



ارائه روند طراحی و ساخت ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک جهت تمرکز امواج در فرکانس های پایین

یوسف حجت^{1*}، سعید انصاری²، محمدرضا کرفی³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، yhojjat@modares.ac.ir

کلیدواژگان

آرایه فازی
پیزوالکتریک
تأخیر زمانی
ترانسدیوسر
تمرکز امواج

چکیده

استفاده از ترانسدیوسرهای آلتراسونیک آرایه فازی به سبب ویژگی‌های منحصر به فردشان در بسیاری از کاربردها، از جمله بازرسی و عیب‌یابی، مخابرات زیردریایی و پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از قابلیت‌های مهم این ترانسدیوسرها، تمرکز امواج می‌باشد. هدف اصلی در این مقاله، تمرکز امواج آلتراسونیک با استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی خطی است. محیط تمرکز، آب در نظر گرفته شد. طراحی و ساخت در دو بخش مکانیکی و الکتریکی انجام شد. در ابتدا ابعاد کلی ترانسدیوسر با توجه به تعداد، اندازه و نوع چیدمان پیزوالکتریک‌ها تعیین شد. نوع چیدمان به صورت خطی شامل 8 المان دیسکی شکل انتخاب شد. بر اساس مودهای کاری پیزوالکتریک، فرکانس تقریبی 46 کیلوهرتز به عنوان فرکانس عملکرد انتخاب شد. سپس الگوریتم مورد نیاز جهت تحریک پیزوالکتریک‌ها، جنس و ابعاد ماده پستی و لایه تطبیقی تعیین گردید. در ادامه، مراحل ساخت و مونتاژ انجام شد. بخش طراحی الکتریکی شامل طراحی و ساخت مدار فرمان و قدرت جهت تحریک پیزوالکتریک‌ها بود. رفتار ترانسدیوسر به صورت تجربی شامل اندازه‌گیری فشار آکوستیکی در ارتفاع‌های مختلف از ترانسدیوسر، تأثیر ولتاژ تحریک پیزوالکتریک‌ها و تأثیر هر المان بر مقدار فشار آکوستیکی در ناحیه تمرکز بررسی شد. جهت اندازه‌گیری فشار آکوستیکی از هیدروفون استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد از مهم‌ترین عوامل در تمرکز امواج، تعداد و فاصله بین المان‌ها می‌باشد. به سبب مشکلات ساخت لایه تطبیقی از جنس PVDF، پلی‌پورتان انتخاب مناسبی است. همچنین در پیزوالکتریک‌های دیسکی شکل با نسبت قطر به ضخامت زیاد، مود اول شعاعی انتخاب مناسبی برای مود کاری ترانسدیوسر است. آزمایش‌های تجربی، صحت تخمین رفتار ترانسدیوسر را در رابطه با طراحی، الگوریتم استخراج شده و همچنین شبیه‌سازی تأیید کرد.

Present a procedure and fabrication of linear phased array ultrasonic for focusing waves in low frequency

Yousef Hojjat^{*}, Saeed Ansari, Mohammad Reza Karafi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, yhojjat@modares.ac.ir

Keywords

Phased array
Piezoelectric
Time delay
Transducer
Wave focusing

Abstract

Applying ultrasonic phased array transducers has been widely recognized through fault detection and inspection, underwater telecommunications and medical studies due to their uniquely significant properties. One important capability is wave focusing. The main objective in this study is focusing ultrasonic waves using linear phased array transducers. The environment in this research is water. Design and fabrication of these transducers is done in both mechanic and electric sections. First, dimensions of the transducers in terms of their number, size and arrangement elements were determined. The linear arrangement including 8 piezoelectric disks was checked. Based on piezoelectric shape modes, 46 kHz was determined as the appropriate operating frequency for the transducer. Afterwards, the appropriate algorithm for piezoelectric stimulation, backing material and their size in addition to the matching layer were determined; accordingly, simulation and verification of the design and estimation of transducer behavior were applied. Hence, assembly and construction stages of the transducer were done. Electric design includes the design and construction of control and power circuit to stimulate phased array transducers. The constructed transducer's behavior including acoustic pressure measurement in terms of different height levels of the transducer, piezoelectric stimulation voltage influence and each element influence on acoustic pressure in focused area was experimentally studied. Hydrophone was used to determine the acoustic pressure. Results indicate that one of the most important factors about wave focusing is the number and displacement of the elements. Polyurethane was the most proper choice in phased array transducers due the problems of using PVDF as matching layer. Concerning disk piezoelectric with high diameter proportion rather than high thickness, first radial modes are the proper choice for the transducer's shape mode. The experimental tests confirm the transducer's behavior evaluation correctness in terms of the design, extracted algorithm and also the simulation.

Please cite this article using:

Y. Hojjat, S. Ansari, M. R. Karafi, Present a procedure and fabrication of linear phased array ultrasonic for focusing waves in low frequency, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 47-56, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

امواج صوتی در زمینه‌های مختلف مانند پزشکی، آزمون‌های غیر مخرب، مخبرات زیردریایی، جوشکاری و غیره استفاده روزافزون یافته است. در بسیاری از این کاربردها مانند پزشکی و آزمون‌های غیر مخرب، نیاز است موج تولید شده در یک منطقه و به صورت قابل کنترل متمرکز شود. ایده استفاده از ترانسدیوسرهای آرایه‌ای و آرایه فازی جهت هدایت¹ و تمرکز موج² اولین بار به این دلیل مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی در زمینه پزشکی fvhd درمان بعضی بیماری‌ها و تصویربرداری مانند سونوگرافی به دلیل بی خطر بودن بسیار توسعه یافته است. همچنین در آزمون‌های غیرمخرب، fvhd بررسی انواع عیوب مانند ترک، تخلخل، ناخالصی و اندازه‌گیری و مکان‌یابی دقیق عیب استفاده می‌شود. در مخبرات زیردریایی نیز جهت عکس‌برداری، شناسایی معادن، اندازه‌گیری عمق دریا، جاسوسی، مطالعه حیوانات دریایی و غیره از این تکنولوژی استفاده می‌شود [1].

ایده استفاده از تداخل امواج آکوستیک در ترانسدیوسر آرایه فازی، به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمرکز امواج و هدایت امواج. ایده تکنیک آرایه فازی جایگزینی fvhd استفاده از ترانسدیوسرهای با توان بالا می‌باشد.

