هستند. با توجه به بازه کاری و پارامترهای ورودی در این پژوهش، ترانس‌دیوسر پیزوالکتریک تانپیلز جهت طراحی و ساخت انتخاب شده است [2]. تانپیلز یک واژه‌ی آلمانی به معنای "قارچ-صوت" است که به علت شکل شبیه به قارچ این ترانس‌دیوسر، به آن نسبت داده شده است [5]. این ترانس‌دیوسرها معمولاً از سرامیک‌های پیزوالکتریک به‌عنوان بخش محرک، از جرم‌سر برای انتقال ارتعاشات، از جرم دنباله برای حذف کردن ارتعاشات قسمت انتهایی و از پیچ و مهره برای ثابت کردن قسمت‌های مختلف در سر جای خود و ایجاد پیش‌تنش فشاری به سیستم، تشکیل شده است [6].

ترانس‌دیوسرهای تانپیلز در حالت ارسال و به‌عنوان پروژکتور طوری تنظیم می‌شوند که با ارسال یک سیگنال به سرامیک‌های پیزوالکتریک، این سرامیک‌ها با تغییر طول و انتقال این جابجایی به‌وسیله‌ی جرم‌سر به محیط آب پیرامون، امواج صوتی تولید می‌کنند. تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی جنبش مکانیکی توسط سرامیک‌های پیزوالکتریک، به اثر معکوس پیزوالکتریک معروف است. به‌عنوان هیدروفون و در حالت دریافت، موج‌های صوتی موجود در آب، با برخورد به سطح تابشی جرم‌سر، ترانس‌دیوسر را به حرکت درمی‌آورد و باعث تولید سیگنال الکتریکی توسط سرامیک‌های پیزوالکتریک می‌شود. تبدیل انرژی جنبش مکانیکی به انرژی الکتریکی توسط سرامیک‌های پیزوالکتریک به اثر مستقیم پیزوالکتریک معروف است [7,2].

قسمت صوتی ترانس‌دیوسر تانپیلز در سطح متحرک آن در تماس با محیط آب قرار دارد، قسمت مکانیکی آن به‌عنوان یک جسم متحرک کنترل‌شده به‌وسیله نیرو است و قسمت الکتریکی آن، یک جریان کنترل‌شده با ولتاژ است [8]. ترانس‌دیوسرها همیشه با وسایل الکتریکی دیگری از قبیل پیش تقویت‌کننده برای هیدروفون و تقویت‌کننده توان با مدار تنظیم برای پروژکتور، در تماس‌اند.

چیت و روه [9] با روش المان محدود و با یک راه کار ابداعی که مبتنی بر سوراخ کردن قسمتی از جرم‌سر ترانس‌دیوسر است، پهنای باند ترانس‌دیوسر تانپیلز چند رزونانسی را افزایش دادند. هم‌چنین با این اقدام، مشخصه امپدانس صوتی ترانس‌دیوسر کم شد و نیازی به اضافه کردن یک لایه مطابق امپدانس برای افزایش پهنای باند نبود. سپنی [10] با طراحی یک ترانس‌دیوسر تانپیلز با استفاده از روش‌های مدار معادل الکتریکی، ماتریسی و المان محدود و ارزیابی نتایج به دست آمده با نمونه‌ی آزمایشگاهی، نشان داد که نتایج المان محدود خطای کمتری دارند. کیم و همکاران [11] به وسیله‌ی

¹ COMSOL Multiphysics

با جایگزینی المان‌های الکتریکی به جای پارامترهای مکانیکی یعنی جایگزینی نیرو با ولتاژ، سرعت با جریان، نرمی با خازن، جرم با القاگر و سختی فنر با مقاومت، شکل 2 به دست می‌آید.

در ادامه برای افزایش دقت در طراحی، درجات آزادی مدل‌سازی افزایش داده شده و با بهینه‌سازی، تمام مشخصات ترانسدیوسر بر اساس مقدار خروجی‌های مورد نظر مثل فرکانس رزونانس 20 کیلوهرتز، پهنای باند بیشتر از 3 کیلوهرتز و مقدار پاسخ ولتاژ ارسالی و دریافتی ترانسدیوسر، به دست می‌آید. مدل نهایی پارامتر متمرکز و مدار معادل آن در حالت فرستندگی به ترتیب در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. جرم قسمت محرک (M_i) به این علت که دوتا از پیژوالکتریک‌ها با جرم سر (M_h) و دوتای دیگر با جرم دنباله (M_t) جابجایی یکسانی دارند، همراه با آن‌ها توزیع شده‌است.

