



## مطالعه عددی تأثیر پارامترهای هندسی بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک

یوسف حجت<sup>1\*</sup>، سعید انصاری<sup>2</sup>، محمدرضا کرفی<sup>3</sup>

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، thojjat@tmu.ac.ir

### کلیدواژگان

### چکیده

آرایه فازی  
تأخیر زمانی  
تمرکز امواج  
فشار آکوستیکی

ترانسدیوسرهای آرایه فازی به دلیل ویژگی منحصربه‌فردی که دارند در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بکارگیری این نوع ترانسدیوسرها در تست‌های غیرمخرب برای شناسایی عیوب مانند تخلخل و ترک و همچنین اندازه‌گیری تنش، در پزشکی جهت عکس‌برداری و درمان بیماری‌ها و در نوابری و فاصله‌یابی صوتی (سونار) برخی از کاربردهای این سیستم می‌باشد. یکی از ویژگی‌های مهم این ترانسدیوسر نسبت به دیگر ترانسدیوسرها، قابلیت تمرکز امواج در هر فاصله و زاویه‌ای می‌باشد. هدف اصلی در این مقاله، بررسی پارامترهای هندسی یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی با تعداد 8 المان پیزوالکتریک مانند عرض و ضخامت المان‌ها، فاصله بین آن‌ها و همچنین فرکانس کاری مناسب و ولتاژ تحریک المان‌ها بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز با استفاده از روش عددی می‌باشد. ابتدا جهت صحت سنجی، رفتار یک المان به‌صورت تجربی با روش عددی مقایسه شد. فشار آکوستیکی در راستای محور کریستال با استفاده از دو روش تجربی و عددی اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های تجربی، صحت تخمین رفتار ترانسدیوسر را در رابطه با فشار آکوستیکی تأیید نمود. فرکانس کاری و شکل مود مناسب یک المان پیزوالکتریک دیسکی شکل با قطر 53 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر با استفاده از روش المان محدود محاسبه شد؛ مود شعاعی اول در فرکانس 45649 هرتز به عنوان مود و فرکانس کاری مناسب در نظر گرفته شد. الگوریتم مورد نیاز جهت بدست آوردن تأخیر زمانی هر المان به‌منظور تمرکز امواج در قالب یک برنامه کامپیوتری تدوین گردید و صحت آن با استفاده از روش المان محدود بررسی شد. همانطور که انتظار می‌رفت، فشار آکوستیکی در ناحیه تمرکز به‌دلیل برهم نهی امواج در یک بازه زمانی، بیشتر از حالتی می‌باشد که تمام کریستال‌ها همزمان تحریک گردد.

## Numerical study of the geometric parameters effect on acoustic pressure of focal point of a linear phased array ultrasonic transducer

Yousef Hojjat<sup>\*</sup>, Saeed Ansari, Mohammad Reza Karafi

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

\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, yhojjat@tmu.ac.ir

### Keywords

Phased array  
time delay  
wave focusing  
acoustic pressure

### Abstract

Phased array transducers because of their unique features, are used in many applications. Application of such transducers in non-destructive tests to detect defects such as porosity and crack, as well as stress measurement, in medicine for medical imaging and treatment of diseases, as well as in navigation range finder and acoustic (sonar), are some of the applications of this system. One of the important features of this type of transducer to other transducers, is the ability to focus waves at any distance and angle. The main objective of this paper is to study geometric parameters of a linear phased array transducer with 8 piezoelectric elements such as width and thickness, the distance between elements as well as excitation frequency and voltage on acoustic pressure at the focal point using numerical methods. First, for the purpose of verification, the experimental result of an element was compared with the numerical approach. The experimental tests confirm the transducer's behavior in terms of design, extracted algorithm and also the simulation. Acoustic pressure along the crystal axis was measured using both experimental and numerical methods. Experimental tests confirmed the accuracy of the transducer behavior in term of acoustic pressure. Operating frequency and mode shape of piezoelectric element disc shape with 53 mm diameter and thickness of 5 mm, was calculated using the finite element method. First radial mode in frequency of 45649 Hz was chosen as suitable frequency and shape mode. Algorithm to obtain the elements time delay to focus the waves was developed in the form of a computer program and its validity was investigated using the finite element method. As expected, due to the superposition of acoustic waves in the focal area over a period of time, its acoustic pressure is more than the time at which all crystals get excited simultaneously.

Please cite this article using:

Y. Hojjat, S. Ansari, M. R. Karafi, Numerical study of the geometric parameters effect on acoustic pressure of focal point of a linear phased array ultrasonic transducer, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-40, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

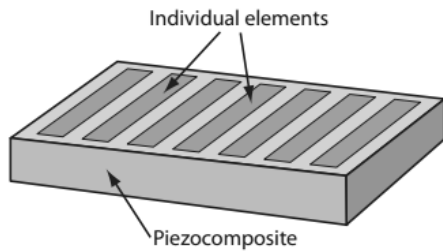


Fig. 1 Piezoelectric elements embedded in piezocomposite [1]  
 شکل 1 المان‌های پیزوالکتریک تعبیه‌شده در زمینه کامپوزیتی [1]