ترانسدیوسرهای آرایه فازی برخلاف دیگر ترانسدیوسرها، از شبکه‌ای از المان‌های پیزوالکتریک که به صورت مستقل و با فازهای متفاوت رفتار می‌کنند، تشکیل شده است. اگرچه در آزمون‌های آرایه فازی ساختارهای متفاوت و متنوعی از این شبکه‌های پیزوالکتریک را می‌توان مورد استفاده قرار داد، با این وجود ترانسدیوسرهای آرایه فازی عمدتاً از ساختاری متشکل از 8، 16، 32، 64 و یا 128 المان پیزوالکتریک برخوردارند [1].

هدف از ایجاد تأخیر در تحریک کریستال‌ها، برهم‌نهی امواج به صورتی می‌باشد که بتوان آن‌ها را در یک مسیر و زاویه خاصی هدایت یا در یک نقطه متمرکز نمود. مهم‌ترین فاکتور در هدایت یا متمرکز نمودن امواج، برنامه تأخیر زمانی می‌باشد که این برنامه وابسته به هندسه ترانسدیوسر آرایه فازی و سرعت صوت می‌باشد. در شکل 1 تمرکز و هدایت به صورت هم‌زمان نشان داده شده است.

ساده‌ترین شکل ترانسدیوسرهای آرایه فازی، چیدمان خطی کریستال‌ها پشت سر هم می‌باشد که در یک زمینه پلیمری

تعبیه شده باشد. ساختمان اصلی یک پراب از محفظه³، لایه انطباق‌دهنده امپدانس⁴، ماده پستی⁵، المان‌های پیزوالکتریک و سیم‌های اتصال تشکیل شده است. در شکل 2 شماتیکی از یک سیستم آرایه فازی نشان داده شده است.

فاکتورهای مهم هندسی در طراحی یک پراب آرایه فازی خطی در شکل 3 نشان داده شده است.

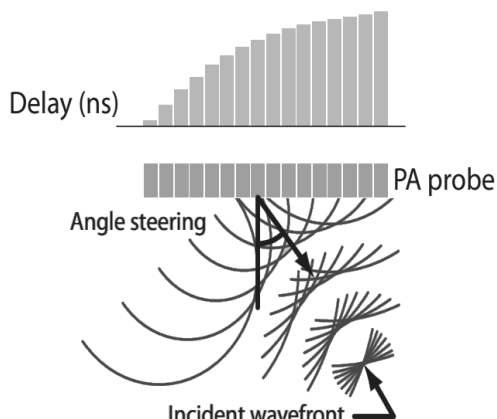


Fig. 2 Applying time delay for focusing [1]
 شکل 1 اعمال تأخیر زمانی جهت تمرکز امواج [1]

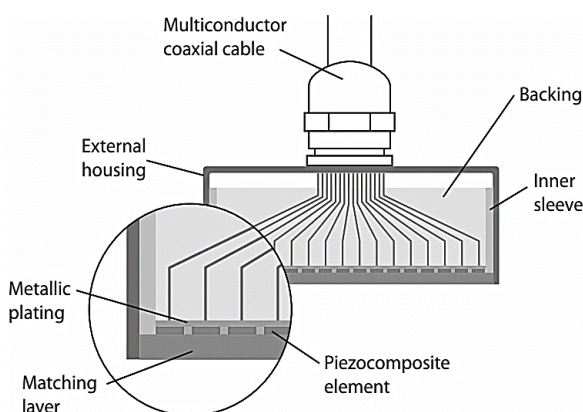


Fig. 2 Schematic of an ultrasonic phased array transducer [1]
 شکل 2 شماتیکی از ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آتراسونیک [1]

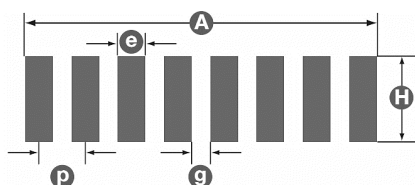


Fig. 3 Geometrical parameters of a linear phased array transducer elements [1]

شکل 3 پارامترهای هندسی المان‌های ترانسدیوسر آرایه فازی خطی [1]

A: طول کل المان‌ها، H: ارتفاع کریستال، p: گام، e: عرض کریستال، g: فاصله بین المان‌ها

³ Housing
⁴ Impedance Matching Layer
⁵ Backing Material

¹ Steering
² Focusing

دادند. آن‌ها به بررسی روش DSPM و کاربرد آن در بحث تمرکز امواج در ترانسدیوسرهای آرایه خطی آلتراسونیک با الگوریتم تمرکز پویا⁷ پرداختند. در این پژوهش آن‌ها با استفاده از روابط هندسی به بررسی تمرکز پرداخته و فرمول ارائه شده با تقریب می‌باشد [5].

همچنین در سال 2015 الساندرو و همکاران بر روی تولید امواج کششی منعطف⁸ با استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی نتایج نتایج تحقیقات خود را ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از روش المان محدود تأثیر چند نوع پیزوالکتریک و ماده الاستیک مربوط به صفحه منعطف، نوع تکیه‌گاه و ماده پستی را بر رفتار الکتروآکوستیکی ترانسدیوسر بررسی نمودند. از مزایای ترانسدیوسر ساخته شده می‌توان به وزن پایین و ضخامت کم در مقایسه با سایر ترانسدیوسرهای مشابه و همچنین انعطاف‌پذیری زیاد اشاره کرد. ترانسدیوسر ساخته شده قابلیت تمرکز به صورت پویا را نداشت و تمرکز تنها در یک ناحیه صورت می‌گرفت [6].

در سال 2014 لی و همکاران بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی به منظور شناسایی عیوب فعالیت نمودند. عرض لوب اصلی، نسبت دامنه لوب کناری به لوب اصلی، عرض المان‌ها پارامترهایی بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. آن‌ها برای یک عیب مشخص، پارامترهای ذکر شده ترانسدیوسر آرایه فازی خطی با 32 المان را بهینه‌سازی نمودند [7].

ساختار مقاله به صورت دو بخش طراحی و ساخت ارائه شده است. در بخش طراحی به طراحی مکانیکی و طراحی الکتریکی و در بخش ساخت به روند ساخت ترانسدیوسر پرداخته شده است.