در شکل‌های 3 و 4، R_r مقاومت تابشی، M_r جرم تابشی، R_m مقاومت اتلاف مکانیکی، C^E نرمی اتصال کوتاه بخش محرک، C_{tr} نرمی میله‌ی تنش، n تعداد حلقه‌های پیژوسرامیک، t ضخامت هر حلقه، u_h سرعت جرم سر، u_t سرعت جرم دنباله و u_r سرعت نسبی بین جرم سر و جرم دنباله است. پارامترهای مهم شکل‌های 3 و 4 برابرند با:

$$N = \frac{d_{33}A_0}{tS_{33}^E} \quad (8)$$

$$G_0 = \omega C_{tr} \tan \delta \quad (9)$$

$$N = \frac{n\epsilon_{33}^T A_0}{t} \quad (10)$$

$$C_0 = C_f (1 - K_{33}^2) \quad (11)$$

که N نرخ مبدل الکترومکانیکی، ω فرکانس زاویه‌ای، G_0 کاندکتانس افت الکتریکی، C_0 ظرفیت مقید، C_f ظرفیت آزاد، A_0 سطح مقطع سرامیک‌های پیژوالکتریک و ضرایب d_{33} ، ϵ_{33} ، S_{33} و $\tan \delta$ ثابت‌های پیژوالکتریک هستند [2].

برای حالت دریافت سیگنال، ترانسدیوسر به‌عنوان هیدروفون عمل می‌کند. چون در اینجا از یک ترانسدیوسر هم برای ارسال و هم برای دریافت سیگنال استفاده شده است، مدار معادل ترانسدیوسر در حالت گیرندگی مشابه مدار معادل آن در حالت فرستندگی است. شکل 5 مدار معادل ترانسدیوسر در حالت گیرندگی را نشان می‌دهد. تفاوت شکل‌های 4 و 5 در آن است که در حالت دریافت، ورودی مدار فشار و خروجی آن ولتاژ است ولی در حالت ارسال، برعکس است.

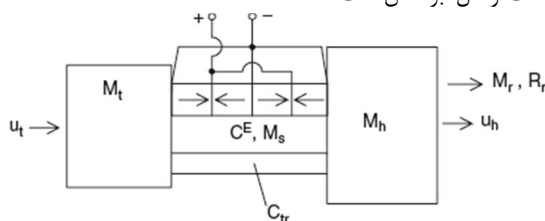


Fig. 3 The lumped parameter model of a transducer [2]

شکل 3 مدل پارامتر متمرکز ترانسدیوسر [2]

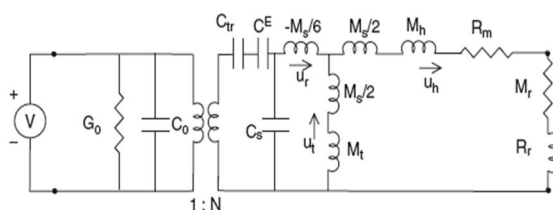


Fig. 4 The electrical equivalent circuit of a transducer in sending state [2]

شکل 4 مدل مدار معادل ترانسدیوسر در حالت فرستندگی [2]

$$RVS = 20 \log \left(\frac{V_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (5)$$

روابط (1) تا (5) بیان‌گر مشخصه‌های صوتی ترانسدیوسر است. مهم‌ترین مشخصه الکتریکی یک ترانسدیوسر، امپدانس الکتریکی آن است که محل فرکانس‌های رزونانس و آنتی‌رزونانس را مشخص می‌کند. امپدانس الکتریکی ترانسدیوسر که به‌صورت رابطه‌ی (6) تعریف می‌شود، بیان‌گر نسبت ولتاژ ورودی به ترانسدیوسر (V_{in}) به جریان خروجی از آن (I_{out}) است [15].

$$Z = \frac{V_{in}}{I_{out}} \quad (6)$$

2-1- مدل‌سازی پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی

ترانسدیوسر یک سیستم مکانیکی-الکتریکی-صوتی است. روش پارامتر متمرکز قادر به مدل‌سازی اجزای الکتریکی و صوتی نیست ولی در مدل مدار معادل الکتریکی می‌توان با جایگزینی این اجزای مکانیکی و صوتی با المان‌های الکتریکی و در نظر گرفتن سایر پارامترهای الکتریکی، مدل‌سازی کامل‌تری از ترانسدیوسر به دست آورد. این دو روش مکمل هم هستند و برای درک بهتر، با هم توضیح داده شده‌اند.