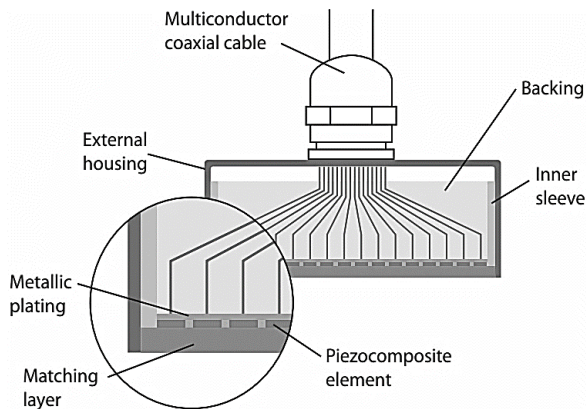


Fig. 2 Schematic of a linear phased array ultrasonic transducer [1]  
 شکل 2 شماتیکی از ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک [1]

ترانسدیوسرهای آرایه فازی برخلاف ترانسدیوسرهای معمولی که در آن از یک کریستال پیزوالکتریک استفاده می‌شود، از تعداد زیادی المان پیزوالکتریک جهت کاربردهای منحصربه‌فردی تشکیل شده است. از مزایای ترانسدیوسرهای آرایه فازی می‌توان به افزایش قدرت تفکیک‌پذیری<sup>1</sup>، کارایی بیشتر، قابلیت هدایت و تمرکز موج اشاره نمود. این قابلیت‌ها باعث استفاده از این سیستم در بسیاری از کاربردها شده است. از کاربردهای مهم این ترانسدیوسر می‌توان به عیب‌یابی و تشخیص ترک در قطعات، عکس‌برداری در علم پزشکی، درمان برخی بیماری‌ها و مخابرات زیر دریا<sup>2</sup> اشاره نمود.

قابلیت تمرکز امواج آلتراسونیک تنها در ترانسدیوسرهای آرایه فازی وجود دارد. بدین معنی که در این نوع ترانسدیوسرها، می‌توان موج را در یک ناحیه متمرکز نمود؛ به صورتی که مقدار فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز نسبت به نواحی دیگر حداکثر باشد. ترانسدیوسرهای آرایه‌ای از چندین کریستال پیزوالکتریک که به صورت خاصی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. نحوه قرارگیری المان‌ها معمولاً به صورت خطی، دوبعدی، حلقوی، مقعر و محدب می‌باشد و المان‌ها می‌توانند به صورت هم‌زمان یا مستقل از دیگر المان‌ها تحریک شوند.

ساختار کلی ترانسدیوسرهای آرایه خطی به صورت شکل 1 است. کریستال‌های پیزوالکتریک در یک زمینه پلیمری قرار داده شده است.

ساختمان اصلی یک ترانسدیوسر از محفظه<sup>3</sup>، لایه انطباق‌دهنده امپدانس<sup>4</sup>، ماده پشتی<sup>5</sup>، المان‌های پیزوالکتریک و سیم‌های اتصال تشکیل شده است. در شکل 2 شماتیکی از یک سیستم آرایه فازی نشان داده شده است. به دلیل اینکه در این نوع ترانسدیوسرها از تعداد زیادی المان پیزوالکتریک استفاده می‌شود، مسأله فضای مورد نیاز حائز اهمیت می‌باشد. پارامترهای هندسی مهم در طراحی ترانسدیوسر آرایه فازی تعداد کریستال‌ها، فاصله بین دو المان مجاور، طول و عرض آن‌ها می‌باشد.

نکته حائز اهمیت در بحث تمرکز امواج، نحوه تحریک المان‌ها می‌باشد. در چیدمان مقعر، تحریک همه المان‌ها به صورت هم‌زمان باعث می‌شود تا امواج در فاصله کانونی ترانسدیوسر متمرکز گردد.

در دیگر چیدمان‌ها مانند چیدمان خطی و دوبعدی، جهت تمرکز امواج، تحریک کریستال‌ها باید به گونه‌ای صورت گیرد که امواج در یک زمان از یک ناحیه عبور کنند. در این حالت تحریک المان‌ها به صورت هم‌زمان صورت نگرفته و هر المان با تأخیر، تحریک می‌گردد. نیاز است با توجه به چیدمان، تعداد، فاصله و ابعاد کریستال‌ها یک الگوریتم کلی جهت تمرکز محاسبه گردد. در ترانسدیوسرهای آرایه‌ای مقعر، قابلیت تغییر ناحیه تمرکز وجود ندارد در صورتیکه در چیدمان یک‌بعدی و دوبعدی، قابلیت تغییر ناحیه تمرکز در هر فاصله و زاویه‌ای وجود دارد [2].

همان‌گونه که بیان شد، هدف از ایجاد تأخیر در تحریک کریستال‌ها، برهم‌نهی امواج آلتراسونیک به گونه‌ای می‌باشد که بتوان در یک ناحیه و در یک بازه زمانی، مقدار فشار آکوستیکی را نسبت به دیگر نواحی، افزایش داد. شکل 3 شماتیکی از نحوی تحریک المان‌ها را جهت تمرکز امواج نشان می‌دهد.

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 [4].

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> SONAR

<sup>3</sup> Housing

<sup>4</sup> Impedance Matching Layer

<sup>5</sup> Backing

لی لی و همکاران مطالعات خود را در مورد شناسایی عیوب با استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک آغاز نمودند. آنها در ابتدا یک ترانسدیوسر آرایه فازی طراحی و سپس به بهینه‌سازی آن پرداختند. پارامترهایی که جهت بهینه‌سازی در نظر گرفتند، عرض المان‌ها و عرض لوب اصلی بود. هدف اصلی آن‌ها از بهینه‌سازی، افزایش کیفیت تصاویر در عکس‌برداری از قطعات بود [7].

