



بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی میدان آکوستیک ترنسدیوسر شستشو فراصوتی

مهدی سلیمانی^۱، اشکان صفربالی^۲، رضوان عابدینی^{۲*}، وحید فرتاش‌وند^۳، یونس علیزاده^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشکده هنر، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: rezvanabedini@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۴ آبان ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

شستشوی فراصوتی

میدان آکوستیک

امواج فرکانس بالا

ترنسدیوسر

ترنسدیوسرهای توان بالای فراصوتی با انتشار امواج فرکانس بالا در محیط مایع و ایجاد میدان‌های صوتی شدید موجب ایجاد پدیده کاویتاسیون درون مخزن مایع می‌شوند. انفجار حباب‌های ریز که به کاویتاسیون معروف هستند، حاصل میدان صوتی شدید، پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی می‌باشند و برای زدودن آلودگی‌ها از سطح قطعات حساس و پیچیده استفاده می‌شود. تعیین میدان آکوستیک ترنسدیوسر فراصوتی درون مخزن می‌تواند کمک شایانی در تعیین تعداد ترنسدیوسر لازم، فاصله بهینه بین آن‌ها و ابعاد مناسب مخزن نماید. با توجه به هزینه بالای آزمون‌های تجربی، روش اجزاء محدود یک ابزار مناسب جهت پیش‌بینی رفتار مجموعه ارتعاشی و تعیین میدان آکوستیک فراصوت در مایع درون مخزن می‌باشد. در این پژوهش تعیین فرکانس‌های رزونانس مجموعه‌ی ارتعاشی و بررسی میدان انتشار موج آکوستیک توسط نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود کامسول انجام گرفت. پس از ساخت اجزاء و مونتاژ مخزن، در بخش آزمون تجربی، میدان آکوستیک حاصل از ارتعاش فراصوت، به وسیله هیدروفون فرکانس بالا در موقعیت‌های مختلف مخزن اندازه‌گیری شد. بر اساس داده‌های نقشه‌برداری تجربی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی، فرکانس‌های هارمونیک و سوپرهارمونیک به صورت همزمان در محیط آب مشاهده شدند. تطابق نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی نشان داد که روش شبیه‌سازی یک ابزار مناسب جهت پیش‌بینی رفتار مایع درون مخزن تحت ارتعاشات فراصوت توان بالا می‌باشد.

Experimental investigation and numerical simulation of the acoustic field of the ultrasonic cleaning transducer

Mahdi Soleymani¹, Ashkan Safarbali², Rezvan Abedini^{2*}, Vahid Fartashvand³, Yunes Alizadeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Faculty of Art, Alzahra University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: rezvanabedini@iust.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 July 2024

Accepted: 14 November 2024

Keywords:

Ultrasonic Cleaning

Acoustic Field

High Frequency Waves

Transducer

Abstract

High-power ultrasonic transducers emit high-frequency waves in a liquid environment, creating intense sound fields that cause the phenomenon of cavitation inside the liquid tank. The explosion of small bubbles, known as cavitation, results from intense sound fields, as well as physical and chemical phenomena. This process is used to remove contamination from the surface of sensitive and complex parts. Determining the acoustic field of the ultrasonic transducer within the tank can assist in identifying the required number of transducers, the optimal distance between them, and the appropriate dimensions of the tank. Given the high cost of experimental tests, the finite element method is a suitable tool for predicting the behavior of the vibrating assembly and determining the ultrasonic acoustic field within the liquid inside the tank. In this research, the resonance frequencies of the vibrating assembly and the acoustic wave propagation field were investigated using COMSOL finite element analysis software. After fabricating the components and assembling the tank, the acoustic field resulting from ultrasonic vibration was measured in different positions of the tank using a high-frequency hydrophone during the experimental test phase. Based on the experimental mapping data and its comparison with the simulation results, both harmonic and superharmonic frequencies were observed simultaneously in the water environment. The consistency between the simulation results and the experimental tests demonstrated that the simulation method is a suitable tool for predicting the behavior of the liquid inside the tank under high-power ultrasonic vibrations.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Soleymani M, Safarbali A, Abedini R, Fartashvand V, Alizadeh Y. Experimental investigation and numerical simulation of the acoustic field of the ultrasonic cleaning transducer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jan 20;11(11):1-14. doi: 10.22034/ijme.2024.469216.1988 [In Persian]