در حالت کلی برای مدل‌سازی ترانسدیوسر با این دو روش، مبنای کار به این صورت است که ابتدا یک مدل‌سازی ساده و یک درجه آزادی از ترانسدیوسر که فقط شامل جرم سر، دنباله و پیژوالکتریک است، انجام و ابعاد تقریبی اجزای اصلی ترانسدیوسر به دست می‌آید. معمولاً مشخصات اجزای به دست آمده کافی نیستند و ممکن است دقت لازم را نداشته باشند. مدل پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی ترانسدیوسر به ترتیب در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده‌است. در شکل 1، جرم دنباله با شرایط مرزی صلب مدل شده و فنر K به‌جای مواد پیژوالکتریک، جرم M به‌جای پیستون تشعشع کننده یا همان جرم سر و مقاومت R به جای مقاومت تابشی سر است. به کمک این المان‌ها، امپدانس مکانیکی از رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود [8]:

$$Z_m = R + j\left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right) \quad (7)$$

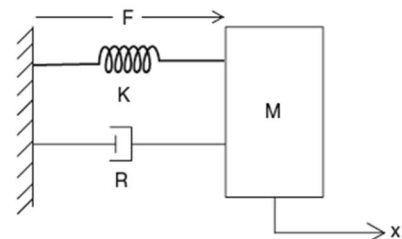


Fig. 1 The lumped parameter model of a piezoelectric transducer with one degree of freedom [8]

شکل 1 مدل پارامتر متمرکز یک درجه آزادی از ترانسدیوسر پیژوالکتریک [8]

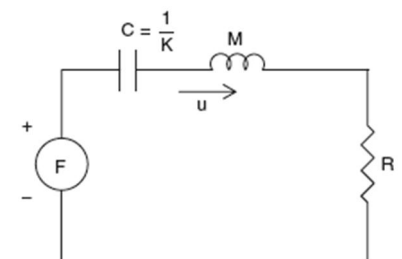


Fig. 2 The electrical equivalent circuit for the lumped parameter model of figure 1 [8]

شکل 2 مدار معادل الکتریکی برای مدل پارامتر متمرکز شکل 1 [8]

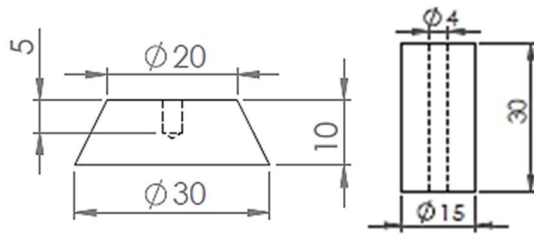


Fig. 7 The dimensions of tail mass (right) and head mass (left)
شکل 7 ابعاد جرم دنباله (راست) و جرم سر (چپ)

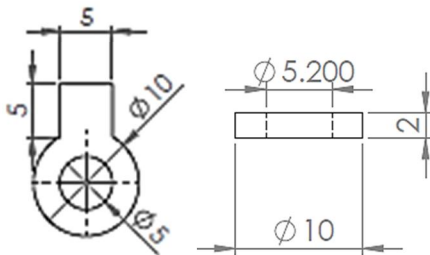


Fig. 8 The dimensions of Piezoelectric ceramic PZT-8 (right) and copper electrode (left)
شکل 8 ابعاد سرامیک پیزوالکتریک PZT-8 (راست) و الکترود مسی (چپ)

اعمال ولتاژ به سطوح رینگ‌های پیزوالکتریک، معمولاً الکترودهای نازک مسی بین آن‌ها قرار داده می‌شود و ولتاژ مورد نظر به این الکترودها اعمال می‌گردد. ابعاد این الکترود نازک با ضخامت 0.1 میلی‌متر در سمت چپ شکل 8 نشان داده شده است. مهره استفاده شده برای مونتاژ اجزا به یکدیگر و ایجاد پیش‌تنش فشاری، مهره استاندارد برای پیچ M3 از جنس فولاد ضدزنگ است. مشخصات و ابعاد به دست آمده برای ترانسدیوسر، در ادامه برای شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک، مورد استفاده قرار گرفته است.

3- شبیه‌سازی المان محدود

مدل‌های پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی در بخش قبل توضیح داده شد و بیان گردید که چگونه می‌توان با گسترش این مدل‌ها، به نمونه‌ی واقعی سیستم ترانسدیوسر نزدیک شد. مدل المان محدود، سیستم‌های توزیع شده را به آرایه‌ی سه‌بعدی از تعداد زیادی المان‌های فضایی متمرکز یا گسسته توزیع شده در سرتاسر ترانسدیوسر تبدیل می‌کند. با کاهش اندازه المان‌ها همراه با افزایش متناسب تعداد آن‌ها، مدل‌های دقیقی از ترانسدیوسرهای پیچیده را می‌توان شبیه‌سازی کرد [16]. پس از حل تحلیلی، برای داشتن حل دقیق‌تر، ترانسدیوسر مورد نظر در محیط نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک شبیه‌سازی شد. شکل 9 دو نما از ترانسدیوسر در این محیط را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی عملکرد واقعی ترانسدیوسر، یک محیط آب در تماس با جرم سر قرار داده شده و از یک محیط آب دیگر به عنوان لایه کاملاً مطابق برای شبیه‌سازی محیط دریای پیرامون استفاده گردیده است که وظیفه‌ی جذب و میرا کردن امواج تولیدی را دارد. همچنین از یک عملگر برای محاسبه‌ی ویژگی‌های ترانسدیوسر در محیط بی‌نهایت دریا استفاده شده است که معمولاً این عملگر به‌عنوان عملگر میدان دور شناخته می‌شود [17].