در سال 2014 زیپینگ و همکاران بر روی ترانسدیوسرهای آرایه فازی تحقیقات خود را آغاز نمودند. آن‌ها یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی را با استفاده از روش DPSM<sup>4</sup> شبیه‌سازی نمودند و با استفاده از آن، روش تمرکز DDF<sup>5</sup> را در رابطه با ترانسدیوسر مدل شده بکار گرفتند. رفتار ترانسدیوسر در چندین زاویه مورد بررسی قرار گرفت [8].

هدف از این مقاله، مطالعه تأثیر برخی پارامترهای هندسی مانند عرض و ضخامت المان‌ها، فاصله بین آن‌ها و همچنین بررسی فرکانس و ولتاژ تحریک المان‌ها بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز با استفاده از روش عددی می‌باشد. پارامترهای هندسی و ابعادی کریستال‌ها، تأثیر بسزایی در عملکرد ترانسدیوسر دارد. تمرکز امواج در آب شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک<sup>6</sup> انجام شد. علت انتخاب این نرفازار، قابلیت ادغام چند فیزیک مختلف و حل همزمان آنها با انواع حل‌گرها<sup>7</sup> می‌باشد.

## 2- تمرکز امواج

همان‌گونه که بیان شد، مهم‌ترین موضوع در بحث تمرکز امواج، الگوریتم موردنیاز جهت تحریک المان‌ها می‌باشد. بدین معنی که هر المان با چه تأخیر زمانی تحریک گردد تا بتوان در یک ناحیه و در یک بازه زمانی مشخص، امواج آلتراسونیک متمرکز گردد و فشار آکوستیکی آن ناحیه نسبت به دیگر نواحی، افزایش یابد. معادله (1) جهت بدست آوردن تأخیر هر المان پیزوالکتریک جهت تمرکز امواج در زاویه  $\theta_s$  نسبت به محور اصلی و به فاصله  $F$  از مرکز ترانسدیوسر است [9].

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

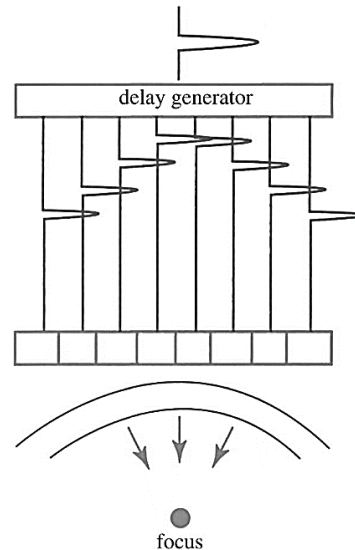


Fig. 3 Time delay applied to elements for focusing ultrasonic waves [3]  
شکل 3 اعمال تأخیر زمانی به المان‌ها جهت تمرکز امواج آلتراسونیک [3]

هوانگ و همکاران بر روی پارامترهای هندسی ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک جهت هدایت موج مطالعه نمودند. آن‌ها با استفاده از اصل هویگنس یک مدل ریاضی جهت انتشار امواج آلتراسونیک از یک ترانسدیوسر آرایه فازی ارائه نمودند. طبق این مدل جهت‌دهی موج تابعی از فاصله بین المان‌ها، تعداد و عرض آن‌ها و همچنین فرکانس مرکزی ترانسدیوسر است. علاوه بر این، آن‌ها تأثیر پارامترهای مؤثر بر عرض لوب اصلی، لوب کناری و لوب بشکهای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند اگرچه با افزایش تعداد المان‌ها می‌توان یک لوب اصلی تیز<sup>1</sup> بدست آورد ولی با این کار، لوب‌های کناری افزایش خواهند یافت. همچنین برای بهبود جهت‌دهی پرتو انتشار یافته از ترانسدیوسر می‌توان فاصله بین المان‌ها را افزایش داد. عرض المان‌ها نیز بر هدایت موج تأثیر قالب توجهی ندارد [5].

ژیانگ و همکاران در سال 2009 بر روی شبیه‌سازی ترانسدیوسرهای آرایه فازی با شدت تمرکز بالا HIFU<sup>2</sup> جهت درمان تومور مطالعات خود را آغاز نمودند. آن‌ها 90 المان PZT-8 دایره‌ای شکل به قطر 1/4 سانتی‌متر را بر روی یک پوسته استوانه‌ای به قطر 21 سانتی‌متر نصب نمودند. سپس آن‌ها به شبیه‌سازی هدایت و تمرکز امواج پرداختند و نتایج آزمایش خود را با آزمایش در حالت درون جاندار<sup>3</sup> ارزیابی نمودند. آن‌ها توانستند با استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی خود تمرکز را در یک نقطه و چندین نقطه به صورت همزمان ایجاد کنند [6].