۱- مقدمه

فرایند شستشوی فراصوتی یک روش نوین برای تمیز نمودن قطعات با شکل پیچیده و ابعاد ریز تا درشت است. در این فرایند، میدان آکوستیک ایجاد شده توسط ترنسدیوسر فراصوت درون مخزن موجب ایجاد و انفجار پی در پی حباب‌های ریز می‌شود. این پدیده به کاویتاسیون معروف است که پدیده‌های فیزیکی (افزایش دما و فشار) و شیمیایی (ایجاد رادیکال‌های آزاد و غیره) درون مایع را در پی دارد [۱]. اثرات فیزیکی و شیمیایی حاصل از کاویتاسیون درون مایع موجب زدودن کثیفی از سطح و داخل قطعات و تمیزکاری آن‌ها می‌شود که به تمیزکاری فراصوتی^۱ معروف است [۲]. پیشرفت در طراحی سیستم‌های فراصوتی مانند شستشوی فراصوتی و سونوراكتورها، به استفاده از ابزارهایی جهت پیش‌بینی رفتار ماده (مانند مایع) و تعیین میدان آکوستیک درون آن وابسته است. یکی از این ابزارها، استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوت در محیط‌های مایع است. با استفاده از شبیه‌سازی و صحت‌گذاری آن با آزمون‌های تجربی، می‌توان بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های فراصوت، افزایش بازده آن و بهبود یکنواختی توزیع پدیده کاویتاسیون در محیط مایع را انجام داد.

در فرایند شستشوی فراصوتی، پارامترهای مختلفی مانند فرکانس تشدید (رزونانس)، توان ارتعاشات، دما و ترکیب شیمیایی محلول، زمان عملیات و غیره در سرعت و کیفیت شستشو اثر دارد. طی دو دهه اخیر تحقیقات مختلفی پیرامون شبیه‌سازی میدان فراصوت در مایع با هدف پیش‌بینی عملکرد سیستم و بهینه‌سازی آن صورت گرفته است [۳]. زونگسو وی و همکاران [۴] با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، نقشه‌های فشار آکوستیک حاصل از یک هورن فراصوت پله‌ای را درون یک راکتور سونوشیمیایی ابعاد بزرگ تعیین نمودند. نتایج نشان داد در شدت‌های پایین ارتعاشات، تنها اثر فرکانس تحریک f و فرکانس هارمونیک دوم $2f$ قابل مشاهده است. اما با افزایش شدت ارتعاشات فراصوتی، زیرهارمونیک‌ها ($0.5f$) نیز مشاهده شدند.

ژونگ [۵] با شبیه‌سازی یک مجموعه شستشو در نرم افزار کامسول^۲ موقعیت بیشترین شدت امواج فراصوت در ظرف را پیدا کرد و در آزمایش تجربی با افزایش شدت امواج فراصوت مشاهده کرد در سطح فویل آلومینیومی فرسایش افزایش می‌یابد که نشان دهنده بهبود فرایند شستشو است. اژدست و همکاران [۶] با بررسی پارامتر دما در دستگاه شستشوی فراصوتی نشان دادند که با افزایش دما، روند تمیز شدن سطوح از آلودگی‌ها و ذرات چربی روی جسم افزایش می‌یابد. لایس [۷] با توسعه یک مدل تجزیه و تحلیل اجزاء محدود بر اساس نتایج تمیز کردن موفق از یک لوله آلوده به کلسیت، امکان‌پذیری دستیابی به فشارهای بالاتر از آستانه فشار کاویتاسیون (5bar) را نشان داد.