شکل 10 جابجایی ساختاری کل ترانسدیوسر تانپیلز را در تحریک با فرکانس 21 کیلوهرتز نشان می‌دهد که برای درک بهتر، در تغییر شکل اغراق شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، قسمت سر بیشترین و قسمت دنباله کمترین جابجایی را دارند و میان این دو، جابجایی به‌صورت یکنواخت تغییر می‌کند. فرکانس 21 کیلوهرتز به این علت انتخاب شده است که در این

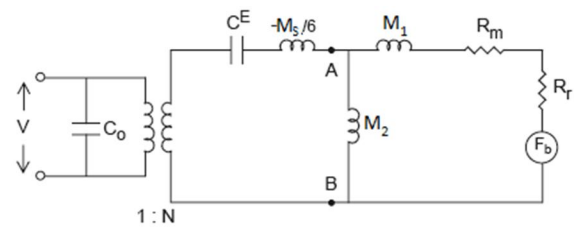


Fig. 5 The electrical equivalent circuit of a transducer in receiving state [2]

شکل 5 مدار معادل ترانسدیوسر در حالت گیرندگی [2]

پارامترهایی که مربوط به حالت دریافت می‌شوند برابرند با:

$$M_1 = M_r + M_h + \frac{M_s}{2} \quad (12)$$

$$M_2 = M_t + \frac{M_s}{2} \quad (13)$$

M_1 و M_2 جرم‌های معادل هستند. دلیل جمع شدن پارامترهای موجود در روابط (12) و (13)، سری بودن آنها در شکل 4 است. با حل ترانسدیوسر با روش‌های ذکر شده، مشخصات قسمت‌های مختلف ترانسدیوسر به دست می‌آید.

2-2- مشخصات ترانسدیوسر طراحی‌شده

بعد از حل ترانسدیوسر با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل، مشخصات هندسی و جنس قسمت‌های مختلف تعیین شده است. شکل 6 نمای شماتیک از ترانسدیوسر طراحی‌شده را نشان می‌دهد.

جرم دنباله از جنس فولاد ضدزنگ است که هندسه‌ی آن در سمت راست شکل 7 نشان داده شده است. این جرم به این علت سنگین‌تر در نظر گرفته می‌شود که ارتعاشات قسمت انتهایی ترانسدیوسر را کم کند. سمت چپ شکل 7، ابعاد جرم سر را نشان می‌دهد. سوراخ موجود در این قطعه برای مونتاژ کردن آن در مجموعه است. مهم‌ترین وظیفه‌ی جرم سر، انتقال ارتعاشات تولید شده به وسیله‌ی پیزوالکتریک‌ها به محیط آب است. چون مشخصه‌ی امپدانس صوتی آلومینیوم به آب نزدیک است، معمولاً برای این قسمت از آلومینیوم استفاده می‌شود. جرم سر به این علت مخروطی در نظر گرفته شده است که با داشتن شعاع مطلوب در انتهای آن، بتوان جرم را کاهش داد تا نسبت جرم دنباله به جرم سر به یک حالت مطلوب برسد و وزن اضافی به مجموعه تحمیل نشود.

سرامیک پیزوالکتریک استفاده شده در اینجا از جنس PZT-8 است. تعداد این سرامیک‌ها معمولاً زوج و بین 2 تا 12 است که بسته به خروجی‌های مورد نظر، تغییر می‌کند. ترانسدیوسر طراحی‌شده در اینجا شامل 4 عدد رینگ پیزوالکتریک است که ابعاد آن در سمت راست شکل 8 نشان داده شده است. این سرامیک‌ها دارای ضرایب ثابتی‌اند که در مرجع [2] ذکر شده است. برای