<sup>4</sup> Distributed Point Source Method

<sup>5</sup> Dynamic Depth Focusing

<sup>6</sup> Comsol Multiphysics

<sup>7</sup> Solver

<sup>1</sup> Sharp

<sup>2</sup> High intensity focused ultrasonic

<sup>3</sup> Ex vivo

شکل 5 نحوه قرارگیری 2 المان پیزوالکتریک را از 8 المان نشان می‌دهد. پیزوالکتریک از قسمت پایین به ماده پستی مقید شده و از اطراف در تماس با پلیمر PVDF می‌باشد. علت انتخاب آب به عنوان محیط انتشار، استفاده از آن به عنوان محیط واسط در بسیاری از کاربردهای درمانی است.

در این شبیه‌سازی مش استفاده‌شده از نوع مثلثی آزاد<sup>5</sup> بود و استقلال از مش بررسی و حداقل و حداکثر اندازه مناسب مش به ترتیب 0/0045 میلی‌متر و 1/2 میلی‌متر محاسبه شد. همچنین فاکتور حداقل کیفیت المان<sup>6</sup> نیز 0/46 بدست آمد که بیانگر مش مناسب و بهینه می‌باشد. نوع حل گر مسأله، بصورت وابسته به زمان<sup>7</sup> در نظر گرفته شد.

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی، فشار آکوستیکی یک کریستال پیزوالکتریک به قطر 53 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر با استفاده از دو روش تست تجربی و شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. ابتدا مود مناسب کاری جهت تحریک کریستال با استفاده از روش FEM محاسبه گردید. شکل 6 مود شعاعی اول را در فرکانس رزونانس 45649 هرتز نشان می‌دهد.

در دیگر فرکانس‌های رزونانس، مود مناسب جهت تحریک و انتشار امواج در راستای محور پیزوالکتریک وجود ندارد. شکل 7 دیگر فرکانس‌های طبیعی را در فرکانس مشخص شده نمایش می‌دهد. در شکل 8 خط عمودی مشخص شده، نشان دهنده راستای اندازه‌گیری فشار آکوستیکی می‌باشد. در این حالت، یک المان از ترانسدیوسر آرایه فازی تحریک‌شده و فشار آکوستیکی موج تولیدشده در راستای محور آن المان اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شکل مشخص است لوب اصلی در راستای محور المان بوده و بیشترین فشار در آن راستا وجود دارد.

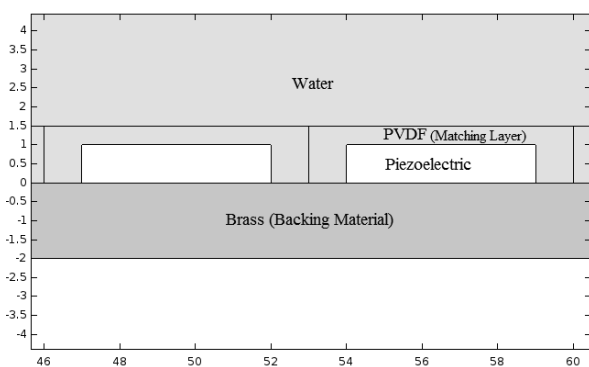


Fig. 5 Placement of Piezoelectric elements, medium, backing and matching materials in simulated linear phased array transducer

شکل 5 قرارگیری المان‌های پیزوالکتریک، محیط، ماده پستی و لایه تطبیقی در ترانسدیوسر آرایه فازی خطی شبیه‌سازی شده

در رابطه (1)،  $t_n$  تأخیر زمانی المان  $n$ ام،  $F$  فاصله کانونی،  $c$  سرعت صوت در محیط،  $d$  فاصله مرکز تا مرکز دو المان مجاور،  $\theta_s$  زاویه هدایت موج نسبت به محور ترانسدیوسر و  $t_0$  تأخیر زمانی المان مرکز می‌باشد.

رابطه (1) به صورت یک برنامه کامپیوتری تدوین گردید (شکل 4).

### 3- نتایج و بحث

فیزیک‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی، فیزیک فشار آکوستیکی<sup>1</sup>، مکانیک جامدات<sup>2</sup> و الکترواستاتیک<sup>3</sup> بود. نوع پیزوالکتریک انتخاب شده در شبیه‌سازی PZT-5h، به ضخامت 1 میلی‌متر و قطر 5 میلی‌متر می‌باشد. جنس لایه تطبیقی پلیمر PVDF<sup>4</sup>، جنس ماده پستی برنج و ضخامت لایه تطبیقی 2 میلی‌متر در نظر گرفته شد. جنس ماده پستی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که ضریب تضعیف آن حداکثر باشد تا موج آکوستیکی که داخل آن می‌شود، به سرعت میرا شود. همچنین باید کیفیت سطح بالا و خواص چسبندگی خوبی داشته باشد. گزینه مناسبی جهت ماده پستی می‌باشد که خواص اشاره‌شده را دارا می‌باشد. ضخامت ماده پستی تأثیر زیادی در عملکرد ترانسدیوسر نخواهد داشت [10].