2- طراحی مکانیکی

در این بخش به طراحی مکانیکی ترانسدیوسر شامل انتخاب فرکانس کاری ترانسدیوسر، تعداد المان‌ها و فاصله بین آن‌ها، انتخاب جنس ماده پستی و لایه تطبیقی اشاره می‌شود. پیزوالکتریک انتخاب شده دیسکی شکل به قطر 53 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر، از نوع PZT-4 بوده و فرکانس تشدید آن 46.05 کیلوهرتز بود. برای یافتن مود کاری در فرکانس تشدید از روش FEM استفاده شد. این فرکانس متناظر با اولین مود شعاعی بود. شکل 4 نمایش مود شعاعی پیزوالکتریک به صورت مقیاس واحد می‌باشد.

هدف از این مقاله، طراحی و ساخت یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک جهت خاصیت عملگری می‌باشد. با وجود اینکه در این زمینه کارهای فراوانی صورت گرفته شده است، ولی روندی جهت طراحی ترانسدیوسر آرایه فازی خطی جهت کار در فرکانس‌های پایین ارائه نشده است. به همین علت، یک مطالعه هدفمند جهت ارائه روند طراحی و ساخت این نوع ترانسدیوسرها صورت گرفت. همچنین یک روش تخمین رفتار بر پایه روش FEM ارائه و صحت‌سنجی شد.

دلیل استفاده از تمرکز امواج آلتراسونیک در فرکانس‌های پایین، کاربردهای فراوان آن می‌باشد. استفاده از انرژی امواج آلتراسونیک در جوشکاری و ماشین‌کاری و استفاده از اثر امواج، مانند تمیزکاری از مهم‌ترین کاربردهای امواج آلتراسونیک با فرکانس پایین می‌باشد.

در سال 1960 با استفاده از تداخل امواج، برای اولین بار بر روی یک ترانسدیوسر آرایه فازی پژوهش‌هایی صورت گرفت. در سال 1970 اولین سیستم آرایه فازی در پزشکی جهت عکس‌برداری از بدن انسان ساخته شد [2].

توماس و همکاران در سال 2016 با استفاده از تکنیک تمرکز غیرفعال جهت تمرکز امواج آلتراسونیک در هوا، ترانسدیوسر مورد نظر را طراحی نمودند. در این پژوهش، آن‌ها از چهار روش استفاده از لنز، هورن¹ مخروطی شکل²، آینه سهموی خارج از مرکز³ و صفحه فرسnel⁴ جهت تمرکز امواج آلتراسونیک بهره بردند. این نوع تمرکز قابلیت تمرکز به صورت پویا را نداشته و به صورت مکانیکی بود [3].

هون هی کیم و همکاران در سال 2015 بر روی الگوریتم تمرکز و هدایت امواج در اجسام جوش داده شده غیر هم جنس مطالعه نمودند. آن‌ها با استفاده از روش المان محدود دامنه سیگنال موج برگشتی را بعد از برخورد به عیب داخل قطعه اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها سه تکنیک جهت تمرکز امواج را بکار بردند. آن‌ها در حل معادلات، برخی از موارد را مانند میرایی و جهت‌گیری ساختار مواد را لحاظ نموده و به صورت هندسی به بررسی الگوریتم تمرکز پرداختند [4].

زیپینگ و همکاران در سال 2014 با استفاده از روش DSPM⁵ در شبیه‌سازی تمرکز امواج با استفاده از ترانسدیوسرهای آرایه خطی OPFC⁶ تحقیقات خود را ارائه

¹ Horn

² Apodization cone

³ Off-axis parabolic mirror

⁴ Fresnel zone plate

⁵ Distributed Point Source Method

⁶ Orthotropic piezoelectric fiber composite

⁷ Dynamic Depth Focusing

⁸ Flextensional

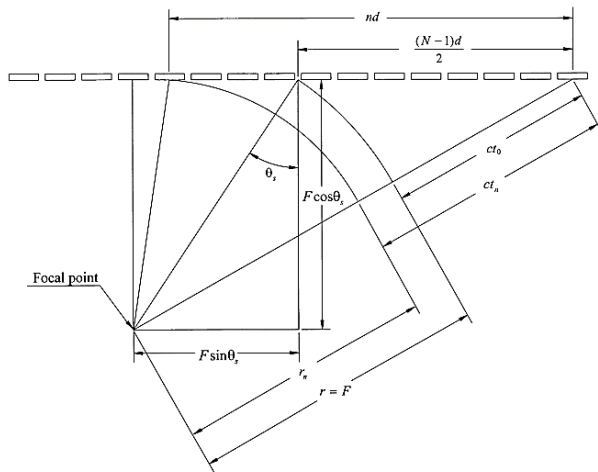


Fig. 5 schematic of a linear phased array transducer for focusing [8]
 شکل 5 شماتیک یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی جهت تمرکز [8]

در نهایت معادله (2) به شکل (4) بازنویسی می شود.

$$t_n = \frac{F}{c} \left(1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right) - \frac{F}{c} \left(1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right) \quad (4)$$

در این مقاله، هدف تمرکز امواج در راستای محور اصلی ترانسدیوسر می باشد؛ بدین معنی که زاویه هدایت صفر در نظر گرفته می شود. در این حالت، مقدار تأخیر زمانی برای هر المان به شکل رابطه (5) محاسبه می شود.

$$t_n = \frac{F}{c} \left(\left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right)^2 \right]^{1/2} - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right)^2 \right]^{1/2} \right) \quad (5)$$

همان طور که مشاهده می شود، تأخیر زمانی هر المان وابسته به سرعت صوت در محیط، فاصله نقطه تمرکز تا مرکز ترانسدیوسر، تعداد المان ها و فاصله مرکز تا مرکز دو پیزوالکتریک مجاور می باشد. صحت سنجی معادله (5) با استفاده از روش FEM مورد بررسی قرار گرفت.

4- انتخاب جنس ماده پستی

علت انتخاب ماده پستی، جلوگیری از ارتعاشات در جهت مخالف انتشار موج می باشد. همچنین ماده پستی باعث جلوگیری از پدیده رینگینگ¹ می شود؛ پس از قطع ولتاژ، پیزوالکتریک به دلیل اینرسی تمایل به ارتعاش دارد که ماده پستی باعث میراشدن ارتعاشات می شود. جنس ماده پستی به گونه ای انتخاب

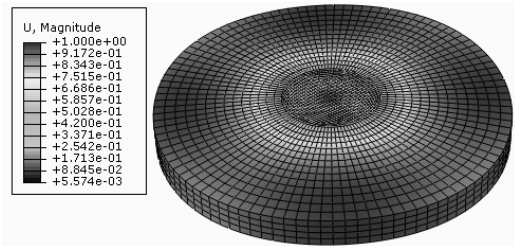


Fig. 4 Piezoelectric strain in first radial mode

شکل 4 کرنش پیزوالکتریک در اولین مود شعاعی

تعداد المان ها در آرایش خطی وابسته به تعداد خروجی سیستم کنترلی می باشد. در این پژوهش تعداد المان های پیزوالکتریک 8 در نظر گرفته شد.