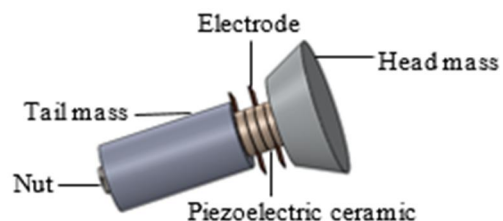


Fig. 6 Schematic view of the designed transducer

شکل 6 تصویر شماتیک ترانسدیوسر طراحی‌شده

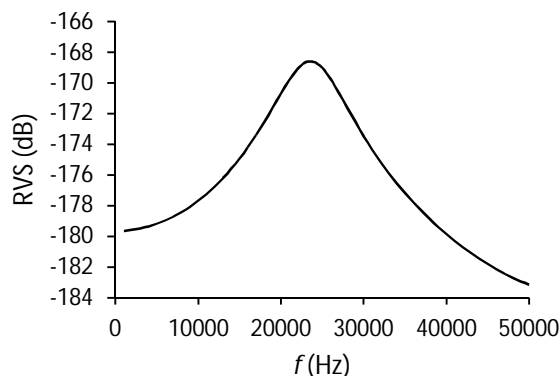


Fig. 12 The Receiving Voltage Sensitivity (RVS) of the simulated transducer

شکل 12 حساسیت ولتاژ دریافتی ترانسدیوسر شبیه‌سازی شده

4- ساخت و تست ترانسدیوسر طراحی شده

پس از طراحی‌ها و شبیه‌سازی لازم و اطمینان از این‌که ترانسدیوسر خروجی‌های مورد نظر را ایجاد می‌کند، قسمت‌های مختلف آن ساخته و سپس مونتاژ شد. ترانسدیوسر ساخته شده در شکل 13 نشان داده شده است. برای عملکرد صحیح ترانسدیوسر، باید ملاحظات در هنگام مونتاژ نظیر هم مرکز بودن قطعات رعایت شود.

4-1- تست‌های الکتروآکوستیکی

تست‌های الکتروآکوستیکی شامل تست‌های الکتریکی و آکوستیکی است. مهم‌ترین خروجی حاصل از تست الکتریکی ترانسدیوسر، امپدانس الکتریکی آن است [18]. برای ارزیابی مشخصه امپدانس ترانسدیوسر از دستگاه تحلیل-گر امپدانس استفاده می‌شود که در شکل 14 نشان داده شده و خروجی آن، منحنی امپدانس الکتریکی ترانسدیوسر برحسب فرکانس است.



Fig. 13 The fabricated transducer

شکل 13 نمایی از ترانسدیوسر ساخته شده



Fig. 14 Impedance analyzer set

شکل 14 دستگاه تحلیل‌گر امپدانس

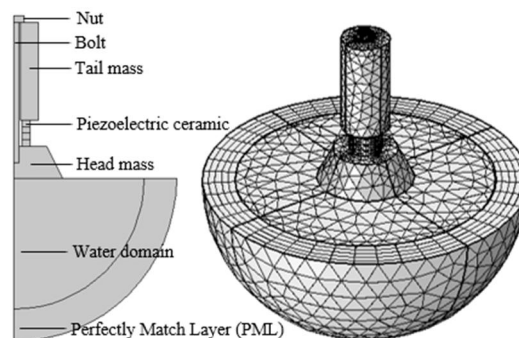


Fig. 9 Two views of simulated Tonpilz transducer in COMSOL Multiphysics software

شکل 9 دو نما از ترانسدیوسر تانپیلز شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول مولتی-فیزیک

فرکانس، ترانسدیوسر بیشترین حساسیت فرستندگی یا پاسخ ولتاژ ارسالی را دارد.

سطح فشار صوت در حوزه آب و لایه کاملاً مطابق در تحریک با فرکانس 21 کیلوهرتز در شکل 11 نشان داده شده است. اختلاف 15 دسی‌بل در سطح فشار صوت میان ناحیه نزدیک سطح جرم سر و سطح خارجی لایه کاملاً مطابق، تأییدی بر میرایی مؤثر به‌وسیله‌ی لایه کاملاً مطابق است. سطح فشار صوت، نزدیک جرم سر ترانسدیوسر بیشترین مقدار را دارد. تغییرات در سطح فشار صوت پیرامون ترانسدیوسر به فرکانسی که ترانسدیوسر ارتعاش می‌کند، بستگی دارد. همچنین سطح فشار صوت در خارج از محدوده‌ی محاسباتی را می‌توان با استفاده از ویژگی میدان دور محاسبه کرد.

شکل 12 نمودار حساسیت ولتاژ دریافتی ترانسدیوسر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. حساسیت هیدروفون در فرکانس 21 کیلوهرتز برابر 170- دسی‌بل است که مقداری قابل قبول دارد [3].