فروغی [۸] توسط شبیه‌سازی اجزاء محدود، اثر فاصله دو ترنسدیوسر در میدان آکوستیک فراصوتی را بررسی نمود. نتایج نشان داد که در یک فاصله بهینه، می‌توان به بالاترین نسبت حجم تحت کاویتاسیون به حجم کل دست یافت. آویلا و همکاران [۹] در آزمایش تجربی شستشوی فراصوتی، با افزایش جهشی فرکانس از 28kHz به 220kHz مشاهده کردند که تعداد حباب‌های حاصل از کاویتاسیون افزایش پیدا کرد. جویس [۱۰] در بررسی خود نشان داد افزایش فرکانس سیستم شستشوی فراصوتی موجب کاهش مقدار جلبک‌های فتوسنتزی سمی می‌شود. حمیدی و همکاران [۱۱] نشان دادند با افزایش توان فراصوت، ویسکوزیته مایع در مخزن فراصوت کاهش می‌یابد. موهولکار [۱۲] تغییر محدوده فرکانس در شستشوی فراصوتی روی روغن سیلیکون را بررسی کرد و مشاهده کرد که هر چه فروپاشی حباب‌ها شدیدتر باشد، شدت کاویتاسیون موضعی بیشتر است.

گورس [۱۳] در صنعت نساجی با شبیه‌سازی توزیع میدان فشار صوتی، به عنوان یکی از پارامترهای طراحی اثر موقعیت پارچه در میدان آکوستیک را در شستشوی فراصوتی بررسی کرد. نتیجه نشان داد موقعیت پارچه یکی از مهمترین عوامل برای دستیابی به میدان کاویتاسیون صوتی یکنواخت و قوی‌تر است. مک کوئین [۱۴] در شستشوی فراصوتی به از بین بردن آلاینده‌ها در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها پرداخت و نتیجه گرفت آلاینده‌های میکروسکوپی با فرکانس پایین‌تر و آلاینده‌های زیرمیکروسکوپی^۳ در فرکانس‌های بالاتر حذف می‌شوند. کوبایاشی [۱۵] برای کاهش رسوب غشاهای اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون محلول‌های پپتون^۴ و شیر از تغییر فرکانس در شستشوی فراصوتی استفاده کرد و نشان داد که فرکانس 28kHz بهینه‌ترین فرکانس برای کاهش

¹ Ultrasonic Cleaning

² COMSOL

³ Submicroscopic

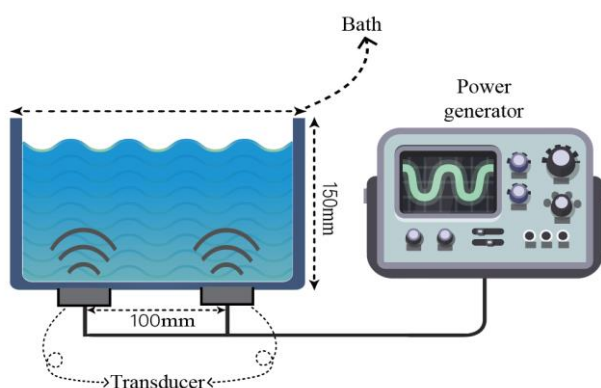
⁴ Peptone

رسوب می‌باشد. خواجه‌سامدینی و همکاران [۱۶] در پژوهش خود به دنبال کاهش مصرف امولسیون‌شکن‌ها^۱ با استفاده از فناوری فراصوت بودند و مشاهده کردند با پارامتر شدت میدان فراصوت و زمان می‌توان مصرف امولسیون‌شکن‌ها را تا ۵۰ درصد کاهش دادند. میراب حقیقی [۱۷] شرایط عملیاتی مختلفی را برای ارزیابی تاثیر امواج فراصوت بر تولید بیودیزل^۲ از روغن در نظر گرفت که نتایج نشان داد ثابت سرعت واکنش تولید بیودیزل به عنوان تابعی از فرکانس فراصوت می‌باشد.