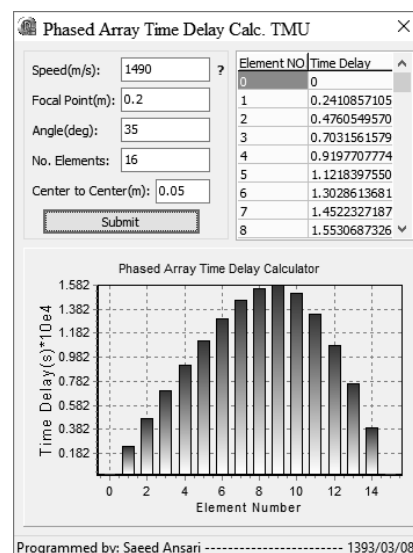


Fig. 4 Software written to calculate elements time delay for focusing waves using linear phased array ultrasonic transducer

شکل 4 نرم‌افزار نوشته‌شده جهت محاسبه تأخیر زمانی المان‌ها به منظور تمرکز امواج با استفاده از ترانسدیوسر آرایه فازی خطی آلتراسونیک

<sup>1</sup> Actd  
<sup>2</sup> Solid  
<sup>3</sup> Es  
<sup>4</sup> Polyvinylidene fluoride

<sup>5</sup> Free Triangular  
<sup>6</sup> Minimum Element Quality  
<sup>7</sup> Time Dependent

شکل 9 مقدار تأثیر ارتفاع از سطح پیزوالکتریک را بر فشار آکوستیکی نشان می‌دهد. در این آزمون پیزوالکتریک با ابعاد اشاره شده در آب قرار گرفت و با اعمال ولتاژ به پیزوالکتریک به صورت  $V=100 \sin(2\pi f t)$  فشار آکوستیکی در ارتفاع های مختلف ثبت گردید. فرکانس تحریک 46 کیلوهرتز در نظر گرفته شد.

همان گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و شبیه‌سازی به یکدیگر نزدیک می‌باشد و این نشان دهنده تخمین رفتار مناسب آزمون تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد.

در این قسمت، هدف محاسبه تأثیر فرکانس بر فشار آکوستیکی نقطه تمرکز می‌باشد. نقطه تمرکز با زاویه هدایت صفر درجه و با فاصله 25 میلی‌متر در نظر گرفته شد. تعداد المانها 8 عدد می‌باشد. نمودار زمان تأخیر المانها به صورت شکل 10 می‌باشد.

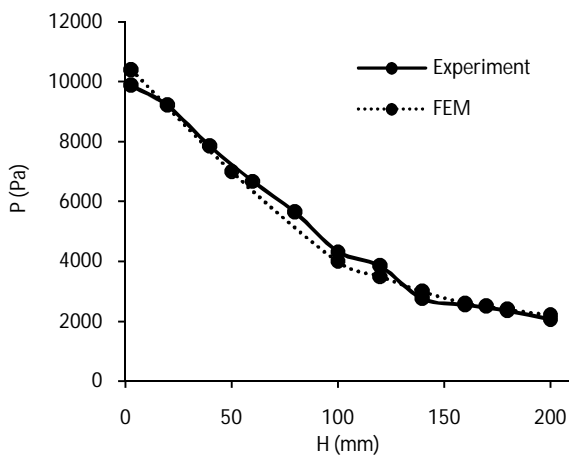


Fig. 9 Effect of increasing height from transducer on the acoustic pressure at voltage 100 v and frequency of 46 kHz

شکل 9 تأثیر افزایش ارتفاع از سطح ترانسدیوسر بر روی فشار آکوستیکی در ولتاژ سینوسی 100 ولت و فرکانس 46 کیلوهرتز

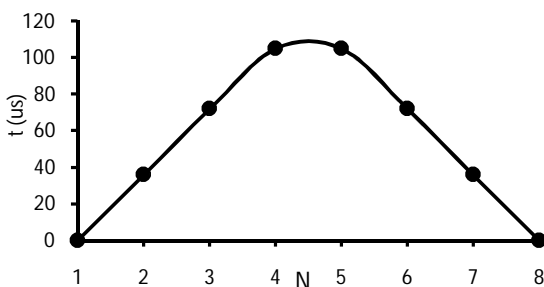


Fig. 10 Calculated time delay for focusing in distance of 25 mm and steering angle of 0° for 8 elements linear phased array transducer

شکل 10 تأخیر زمانی محاسبه شده جهت تمرکز در فاصله 25 میلی‌متر و زاویه هدایت 0 درجه برای یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی با 8 المان

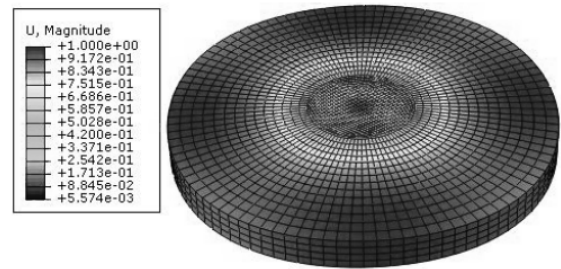


Fig. 6 First radial mode in the resonance frequency of 45649 Hz of a disk-shaped piezoelectric with a diameter of 53 mm and a thickness of 5 mm

شکل 6 مود شعاعی اول در فرکانس رزونانس 45649 هرتز مربوط به یک پیزوالکتریک دیسکی شکل با قطر 53 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر

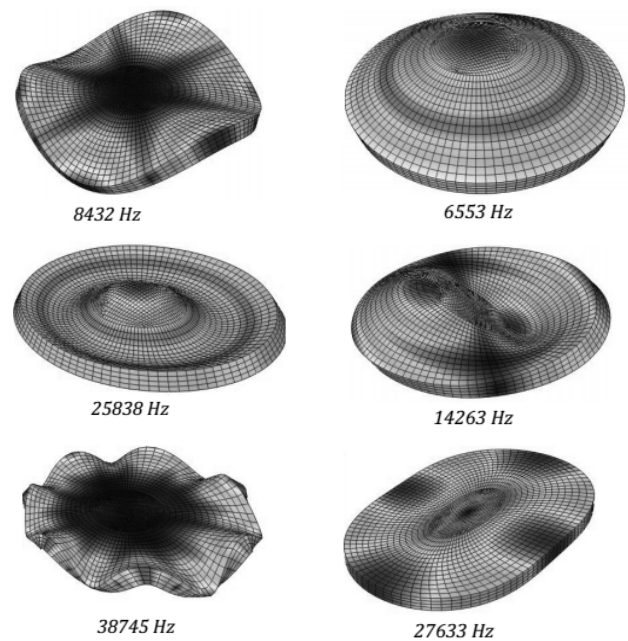


Fig. 7 The resonance frequencies and shape mode of the piezoelectric disc shape with a diameter of 53 mm and a thickness of 5 mm

شکل 7 فرکانس‌های رزونانس و شکل مود پیزوالکتریک دیسکی شکل به قطر 53 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر

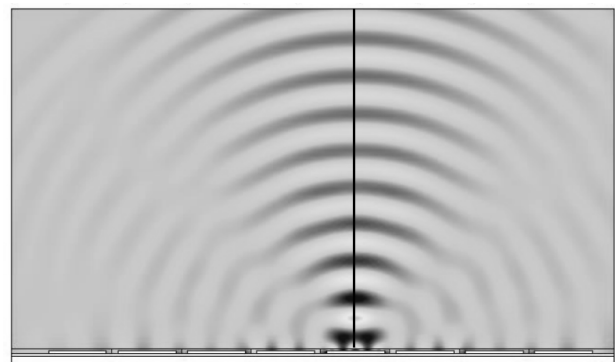


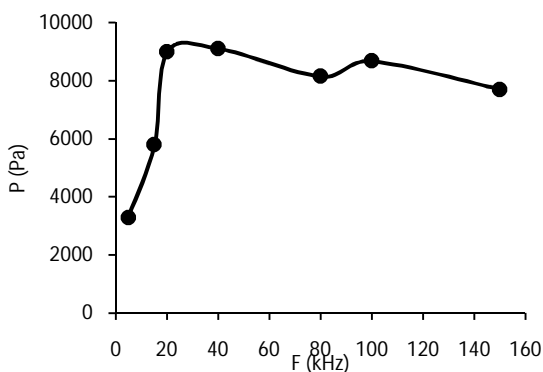
Fig. 8 Representing the direction of measurement of acoustic pressure of a main lobe of a fired piezoelectric in a linear phased array transducer

شکل 8 نمایش راستای اندازه‌گیری فشار آکوستیکی لوب اصلی یک پیزوالکتریک تحریک شده در یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی

شکل 14 تأثیر ولتاژ تحریک کریستال‌های پیزوالکتریک را بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ تحریک المان‌ها، فشار آکوستیکی به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

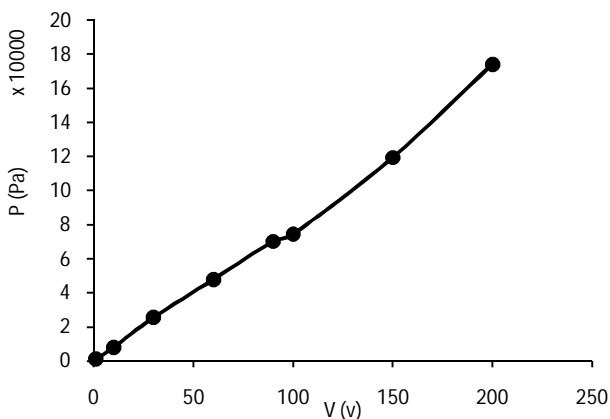
یکی از مهم‌ترین عوامل در فشار آکوستیکی، ضخامت پیزوالکتریک‌ها می‌باشد. در این مقاله، تأثیر ضخامت پیزوالکتریک‌ها بر فشار آکوستیکی بررسی شد. ضخامت‌هایی که جهت بررسی در نظر گرفته شد، 0.1، 0.5، 1، 1.5، 2، 2.5، 3 میلی‌متر بود. شکل 15 تأثیر ضخامت کریستال‌ها را بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز در فرکانس 46 کیلوهرتز نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، در ضخامت 0.5 میلی‌متر حداکثر فشار آکوستیکی در نقطه تمرکز بدست آمد. جدول 1 شرایط اولیه را جهت بررسی تأثیر عرض المان‌ها و فاصله بین آن‌ها را بر فشار آکوستیکی نقطه تمرکز نشان می‌دهد.