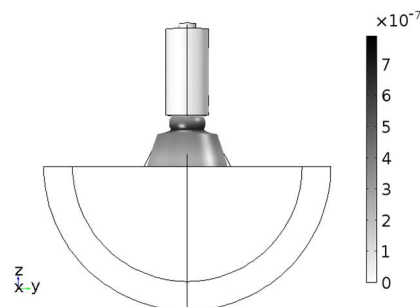


Fig. 10 Total structural displacement of the transducer in millimeters at frequency 21 kHz

شکل 10 جابجایی ساختاری کل ترانسدیوسر برحسب میلی‌متر در فرکانس 21 kHz

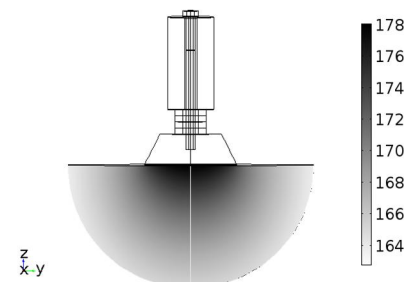


Fig. 11 Sound pressure level (SPL) in the water domain in decibels and perfectly match layer at frequency 21 kHz

شکل 11 سطح فشار صوت در حوزه آب برحسب دسی‌بل و لایه کاملاً مطابق در فرکانس 21 kHz

نتایج تست تجربی نمونه ساخته شده وجود دارد. طراحی پارامتر متمرکز و مدار معادل، خطای بیشتری نسبت به روش المان محدود در پیش‌بینی مقادیر واقعی دارد.

با توجه به شکل 16، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی برای شروع و داشتن یک تقریب مناسب از عملکرد مسئله و ابعاد اولیه ترانسدیوسر مفید است، اما برای داشتن اطلاعات دقیق‌تر از محل وقوع رزونانس و آنتی‌رزونانس و مقادیر حساسیت ترانسدیوسر، روش المان محدود با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک، روش مناسب‌تری است.

در جدول 1 نتایج تجربی تست الکتریکی ترانسدیوسر و همچنین مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک ارائه شده است. درصد خطای هر کدام از این روش‌ها نسبت به مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده نیز در جدول 1 ذکر شده است.

نتایج تجربی حاصل از تست صوتی ترانسدیوسر با نتایج مدل‌سازی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی، و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک در شکل 17 مقایسه شده است. شکل 17 نشان می‌دهد که در مورد بیشترین حساسیت (پاسخ ولتاژ ارسالی) ترانسدیوسر، مدل‌سازی با مدل پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی خطای کمتری دارد ولی در مورد فرکانس رخ دادن بیشترین حساسیت، شبیه‌سازی با نرم‌افزار خطای کمتری را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از تست صوتی ترانسدیوسر همراه با مقادیر خطای روش‌های طراحی در جدول 2 ذکر شده است.

جدول 1 مقایسه الکتریکی ترانسدیوسر طراحی شده با نمونه واقعی

Table 1 Electrical comparison of the designed transducer with the real one

مقدار امپدانس در رزونانس (Ω)	فرکانس رزونانس (kHz)	
4000	19.75	تست تجربی (تحلیل گر امپدانس)
3700	23.8	پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی
-7.5	+20.5	درصد خطای پارامتر متمرکز و مدار معادل
4250	19	المان محدود
+6.3	-3.8	درصد خطای المان محدود

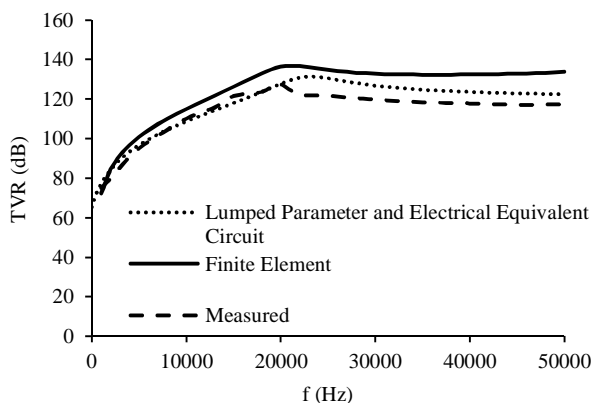


Fig. 17 Comparison of the measured TVR of the fabricated transducer with the designed and simulated ones

شکل 17 مقایسه‌ی پاسخ ولتاژ ارسالی ترانسدیوسر ساخته شده با مقادیر مدل‌سازی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک

نحوه‌ی کار دستگاه تحلیل گر امپدانس به این صورت است که با ارسال یک سیگنال، جریان الکتریکی خروجی را اندازه می‌گیرد و سپس با استفاده از ولتاژ ورودی و جریان خروجی، امپدانس الکتریکی را محاسبه و رسم می‌کند [19].