تحقیقات در زمینه کاربرد فناوری فراصوت توان بالا در کاربردهای متنوعی نظیر شکل‌دهی فلزات [۱۸]، ماشینکاری [۱۹]، فرایندهای سونوشیمیایی و غیره نوید توسعه روزافزون این فناوری در صنایع آینده را می‌دهد. به همین دلیل شناخت پدیده‌های پیرامون آن و پیش‌بینی رفتار فراصوت توان بالا در محیط‌های مختلف می‌توان کمک بسزایی در توسعه و کاربردهای صنعتی این فناوری داشته باشد. با این هدف، در پژوهش حاضر شبیه‌سازی ارتعاشی مجموعه ترنسدیوسرها و مخزن توسط تحلیل مودال در نرم‌افزار کامسول انجام شد. از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار کامسول برای تعیین میدان فشار صوتی در محیط مایع درون مخزن استفاده شد. در شبیه‌سازی اجزاء محدود، تاثیر فرکانس و توان ارتعاشات بر شدت، نحوه توزیع و طیف فرکانسی میدان فرکانسی فشار آکوستیک در آب بررسی شد. فروغی در بررسی خود اثرات میدان آکوستیک در سیال را با پارامتر فرسایش قطعات آلومینیومی آزمود اما در این پژوهش بصورت جامع‌تر با هدف تعیین تجربی میدان آکوستیک فراصوتی در مخزن، فشار آکوستیک در نقاط مختلف مخزن شستشوی فراصوتی بر اساس یک نقشه مشخص توسط یک هیدروفون و ضبط‌کننده فرکانس بالا اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی با یکدیگر تطبیق و مقایسه گردیدند.

۲- دستگاه شستشو فراصوتی

مجموعه دستگاه شستشوی فراصوتی از سه قسمت اصلی (۱) ترنسدیوسر فراصوتی، (۲) منبع تغذیه و (۳) مخزن یا تانک شستشو تشکیل شده است (شکل ۱). در عملیات شستشوی فراصوتی، قطعه‌ی مورد نظر برای تمیز شدن، درون مخزن که دارای حلال‌های شست و شوی آبی و یا آلی می‌باشد، قرار می‌گیرد. منبع تغذیه فراصوت وظیفه تولید جریان متناوب الکتریکی فرکانس بالا (۲۰ kHz-۱۰۰ kHz) را از برق شهر دارد. ترنسدیوسر پیزوالکتریک ساندویچی، انرژی الکتریکی دریافتی از منبع تغذیه را به ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا تبدیل می‌کند. ارتعاشات آکوستیکی از طریق قطعه تطبیق به بدنه مخزن و سپس از طریق بدنه به مایع درون آن منتقل می‌شود. فرکانس رزونانس مجموعه وابسته به ابعاد و مشخصات مکانیکی اجزای ترنسدیوسر، مخزن و مایع داخل آن می‌باشد. به همین دلیل در شبیه‌سازی هر سه جزء در نظر گرفته شده‌اند.



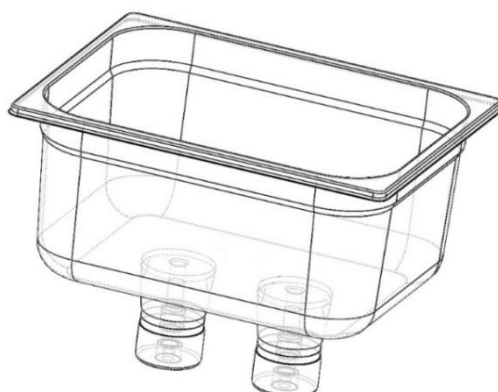
شکل ۱ شماتیک ترنسدیوسرها، منبع تغذیه و ابعاد کلی مخزن

شکل ۲ نمای سه بعدی ظرف و محل اتصال ترنسدیوسرها به ظرف به ابعاد $150 \times 223 \times 285$ mm را در شبیه‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار کامسول نشان داده است. برای ایجاد میدان آکوستیک در مخزن از دو ترنسدیوسر پیزوالکتریک ساندویچی با فرکانس نامی 25 kHz و توان نامی 200 W استفاده شده است. جنس ظرف فولاد ضدزنگ 304 و ضخامت آن 0.8 mm می‌باشد. ترنسدیوسرها از نوع

¹ De Emulsifiers

² Biodiesel

پیزوالکتریک ساندویچی و دارای یک قطعه پشت‌بند^۱، یک قطعه تطبیق مخروطی^۲، دو عدد پیزوالکتریک (ابعاد $5 \times 15 \times 38$ mm) و سه عدد الکتروود می‌باشند. جنس و خواص مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزاء محدود در جدول ۱ ارائه شده است.