3- الگوریتم تأخیر زمانی

در بحث تمرکز، برهم نهی امواج در یک ناحیه باعث افزایش فشار آکوستیکی نسبت به نواحی اطراف می شود. در این قسمت، الگوریتمی جهت تمرکز امواج با توجه به هندسه ترانسدیوسر ارائه می گردد. شکل 5 شماتیک هندسی یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی را نشان می دهد که شامل N المان پیزوالکتریک با گام d می باشد. هدف؛ تمرکز امواج در نقطه ای به فاصله F و با زاویه θ_s (زاویه هدایت) نسبت به محور ترانسدیوسر می باشد. با توجه به شکل 5 می توان رابطه (1) نوشت [8]:

$$(F \cos \theta_s)^2 + [F \sin \theta_s - (nd - \frac{N-1}{2}d)]^2 = [F - (t_n - t_0)c]^2 \quad (1)$$

با بسط دادن معادله (1) تأخیر هر المان به صورت رابطه (2) بدست می آید.

$$t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right\} + t_0 \quad (2)$$

که در آن t_n تأخیر زمانی المان n ام، F فاصله کانونی، c سرعت صوت، d فاصله مرکز تا مرکز دو المان مجاور، θ_s زاویه هدایت موج نسبت به محور ترانسدیوسر و t_0 تأخیر زمانی المان مرکزی می باشد.

مقدار ثابت t_0 را می توان با اعمال شرایط مرزی ($t_n = 0$ برای $n = 0$) به صورت زیر بدست آورد.

$$t_0 = \frac{F}{c} \left(1 - \left[1 + \left(\frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right)^2 - 2 \sin \theta_s \frac{d}{F} \left(-\frac{N-1}{2} \right) \right]^{1/2} \right) \quad (3)$$

¹ Ringing Effect

رابطه طول موج لایه تطبیقی برحسب امیدانس آن به صورت (7) می باشد.

$$\lambda = \frac{0.012}{\arcsin\left(\frac{21.78}{\sqrt{\frac{Z_2^2}{44.4} + \frac{44.4}{Z_2^2} + 19.78}}}\right)} \quad (7)$$

با توجه به معادله (7)، نمودار امیدانس لایه تطبیقی بر حسب طول موج به صورت شکل 6 می باشد. با توجه به شکل، در امیدانس 6/6 مگارایل مقدار $\lambda/4$ برابر 1/91 میلی متر می باشد. ماده تطبیقی بین پیزوالکتریک و محیط⁶ جهت افزایش ضریب انتقال قرار می گیرد. موجی که از پیزوالکتریک وارد ماده تطبیقی می شود، در طول آن بارها منعکس می شود. بخشی از امواج منعکس شده وارد پیزوالکتریک شده و بخشی از آن وارد محیط می شود. موج های منعکس شده در ماده تطبیقی با یکدیگر هم فاز⁷ بوده و برهم نهی آن ها موجی با دامنه بیشتر تولید می کند. موجی که بر اثر انعکاس از ماده تطبیقی وارد پیزوالکتریک شده و با موج تولید شده توسط پیزوالکتریک $\lambda/2$ اختلاف فاز خواهد داشت. همچنین امواج وارد شده به محیط نیز با یکدیگر تداخل کرده و باعث تقویت یکدیگر می شوند. این مطلب در شکل 7 نمایش داده شده است.

همان طور که بیان شد، از 8 عدد پیزوالکتریک به صورت خطی استفاده شد. اگر فاصله بین المان ها بسیار کم باشد، لوب های کناری یکدیگر را تقویت کرده و انرژی لوب اصلی کاهش می یابد. همچنین این موضوع باعث ایجاد خطا در آزمون می شود. در حالتی که فاصله المان ها زیاد شود، تأثیر هر المان کم می شود.

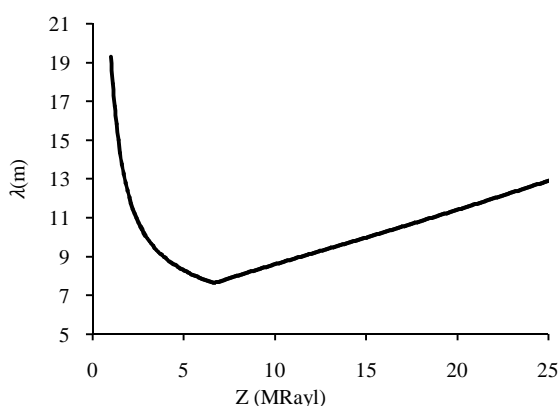


Fig. 6 Schematic of a linear phased array transducer for focusing

شکل 6 شماتیک یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی جهت تمرکز

می گردد که ضریب تضعیف آن حداکثر باشد تا موج آکوستیکی به سرعت میرا شود. همچنین باید کیفیت سطح بالا و خواص چسبندگی خوبی داشته باشد. برنج¹ گزینه مناسبی جهت ماده پستی می باشد که خواص اشاره شده را دارا می باشد. ضخامت ماده پستی تأثیر زیادی در عملکرد ترانسدیوسر نخواهد داشت. آزمون سرعت صوت در برنج با استفاده از روش پالس اکو² انجام شد و در یک صفحه با ضخامت 10 میلی متری، سرعت صوت 3700 متر بر ثانیه اندازه گیری شد. میانگین زبری³ در راستای طول ماده پستی 0/324 میکرومتر و در راستای عرض آن 0/784 میکرومتر اندازه گیری شد. مشخصات موادی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت، در جدول 1 آورده شده است.