تست آکوستیکی در یک استخر آب و با تجهیزاتی از قبیل هیدروفون استاندارد، اسیلوسکوپ، منبع ولتاژ DC، تولید کننده سیگنال و ترانسدیوسر ساخته شده (به عنوان پروژکتور) برای تست فرستندگی انجام می‌شود. نحوه کار وسایل فوق در کنار هم به‌صورت شماتیک در شکل 15 نشان داده شده است. فاصله قرارگیری و ولتاژ و فشار اعمالی برای تست‌های فرستندگی و گیرندگی، همگی بر اساس استانداردهای تست ترانسدیوسر انجام می‌شود [10]. به‌عنوان مثالی، از این استاندارد، ولتاژ اعمالی، یک ولت و فاصله‌ی اندازه‌گیری فشار موج تولید شده، یک متر است. مهم‌ترین مشخصه‌ای که از تست‌های آکوستیکی به دست می‌آید، منحنی پاسخ ولتاژ ارسالی ترانسدیوسر است [18].

4-2- مقایسه و اعتبارسنجی

شکل 16 نمودار امپدانس الکتریکی به دست آمده از تست تجربی (به کمک دستگاه تحلیل گر امپدانس)، مدل‌سازی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی، و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان محل فرکانس‌های رزونانس و آنتی‌رزونانس را با توجه به نقاط اکسترمم نمودار پیدا کرد. نقطه مینیمم مربوط به فرکانس رزونانس است و نقطه ماکزیمم، محل فرکانس آنتی‌رزونانس را نشان می‌دهد [5]. در شکل 16 مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از طراحی با

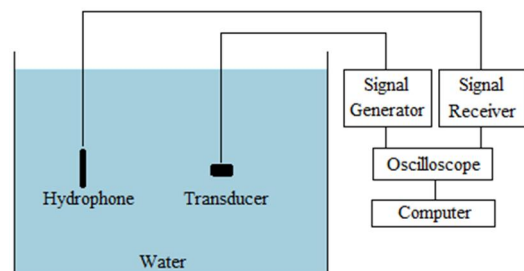


Fig. 15 Schematic of the transducer acoustic test set-up

شکل 15 تصویر شماتیک از نحوه انجام تست آکوستیکی ترانسدیوسر

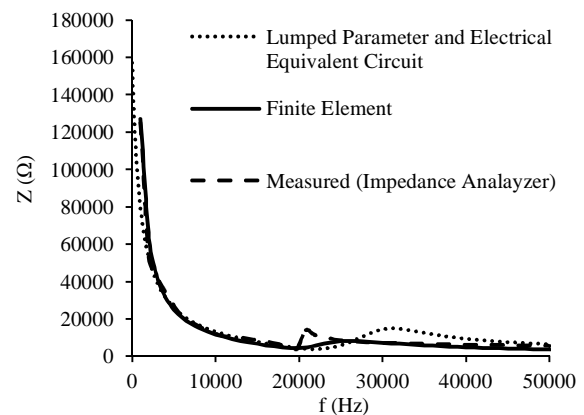


Fig. 16 Comparison of the measured electrical impedance of the fabricated transducer with the designed and simulated ones

شکل 16 مقایسه‌ی امپدانس الکتریکی حاصل از تست تجربی، مدل‌سازی با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک

بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی را بهتر پیش‌بینی کرده است، اما شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک برای سایر موارد خطای کمتر و مناسبی دارد و برای شبیه‌سازی این‌گونه ترانسدیوسرها کاملاً مناسب است.