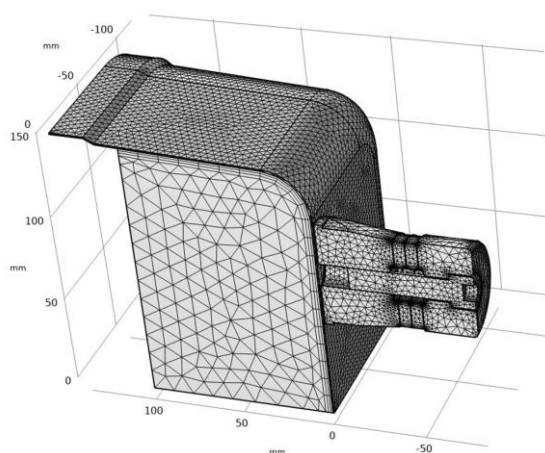
شکل ۲ نمای کلی مخزن و چیدمان ترنسدیوسرها در پژوهش حاضر

جدول ۱ پارامترهای مواد اجزای ترنسدیوسر فراصوتی [۲۰]

ماده	چگالی (Kg/m^3)	سرعت صوت (m/s)	ضریب پواسون	مدول ینگ (GPa)	امپدانس آکوستیک (10^5Pa.s/m^3)
فولاد ضدزنگ ۳۰۴	۸۰۰۰	۵۰۲۴	۰٫۲۹	۱۹۳	۴۴٫۷
آلومینیوم ۷۰۷۵	۲۸۲۳	۵۱۳۴	۰٫۳۳	۷۱٫۷	۱۶٫۹
برنج	۸۴۸۴	۴۷۹۰	۰٫۳۷	۱۰۵	--
PZT- ۴	۷۸۰۰	۴۵۶۰	--	۷۶٫۵	۲۶٫۲

۳- شبیه‌سازی

با توجه به تقارن مدل ظرف و ترنسدیوسرها و برای صرفه‌جویی در حجم محاسبات، یک چهارم از مجموعه در شبیه‌سازی اجزاء محدود در نظر گرفته شد. با این فرض شکل مودهای نامتقارن در پاسخ‌ها نمی‌آیند و ممکن است شبیه‌سازی با واقعیت فاصله بگیرد. شکل ۳ طراحی و مش ریزی مجموعه ترنسدیوسر، ظرف و مایع درون آن را نشان داده است. جدول ۱ پارامترهای شبیه‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده ترنسدیوسر شامل چگالی، سرعت صوت، ضریب پواسون، مدول ینگ و امپدانس آکوستیک را ارائه نموده است.