5- محاسبه جنس و ضخامت لایه تطبیقی

برای انتخاب جنس و ضخامت لایه تطبیقی، مقادیر امیدانس آب و پیزوالکتریک در معادله (6) جایگزین می شود.

$$\alpha_T = \frac{4}{2 + \left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos^2(k_2 l) + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2}\right) \sin^2(k_2 l)} \quad (6)$$

حالت ایده آل، هنگامی اتفاق می افتد که بیشترین مقدار عبور موج از محیط اول به سوم وجود داشته باشد؛ در نتیجه مقدار α_T برابر 1 در نظر گرفته می شود. در معادله فوق Z_1 امیدانس آب می باشد و مقدار آن 1/5 مگارایل⁴ می باشد. همچنین Z_2 امیدانس لایه تطبیقی و Z_1 امیدانس پیزوالکتریک می باشد. k_2 عدد موج در لایه تطبیقی می باشد که برابر با $2\pi/\lambda_2$ می باشد. مقدار l برابر با $\lambda/4$ در نظر گرفته می شود که در ادامه توضیح داده شده است. جواب معادله فوق مقدار Z_2 را 6/6 مگارایل نتیجه می دهد. امیدانس پلیمر PVDF⁵ تقریباً این مقدار می باشد.

جدول 1 مشخصات مواد استفاده شده

Table 1 Properties of materials used

ماده	چگالی (kg/m ³)	سرعت موج فراصوت (m/s)	امیدانس آکوستیکی Z (kg/m ² s)
برنج	8800	3780	33/2×10 ⁶
پیزوالکتریک	7450	4000	29/6×10 ⁶
آب	1000	1500	1/5×10 ⁶

¹ Brass

² Pulse-echo

³ R_a

⁴ MRayl

⁵ Polyvinylidene Fluoride

⁶ Medium

⁷ In phase

شکل 11 شماتیکی از مراحل اجرای آزمایش را نشان می دهد. همچنین شکل 12 تجهیزات استفاده شده جهت تست را نشان می دهد.

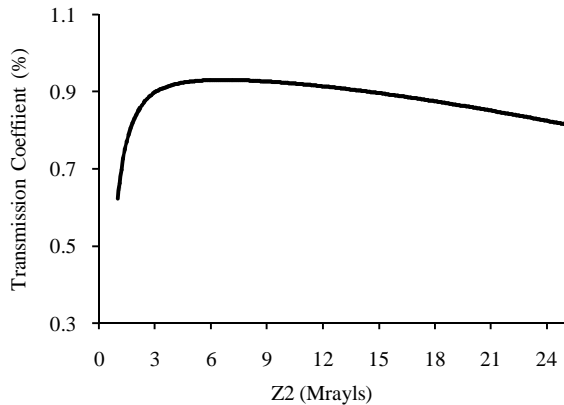


Fig. 8 Graph of impedance of matching layer in term of transmission coefficient

شکل 8 نمودار امپدانس لایه تطبیقی بر حسب ضریب عبور



Fig. 9 Polyurethane molding

شکل 9 قالب گیری پلی یورتان

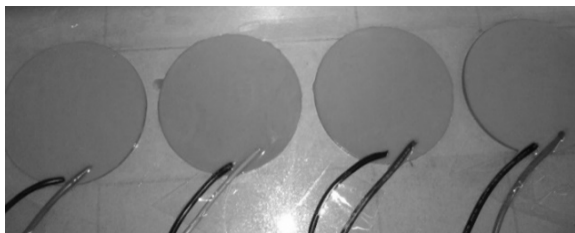


Fig. 10 linear phased array transducer

شکل 10 ترانسدیوسر آرایه فازی خطی

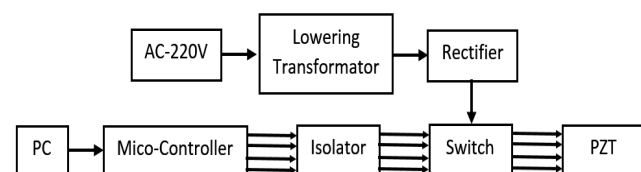


Fig. 11 Schematic of Experimental procedures

شکل 11 شماتیکی از مراحل انجام آزمایش

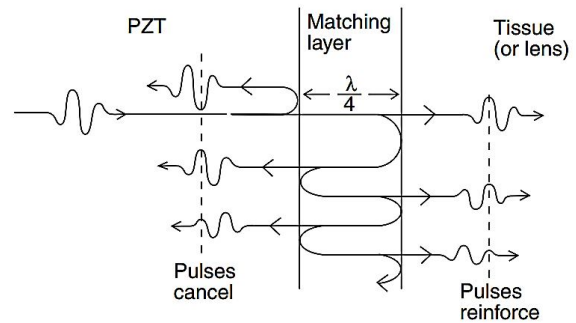


Fig. 7 Effect of matching layer on wave transmission [9]

شکل 7 تأثیر ضخامت لایه تطبیقی بر عبور موج [9]

معمولاً فاصله مرکز تا مرکز المانها در آرایش خطی کمتر از مقدار $\lambda \times 0.67$ در نظر گرفته می شود که λ طول موج محیط می باشد [10].

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1500}{45150} = 33.2 \text{ mm} ; 0.67 \times \lambda = 22.2 \text{ mm}$$

در این مقاله، فاصله المانها 5 میلی متر در نظر گرفته شد.

6- ساخت ترانسدیوسر

همان گونه که اشاره شد، جنس ماده پستی پلمیر PVDF باید در نظر گرفته شود. به دلیل مشکلات فوق در آماده سازی PVDF، از پلیمر پلی یورتان¹ استفاده گردید. علت این امر، نزدیکی مقدار امپدانس آکوستیکی PU به PVDF، در دسترس بودن و سادگی استفاده از آن بود. مقدار امپدانس آکوستیکی پلی یورتان 5/1 مگارایل بود. پلی یورتان از شرکت رن کست² و با کد FC 50 تهیه شد.

نمودار امپدانس PU به عنوان لایه تطبیقی بر حسب ضریب عبور به صورت شکل 8 می باشد. همان طور که مشاهده می شود، در محدوده امپدانس 4 مگارایل تا 7 مگارایل تغییرات ضریب عبور بسیار کم بوده و خارج از این محدوده، شیب نمودار زیاد می باشد. در نتیجه انتخاب PU به عنوان جایگزینی برای PVDF مناسب می باشد.

شکل 9 مراحل آماده سازی PVDF را نشان می دهد.

برای تثبیت خواص پلی یورتان به صورت کامل، قالب یک هفته در دمای محیط نگهداری شد. شکل 10 نمایی از ترانسدیوسر ساخته شده را نشان می دهد.

در این پژوهش از میکروکنترلر به عنوان مدار فرمان استفاده گردید. وظیفه این مدار، ایجاد فرکانس و زمان تأخیر برای هر یک از پیزوالکتریکها بود.