**Fig. 13** Calculated acoustic Pressure in focal point ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ) in Different frequencies

شکل 13 فشار آکوستیکی محاسبه‌شده در ناحیه تمرکز ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ) در فرکانس‌های مختلف

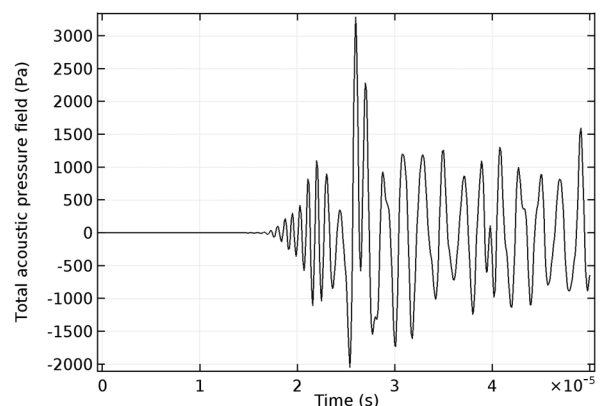


**Fig. 14** Effect of input voltage on acoustic pressure in focal point

شکل 14 تأثیر ولتاژ ورودی بر فشار آکوستیکی در ناحیه تمرکز

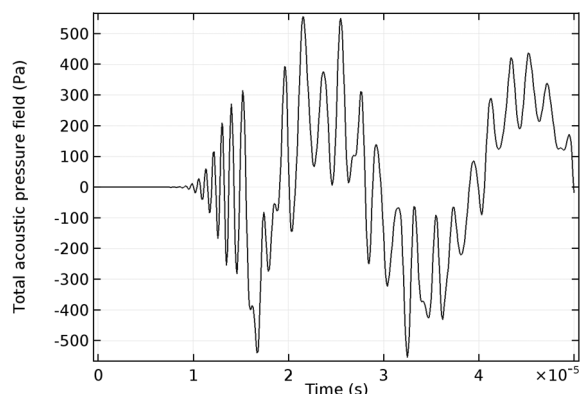
شکل 11 مقدار فشار آکوستیکی در فرکانس 5 کیلوهرتز را در ناحیه تمرکز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان تقریبی 25 میکروثانیه مقدار فشار آکوستیکی افزایش یافته است. در صورتی که تمام المان‌ها به صورت هم‌زمان فعال باشند، فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز قبل از رسیدن موج به آن، صفر بوده و سپس مقدار آن متغیر می‌باشد. این موضوع در شکل 12 نمایش داده شده است. در این تحلیل، فرکانس 46 کیلوهرتز، ولتاژ تحریک پیزوالکتریک 10 ولت و عرض المان‌ها 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

شکل 13 مقدار فشار آکوستیکی نقطه تمرکز را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرکانس تقریبی 20 کیلوهرتز و 100 کیلوهرتز مقدار فشار آکوستیکی افزایش یافته است. این نشان‌دهنده نزدیک بودن این فرکانس‌ها به فرکانس رزونانس در دو مود متوالی ترانسدیوسر می‌باشد.



**Fig. 11** Calculated acoustic Pressure in focal point ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ) in term of time

شکل 11 فشار آکوستیکی محاسبه‌شده در ناحیه تمرکز ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ) بر حسب زمان



**Fig. 12** Calculated acoustic pressure without applying time delay in term of time ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ). All elements fired simultaneously

شکل 12 فشار آکوستیکی محاسبه‌شده بدون اعمال تأخیر زمانی بر حسب زمان ( $25 \text{ mm}, 0^\circ$ ). همه المان‌ها هم‌زمان تحریک شده‌اند.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر برخی از پارامترهای هندسی و کاری بر نحوه عملکرد یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی بررسی شد. پارامترهای هندسی شامل عرض و ضخامت المان‌ها، فاصله بین المان‌ها بود و همچنین فرکانس تحریک کاری مناسب و ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک‌ها نیز بررسی شد. موارد اشاره شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. بررسی‌ها بر روی یک ترانسدیوسر آرایه فازی خطی با تعداد 8 المان پیزوالکتریک از نوع PZT-5h انجام شد.

به منظور یافتن فرکانس رزونانس، ابتدا با استفاده از روش FEM فرکانس‌های رزونانس و شکل مدهای یک پیزوالکتریک دیسک شکل، شبیه‌سازی شد. در فرکانس 45649 کیلوهرتز، کریستال مود شعاعی اول را نشان داد و بین دیگر مدهای مانند مود پیچشی و خمشی، به عنوان مود مناسب کاری در نظر گرفته شد. سپس برای ارزیابی، فشار آکوستیکی یک پیزوالکتریک را در راستای محور آن با استفاده از روش تجربی اندازه‌گیری شد و با روش عددی مقایسه شد. آزمایش‌های تجربی، صحت تخمین رفتار ترانسدیوسر را در رابطه با فشار آکوستیکی تأیید نمود.

الگوریتم تأخیر زمانی جهت تمرکز امواج به صورت در قالب یک نرم‌افزار نوشته و با استفاده از روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار تأخیر زمانی بدست آمده جهت تمرکز در زاویه هدایت صفر درجه، به صورت هارمونیک می‌باشد.

فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز هنگام اعمال تأخیر زمانی به المان‌ها و همچنین تحریک همه المان‌ها به صورت هم‌زمان بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد به دلیل برهم‌نهی امواج در ناحیه تمرکز در یک بازه زمانی، فشار آکوستیکی آن به مراتب بیشتر از حالتی است که تمام المان‌ها به صورت هم‌زمان تحریک شود.

علاوه بر موارد فوق، ولتاژ تحریک المان‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج از حاکی بودن یک رابطه تقریباً خطی بین ولتاژ اعمالی و فشار آکوستیکی در ناحیه تمرکز می‌باشد.