شکل ۳ طراحی مجموعه ترنسدیوسر، ظرف و مایع

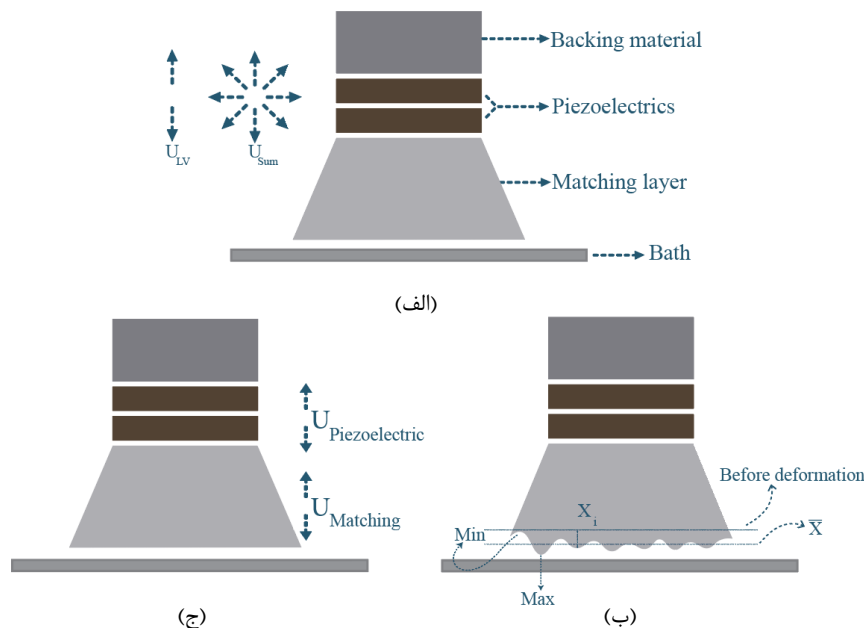
¹ Backing

² Matching

۳-۱- شبیه‌سازی آرایش ترنسدیوسرها

در حالت دوم و شبیه‌سازی مودال مجموعه ظرف و ترنسدیوسرها، با ثابت در نظر گرفتن ابعاد ظرف و ابعاد ترنسدیوسر، پارامتر مهم ورودی تاثیرگذار، فاصله بین موقعیت نصب دو ترنسدیوسر در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی فاصله‌ها از ۶۰mm تا ۱۷۰mm با گام ۱۰mm تغییر داده شد. برای هر فاصله اطلاعات ۱۰ شکل مود در محدوده ۲۲kHz الی ۲۷kHz استخراج و مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت.

برای مقایسه‌ی شکل مودها و دسته‌بندی موارد مطلوب از نظر ارتعاشی در این حالت، معیارهای الف) نسبت همراستایی، ب) یکنواختی و ج) نسبت تبدیل به شرح ذیل تعریف شدند. شکل ۴ نمای معرف هر یک از سه پارامتر الف) نسبت همراستایی، ب) یکنواختی و ج) نسبت تبدیل را نشان داده است. در ادامه به تعریف هر کدام از معیارها پرداخته خواهد شد.



شکل ۴ تشریح تصویری پارامترهای مهم در فیلتر کردن داده‌ها شامل الف) نسبت همراستایی، ب) غیریکنواختی و ج) نسبت تبدیل

الف) **نسبت همراستایی**: میانگین نسبت اندازه‌ی مولفه‌ی ارتعاش در راستای ترنسدیوسر (U_{LV})، به اندازه‌ی بردار ارتعاش در هر نقطه از ترنسدیوسر (U_{SUM}) است. بالا بودن این مولفه نشان می‌دهد که در شکل مود مورد بررسی ارتعاشات در راستای محور ترنسدیوسر بوده و ترنسدیوسر در این شکل مود دارای ارتعاش طولی است (شکل ۴-الف).

$$\text{Alignment ratio} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{U_{LV}}{U_{SUM}}}{n} \quad (1)$$

ب) **غیر یکنواختی**: نسبت انحراف از معیار به میانگین دامنه جابجایی نقاط روی سطح مرتعش ترنسدیوسر است. پایین بودن این معیار نشان‌دهنده‌ی یکنواختی جابجایی نقاط سطح جلو قطعه مچینگ ترنسدیوسر می‌باشد (شکل ۴-ب).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$\text{Non - uniformity parameter} = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

ج) **نسبت تبدیل**: نسبت تغییر طول مچینگ به تغییر طول پیروها است. بالا بودن این نسبت نشان‌دهنده‌ی قرار گرفتن گره ارتعاشی بر روی پیروها است (شکل ۴-ج).