¹ Polyurethane (PU)
² RenCast

98/7 و 271 ولت و در سه ارتفاع 35، 46 و 55 میلی متر نشان می دهد. تأخیر زمانی مدار به گونه ای در نظر گرفته شد که تمرکز امواج در فاصله 55 میلی متری صورت گیرد. با توجه به نمودار، در یک ارتفاع ثابت، با افزایش ولتاژ، مقدار V_{p-p} بر حسب میلی ولت افزایش یافته است.

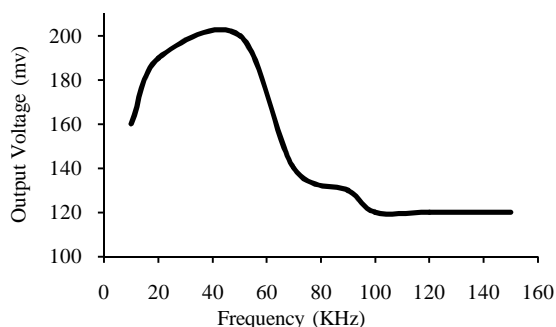


Fig. 13 Schematic representation of the acoustic pressure measurement using Hydrophone

شکل 13 نمایش شماتیکی از نحوه اندازه گیری فشار آکوستیکی با استفاده از هیدروفن

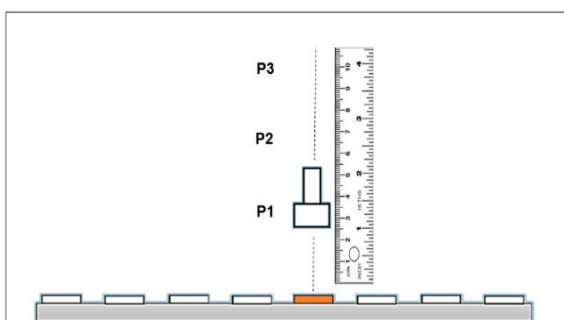


Fig. 14 Measuring the resonant frequency of the piezoelectric after assembly in transducer

شکل 14 اندازه گیری فرکانس پیزوالکتریک بعد از مونتاژ در ترانسدیوسر

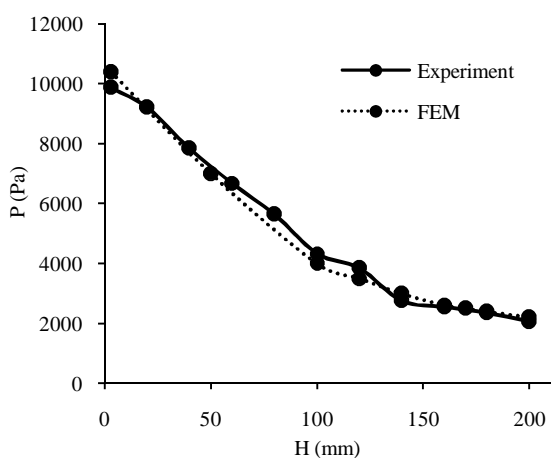


Fig. 15 Effect of hydrophone height from transducer on the acoustic pressure (100 v)

شکل 15 تأثیر ارتفاع هیدروفن از سطح ترانسدیوسر بر روی فشار آکوستیکی در ولتاژ 100 ولت

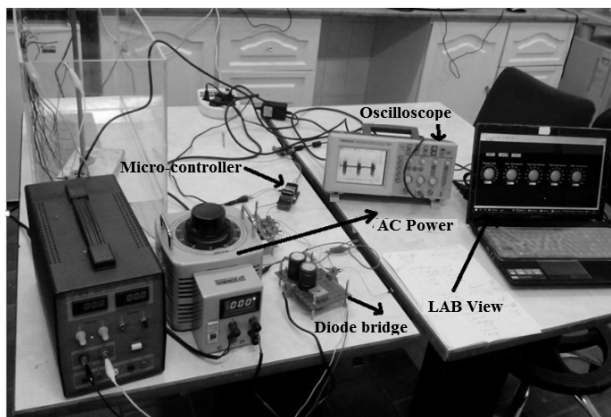


Fig. 12 Experimental equipment

شکل 12 تجهیزات استفاده شده

7- نتایج و بحث

برای اندازه گیری فشار آکوستیکی از هیدروفن استفاده شد. هیدروفن از شرکت پرسین آکوستیک¹ تهیه شد. پس از تعیین نقطه تمرکز و محاسبه تأخیر مورد نیاز هر پیزوالکتریک، مدار فرمان تنظیم شد و هیدروفن جهت اندازه گیری و ثبت فشار آکوستیکی در مکان مورد نظر قرار داده شد. شکل 13 به صورت شماتیکی، نحوه اندازه گیری فشار آکوستیکی مربوط به یک المان پیزوالکتریک را نمایش می دهد. مقادیر $P1$ و $P2$ و $P3$ فشار آکوستیکی در ارتفاع های مختلف می باشد. ضریب حساسیت هیدروفن نیز در فرکانس تشدید با توجه به صفحه داده² 35 میکروولت بر پاسکال در نظر گرفته شد.

همان گونه که بیان شد، فرکانس تشدید پیزوالکتریک در حالت آزاد³ 46/05 کیلوهرتز بود. هنگام قرار گیری در ترانسدیوسر به دلیل تغییر شرایط مرزی، نیاز است فرکانس تشدید آن بررسی گردد. در این حالت محدوده ای از فرکانس جاروب و مقدار ولتاژ ثبت شده توسط هیدروفن ثبت شد. همان طور که در شکل 14 ملاحظه می شود، در محدوده تقریبی 46 کیلوهرتز، مقدار ولتاژ افزایش یافته و این موضوع بیانگر فرکانس تشدید در این فرکانس می باشد.

شکل 15 مقدار فشار آکوستیکی یک المان پیزوالکتریک را با استفاده از روش تجربی و شبیه سازی (FEM) نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده به پیزوالکتریک به صورت سینوسی و با دامنه 100 ولت در نظر گرفته شد.