تأثیر عرض و ضخامت کریستال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این دو عامل تأثیر زیادی بر نحوه طراحی ترانسدیوسر آرایه فازی خطی دارد. علت این موضوع در تولید لوب‌های کناری می‌باشد. در این مقاله، مقادیر مناسب عرض و ضخامت المان‌ها بدست آمد.

#### 5- فهرست علائم

$P$  فشار (Pa)

$H$  ارتفاع از سطح ترانسدیوسر (m)

$f$  فرکانس (Hz)

شکل 16 تأثیر عرض المان را بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز با شرایط ذکر شده در جدول 1 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورتیکه عرض المان 1 میلی‌متر یا تقریباً 3/5 میلی‌متر باشد، فشار آکوستیکی کمترین مقدار را دارد. علت این امر برهم‌نهی لوب‌های کناری و کاهش انرژی لوب اصلی می‌باشد. در صورتیکه عرض المان 5 میلی‌متر باشد، فشار آکوستیکی نسبت به دیگر حالات بیشینه خواهد بود؛ به دلیل اینکه عرض المان بیشتر شده و مقدار انرژی بیشتری قابل تولید و انتقال خواهد بود.

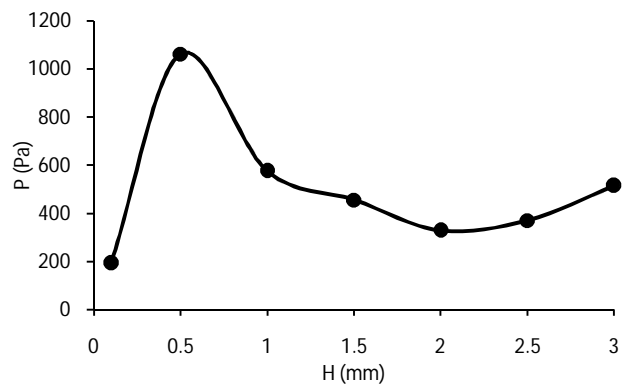


Fig. 15 Effect of thickness of piezoelectric elements on acoustic pressure of focal point

شکل 15 تأثیر ضخامت المان‌های پیزوالکتریک بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز

جدول 1 شرایط در نظر گرفته شده جهت بررسی تأثیر عرض المان‌ها و فاصله بین آن‌ها بر فشار آکوستیکی

Table 1 Conditions considered to evaluate the effect of width of elements and elements gap on acoustic pressure

پارامتر	مقدار
فرکانس	1.5 MHz
ولتاژ تحریک	1 v
ضخامت کریستال	0.5 mm
ضخامت لایه تطبیقی	0.5 mm

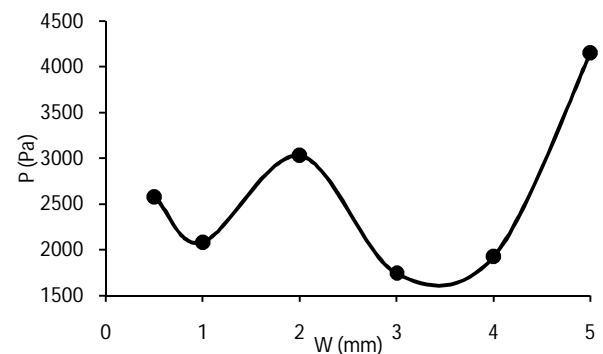


Fig. 16 Effect of width of piezoelectric elements on acoustic pressure of focal point

شکل 16 تأثیر عرض المان‌های پیزوالکتریک بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز

- [4] Long, Marshall. *Architectural acoustics*, Elsevier, 2005.
- [5] Huang, J., P. W. Que, and J. H. Jin, A parametric study of beam steering for ultrasonic linear phased array transducer, *Russian journal of nondestructive testing* 40.4 (2004): 254-259.
- [6] Ji, Xiang, et al, High-intensity focused ultrasound with large scale spherical phased array for the ablation of deep tumors, *Journal of Zhejiang University Science B* 10.9 (2009): 639-647.
- [7] Li, Li, et al, Parameter Optimization of Linear Phased Array Transducer for Defect Detection, *Open Automation and Control Systems Journal* 6 (2014): 488-492.
- [8] 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.
- [9] Azar, L., Y. Shi, and S-C. Wooh, Beam focusing behavior of linear phased arrays, *NDT & E International* 33.3 (2000): 189-198.
- [10] S. Moten, Modeling of an ultrasonic transducer for cardiac imaging. Tech. Rep. D&C 2010.049, *Dynamics and Control Group*, Eindhoven University of Technology, 2010.

$c$  سرعت صوت (m/s)

$V$  ولتاژ (v)

$t$  زمان تأخیر (s)

$W$  عرض المان (m)

$N$  تعداد المانها

علائم یونانی

$\lambda$  طول موج (m)

## 6- مراجع

- [1] Olympus, N. D. T., Introduction to phased array ultrasonic technology applications, D Tech Guideline, *Olympus NDT 2004*.
- [2] Renée K. Warriner, Richard S.C. Cobbold, Focused, phased-array plane piston and spherically-shaped concave piston transducers: Comparison for the same aperture and focal point, *Ultrasonics*, Volume 52, Issue 4, April 2012, Pages 503-507, ISSN 0041-624X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2011.11.002>.
- [3] Powers, Jeff, and Frederick Kremkau, *Medical ultrasound systems*, Interface focus 1.4 (2011): 477-489.