$$\text{Conversion ratio} = \frac{U_{Matching}}{U_{piezoelectric}} \quad (3)$$

۳-۲- شبیه‌سازی محیط آکوستیک

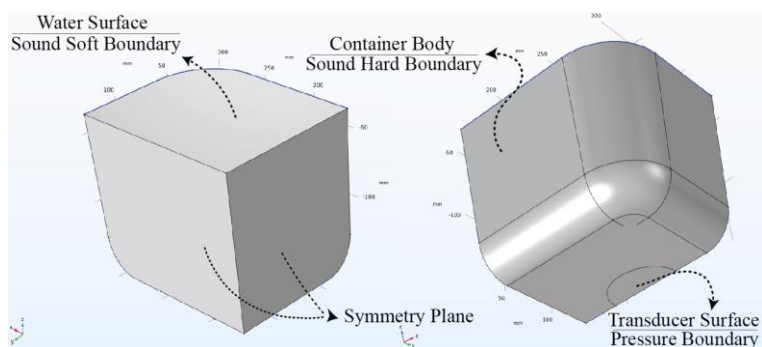
با توجه به اهمیت دستیابی به میدان یکنواخت فشار صوت در مایع و پیش‌بینی میدان، تعیین میدان فشار صوتی در مایع در نرم‌افزار کامسول انجام شده است. در این تحلیل، تحریک آب از طریق سطح ترنسدیوسر متصل به مخزن انجام شد. تحریک مایع از طریق اعمال فشار سینوسی با حداکثر دامنه ۰٫۲۳ MPa و فرکانس ۲۵ kHz انجام شد. با هدف پیش‌بینی میدان فشار آکوستیک با فرض ۲۵kHz به عنوان فرکانس تحریک اصلی (f)، نتایج شبیه‌سازی در فرکانس‌های تحریک الف (۰٫۵f، ب) f، پ) ۱٫۵f، و ت) ۲f استخراج شده است. در این تحلیل محیط مایع درون مخزن به صورت متقارن مدل شده است. در جدول ۲ خصوصیات فیزیکی مربوط به آب مورد استفاده (در دمای ۲۵°C) در شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی آب در شبیه‌سازی نرم‌افزار کامسول

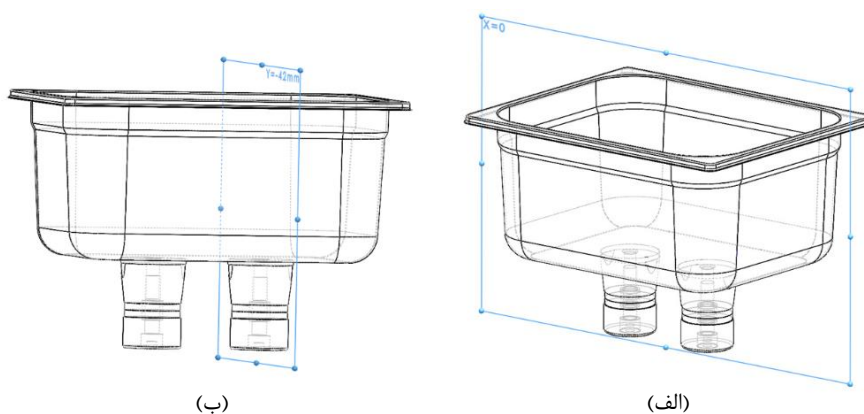
ماده	پارامتر	مقدار
	چگالی	$990,2 \text{ Kg/m}^3$
آب	سرعت صوت	$1533,5 \text{ m/s}$
	ویسکوزیته دینامیکی	$5,798 \times 10^{-4} \text{ Kg/m s}$

شرایط مرزی این ظرف به گونه‌ای است که در سطح آب (در محل تماس آب و هوا) فشار صفر در نظر گرفته می‌شود. در جهت عمود بر دیوار، ارتعاشی وجود ندارد و در سطح تماس ظرف و ترنسدیوسر فشار بصورت سینوسی با دامنه ثابت نوسان می‌کند (شکل ۵).

پس از انتخاب موقعیت ترنسدیوسرها در تحلیل مودال، شبیه‌سازی میدان آکوستیک مایع درون مخزن انجام شده است. با توجه به تقارن ظرف، نتایج در دو صفحه $X=0 \text{ mm}$ و $Y=-42 \text{ mm}$ ارائه شده اند (شکل ۶). در اولی صفحه نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک از وسط دو ترنسدیوسر می‌گذرد و در دومی صفحه در جهت عمود صفحه اول از وسط یکی از ترنسدیوسرها می‌گذرد.