شکل 16 آزمایش فوق را با استفاده از ولتاژ 10 ولت نشان می دهد. شکل 17 تأثیر ولتاژ بر دامنه ولتاژ را در سه ولتاژ 70/5،

¹ Precision Acoustics

² Datasheet

³ Free Vibration

می‌شود. در گره، کمترین فشار و در شکم، بیشترین فشار آکوستیکی وجود دارد. در صورتی که در حالت تمرکز امواج، ناحیه تمرکز در یک بازه زمانی، حداکثر فشار آکوستیکی را نسبت به دیگر ناحیه‌ها خواهد داشت. شکل 21 تأثیر المان‌ها را به صورت نشان داده شده در ناحیه تمرکز بیان می‌کند. شکل 22 تأثیر هر یک از المان‌های پیزوالکتریک را در تمرکز امواج در ارتفاع 70 میلی‌متر نشان می‌دهد.

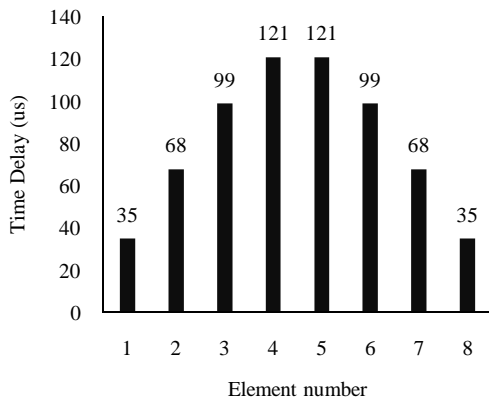


Fig. 18 Effect of input voltage to output peak-to-peak voltage

شکل 18 تأثیر ولتاژ ورودی به دامنه ولتاژ خروجی

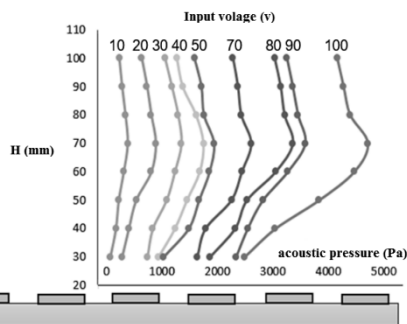


Fig. 19 Study of acoustic pressure at a height of 70 mm for focusing waves

شکل 19 بررسی تغییرات فشار آکوستیکی جهت تمرکز امواج در ارتفاع 70 میلی‌متری

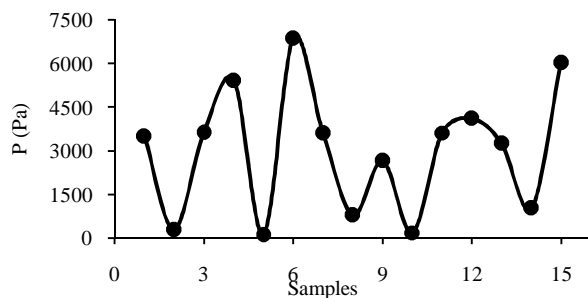


Fig. 20 Acoustic pressure changes related to stimulate all elements simultaneously

شکل 20 تغییرات فشار آکوستیکی مربوط به تحریک همه المان‌ها به صورت همزمان

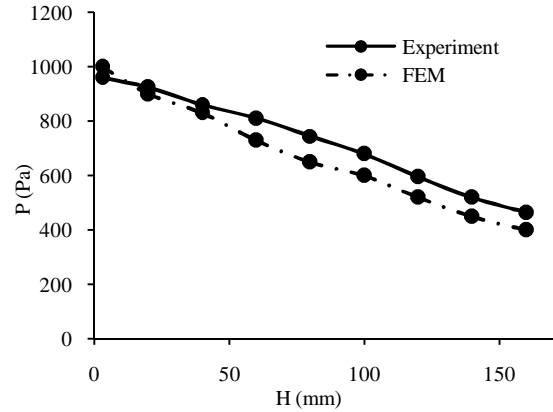


Fig. 16 Effect of hydrophone height from transducer on the acoustic pressure (10 v)

شکل 16 تأثیر ارتفاع هیدروفون از سطح ترانسدیوسر بر روی فشار آکوستیکی در ولتاژ 10 ولت

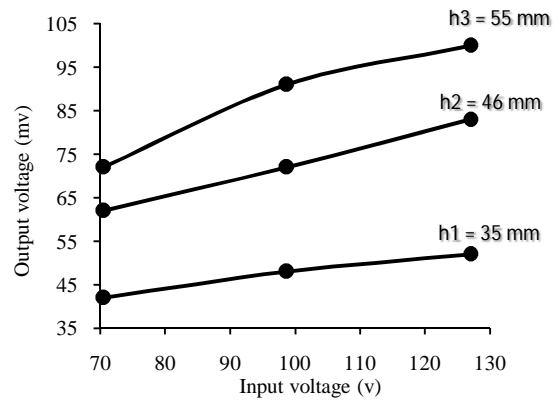


Fig. 17 Effect of input voltage to output peak-to-peak voltage

شکل 17 تأثیر ولتاژ ورودی به دامنه ولتاژ خروجی

در این بخش، هدف، تمرکز امواج در فاصله 70 میلی‌متری از سطح ترانسدیوسر و با زاویه هدایت صفر درجه می‌باشد. شکل 18 مقدار تأخیر زمانی هر المان را برحسب میکروثانیه نسبت به المان اول جهت تمرکز در این ارتفاع را نشان می‌دهد.

شکل 19 تأثیر ارتفاع هیدروفون از سطح ترانسدیوسر را بر فشار آکوستیکی در ولتاژهای تحریک مختلف نشان می‌دهد. تابع تحریک به صورت سینوسی اعمال شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ارتفاع 70 میلی‌متری فشار آکوستیکی افزایش یافته است. همچنین با افزایش ولتاژ در یک ارتفاع ثابت، افزایش فشار آکوستیکی مشاهده می‌شود.

هنگامی که تمام پیزوالکتریک‌ها به صورت هم‌زمان فعال باشند، تغییرات فشار آکوستیکی در فاصله 70 میلی‌متری از سطح ترانسدیوسر در یک مدت زمان به صورت شکل 20 می‌باشد. در این حالت موج از ناحیه موردنظر عبور می‌کند و تداخل امواج باعث ایجاد گره و شکم با دامنه‌های متفاوت

- 6- انتخاب ماده پستی
 7- انتخاب ماده واسط (جنس و ضخامت)
 8- شبیه‌سازی
 9- ساخت ترانسدیوسر

همچنین تأثیر پارامترهایی مانند ارتفاع هیدروفون از سطح ترانسدیوسر، ولتاژ تحریک پیزوالکتریک‌ها، تأثیر هر المان و فرکانس بر فشار آکوستیکی مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل اینکه زمان‌های تأخیر جهت تمرکز امواج آکوستیک در آب در حد چند ده میکروثانیه بود، نیاز است از مدار فرمان با دقت بالا و بدون نویز استفاده گردد.