6- مراجع

- [1] M. Bahadori, *An Introduction To Underwater Acoustics And SONAR Technology*, pp. 5-7, Tehran: Naghoos, 2014. (in Persian)
- [2] C. Sherman, J. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound (Underwater Acoustics)*, pp. 98-160, New York: Springer, 2007.
- [3] J. F. Tressler, *Piezoelectric and Acoustic Material for Transducer Applications*, pp. 234-236, New York: Springer, 2008.
- [4] A. D. Waite, *Sonar for Practicing Engineers*, Third Edition, pp. 1-5, New Jersey: John Wiley & sons, 2008.
- [5] B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, pp. 2-4, California: Peninsula Publishing, 1988.
- [6] V. Vadde, B. Lakshmi, Characterization and FEM-based Performance Analysis of a Tonpilz Transducer for Underwater Acoustic Signaling Applications, *Proceedings of The COMSOL Conference*, Bangalore, India, November 4-5, 2011.
- [7] J. Tichy, J. Erhart, E. Kittinger, J. Privratska, *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*, Second Edition, pp. 55-60, New York: Springer, 2010.
- [8] D. Stansfield, *Underwater Electroacoustic Transducers*, Second Edition, pp.30-45, California: Peninsula Publishing, 1991.
- [9] S. Chhith, Y. Roh, Wideband Tonpilz Transducer with a Void Head Mass, *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 30, No. 1, pp. 361-362, 2009.
- [10] K.Cepni, *A Methodology for Designing Tonpilz-Type Transducers*, MSc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Ankara, September 2011.
- [11] J. Kim H. Kim, Y. Roh, Design and fabrication of multi-mode wideband tonpilz transducers, *Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol.32, No.3, pp. 191-198, 2013.
- [12] S. Suresh, S. Anbuarasan, M. Balachandhar, Structural analysis and modeling of tonpilz mems acoustic transmitter for high power imaging system, *International Journal of Emerging Science and Engineering*, Vol.1, No. 10, pp. 18-20, 2013.
- [13] S. C. Thompson, R. J. Meyer, D. C. Markley, *Performance of transducers with segmented piezoelectric stacks using materials with high electromechanical coupling coefficient*, Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 2013.
- [14] K. NguyenI, *Design and Comparison of Single Crystal and Ceramic Tonpilz Transducers*, MSc Thesis, University of Texas at Austin, Austin, 2010.
- [15] E. Kuntsal, W. Bunker, Guidelines for Specifying Underwater Electroacoustic Transducers, *Proceedings of The UDT 92 Conference*, London, England, June 22-23, 1992.
- [16] O.C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, First Edition, pp.122-136, New York: McGraw-Hill, 1986.
- [17] *Introduction to Comsol Multiphysics*, Accessed on 15 September, 2015; <http://www.comsol.com>.
- [18] S. C. Butler, Triply resonant broadband transducers, *Oceans MTS/IEEE*, Vol. 4, No. 1, pp. 1334-1341, 2002.
- [19] 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)

جدول 2 مقایسه صوتی ترانسدیوسر طراحی شده با نمونه واقعی

Table 2 Acoustical comparison of the designed transducer with the real one

فرکانس بیشترین (kHz) TVR	بیشترین TVR (dB)	
19.5	128.1	تست تجربی
23.8	131.4	پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی
+22	+2.5	درصد خطای پارامتر متمرکز و مدار معادل
21	135.5	المان محدود
+7.6	+5.7	درصد خطای المان محدود

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مراحل مختلف طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و تست یک ترانسدیوسر صوتی سونار پهن‌بند مورد بررسی قرار گرفته‌است. پس از انجام مدل‌سازی پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی، شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک و تست‌های تجربی روی ترانسدیوسر ساخته‌شده، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان نتایج نهایی این تحقیق معرفی نمود:

1- ترانسدیوسر شامل قسمت‌های الکتریکی، مکانیکی و صوتی است که با روش پارامتر متمرکز و روش مکمل آن یعنی مدار معادل الکتریکی می‌توان تمام بخش‌های آن را به‌طور مؤثری مدل‌سازی کرد. برای مدل‌سازی ترانسدیوسر، این دو روش به‌طور همزمان استفاده می‌شود. مدل‌سازی اولیه با روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی، روشی مناسب و کارآمد برای شروع طراحی است که مشخصات اجزای اصلی ترانسدیوسر را نتیجه می‌دهد؛ سپس با افزایش درجات آزادی می‌توان مشخصات جزئی‌تر و دقیق‌تری از سیستم را به دست آورد.

2- برای شبیه‌سازی ترانسدیوسر با هندسه کامل و پیچیده، روش تحلیل سه بعدی در نرم‌افزار المان محدود کامسول مولتی‌فیزیک بسیار مناسب است. البته در حل با روش المان محدود، تمام اقدامات برای جهت‌دهی مواد، محاسبات میدان دور و لایه‌ی جاذب باید به درستی اعمال شوند و مش‌بندی باید طوری انجام شود که نتایج، مستقل از اندازه مش محاسباتی باشد.

3- روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی، فرکانس رزونانس و مقدار امپدانس در این فرکانس را به ترتیب با مقادیر خطای 20.5% و 7.5% پیش‌بینی می‌کند. مقادیر این خطا برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی-فیزیک، به ترتیب 3.8% و 6.3% است که نشان می‌دهد شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک به خوبی می‌تواند عملکرد ترانسدیوسر را قبل از ساخت پیش‌بینی کند.

4- برای بیشترین پاسخ ولتاژ ارسالی و فرکانس رخ دادن آن، خطای روش پارامتر متمرکز و مدار معادل به ترتیب برابر 2.5% و 22% است؛ درحالی که این مقادیر برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک، به ترتیب 5.7% و 7.6% است. هرچند روش پارامتر متمرکز و مدار معادل الکتریکی مقدار