علاوه بر موارد فوق، استفاده از پلیمر *PU* بجای *PVDF* به دلیل اختلاف امپدانس کم، جایگزین مناسبی می‌باشد. همچنین، افزایش تعداد المان‌ها، در افزایش مقدار فشار آکوستیکی در ناحیه تمرکز مؤثر خواهد بود. در پیزوالکتریک‌هایی که نسبت قطر به شعاع زیاد است، مد اول شعاعی بیشترین شدت را دارد.

آزمایش‌های تجربی، صحت تخمین رفتار ترانسدیوسر را در رابطه با طراحی، الگوریتم استخراج‌شده و همچنین شبیه‌سازی تأیید نمود.

9- فهرست علائم

α_T	ضریب عبور (%)
m	ارتفاع هیدروفون از سطح ترانسدیوسر (m)
t	زمان تأخیر (s)
Z	امپدانس آکوستیکی ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
	فشار (Pa)
	ولتاژ (v)
	سرعت صوت (m/s)
	فرکانس (Hz)

علائم یونانی

	طول موج (m)
	چگالی (kgm^{-3})

10- مراجع

- [1] Olympus, N. D. T., *Advances in Phased Array ultrasonic technology applications*, Olympus NDT, pp. 11, 2007.
 [2] Long, Marshall. *Architectural acoustics*, Elsevier, 2005.
 [3] Álvarez-Arenas, Tomás E. Gómez, Jorge Camacho,

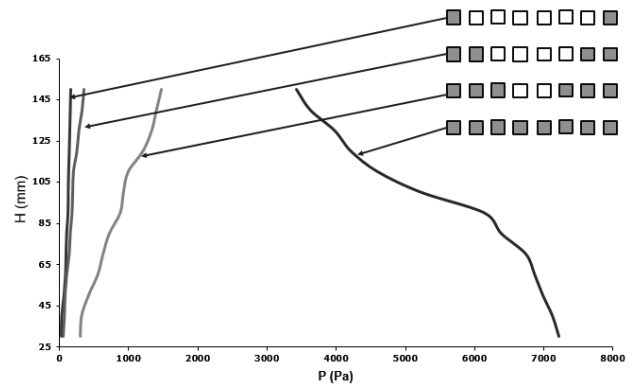


Fig. 21 Effect of fired elements on acoustic pressure of focusing zone
 شکل 21 تأثیر المان‌های مشخص شده بر مقدار فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز

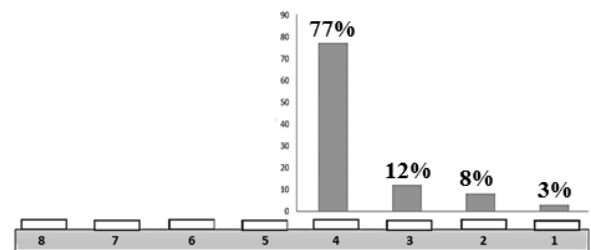


Fig. 22 The effect of each element on acoustic pressure of focusing zone at a height of 70 mm

شکل 22 درصد تأثیر هر یک از المان‌ها بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز در ارتفاع 70 میلی‌متری

8- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک طراحی و ساخته شد. روند طراحی و ساخت به دو قسمت تقسیم شد: طراحی و ساخت مکانیکی، طراحی و ساخت الکتریکی. در بخش مکانیکی، مدل هندسی ترانسدیوسر، انتخاب ماده پستی و لایه تطبیقی، تشدید پیزوالکتریک و فرکانس کاری مناسب، شبیه‌سازی و سپس ساخت ترانسدیوسر بررسی شد. در بخش الکتریکی نیز محاسبات مربوط به الگوریتم تأخیر، طراحی و ساخت مدار قدرت و فرمان صورت گرفت. محاسبات به‌گونه‌ای صورت پذیرفت تا انتقال امواج آکوستیک در آب صورت گیرد. برای اندازه‌گیری مقدار فشار آکوستیکی از هیدروفون استفاده شد. مرحله‌ای که جهت ساخت ترانسدیوسر آرایه فازی خطی پیشنهاد می‌شود، به‌صورت زیر می‌باشد:

- 1- انتخاب ابعاد کلی ترانسدیوسر با توجه به کاربرد
- 2- انتخاب چیدمان مناسب
- 3- انتخاب نوع پیزوالکتریک (ابعاد، فرکانس تشدید، مود کاری)
- 4- بدست آوردن الگوریتم تحریک المان‌ها
- 5- انتخاب تعداد المان‌ها

- frequency control, Vol. 63, No. 1, January 2016.
- [7] Li, Li, Xinliang Yu, Fangqin Li, and Baojia Chen, Parameter Optimization of Linear Phased Array Transducer for Defect Detection, *Open Automation and Control Systems Journal*, 6, pp. 488-492, 2014.
- [8] Azar L, Shi Y, Wooh SC, Beam focusing behavior of linear phased arrays, *NDT & E International* 33. 3, pp.189-198, 2000.
- [9] Hoskins, Peter R., Kevin Martin, and Abigail Thrush, *Diagnostic ultrasound: physics and equipment*, Cambridge University Press, p. 25, 2010.
- [10] Shaffaf, L., *Development of a Phased Array Focused Ultrasound Transducer for Two-Photon Microscopy Guided Neural Studies*, *Doctoral dissertation*, University of Toronto, p. 38, 2013.
- and Carlos Fritsch, Passive focusing techniques for piezoelectric air-coupled ultrasonic transducers, *Ultrasonics* 67, pp. 85–93, 2016.
- [4] Kim HH, Kim HJ, Song SJ, Kim KC, Kim YB, Simulation Based Investigation of Focusing Phased Array Ultrasound in Dissimilar Metal Welds, *Nuclear Engineering and Technology* , pp. 1-8, 2015.
- [5] Wang, Ziping, and Ying Luo, Focusing Modeling of OPFC Linear Array Transducer by Using Distributed Point Source Method, *Abstract and Applied Analysis*, Hindawi Publishing Corporation, 2014, Article ID 840748, 11 pages, Vol. 2014.
- [6] Savoia, Alessandro Stuart, Barbara Mauti, and Giosuè Caliano, A Low Frequency Broadband Flexensional Ultrasonic Transducer Array, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and*