شکل ۵ شرایط مرزی ظرف شستشو و نوع فشارهای وارده به ظرف

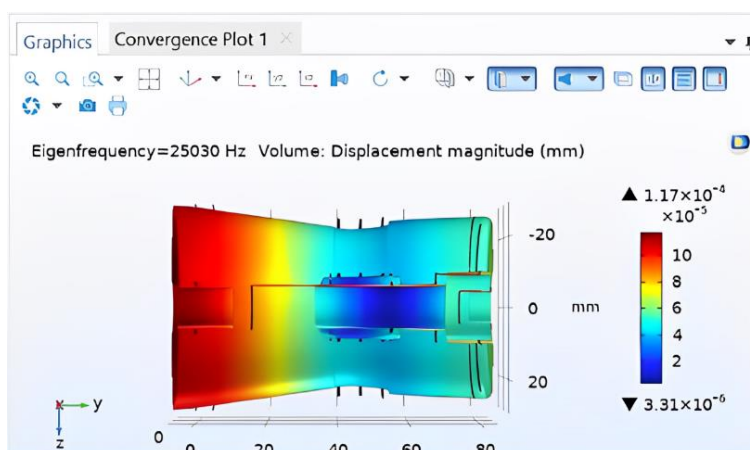


شکل ۶ صفحه الف) $X=0 \text{ mm}$ و ب) $Y=-42 \text{ mm}$ در آزمون نقشه‌برداری

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۳-۱- شبیه‌سازی مودال ترنسدیوسر

شبیه‌سازی تحلیل مودال در دو حالت ترنسدیوسر تنها و ترنسدیوسر با ظرف انجام شده است. ابعاد دقیق ترنسدیوسر با مدل‌سازی اجزاء ترنسدیوسر به تنهایی بدست آمده است و ترنسدیوسر بر مبنای آن ساخته شده است (شکل ۷). معیار مهم در تحلیل اجزاء محدود و تحلیل مودال حالت اول (ترنسدیوسر به تنهایی)، دستیابی به شکل مود طولی ارتعاش ترنسدیوسر پیزوالکتریک ساندویچی در فرکانس ارتعاش طولی برابر ۲۵kHz می‌باشد.



شکل ۷ تحلیل اجزاء محدود ترنسدیوسر در نرم افزار کامسول

۳-۳-۲- شبیه‌سازی مودال آرایش ترانسدیوسرها

پارامترهای مذکور برای شکل مودهای بدست آمده لحاظ شدند و داده‌هایی که نسبت تبدیل آن‌ها کمتر از ۱ بودند که داده نامناسب به حساب می‌آیند، حذف شدند. برای مرتبط کردن شکل مودها ابتدا پارامترهای نسبت تبدیل، غیریکنواختی و نسبت همراستایی بهنجارسازی^۱ شدند و سپس برای مقایسه و پیدا کردن بهترین شکل مود، مقادیر بهنجار سازی شده هر سه پارامتر در هر فاصله در هم ضرب و عدد نهایی، با عنوان پارامتر بهنجارسازی شده، به ترتیب از بیشترین به کمترین مقدار رتبه‌بندی شدند (جدول ۳).

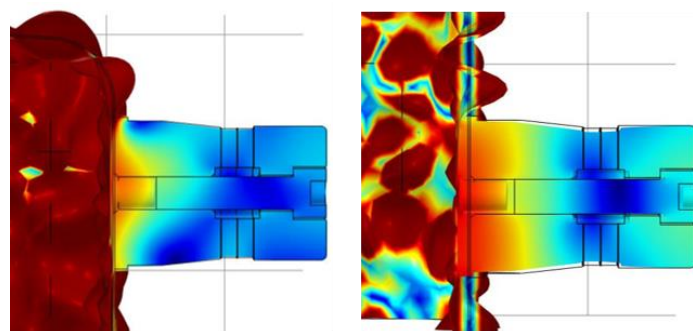
جدول ۳ داده‌های مود طولی مناسب مرتب شده بر اساس روابط غیریکنواختی، نسبت همراستایی و نسبت تبدیل

فاصله (mm)	فرکانس (Hz)	نسبت همراستایی	غیر یکنواختی	نسبت تبدیل	پارامتر بهنجار سازی شده
۱۰۰	۲۴۲۰۰	۰,۸۹۶	۰,۰۵۸	۱,۸۷۵	۰,۹۰۶
۱۱۰	۲۴۰۶۳	۰,۸۹۲	۰,۰۶۵	۱,۸۹۷	۰,۸۶۹
۱۷۰	۲۴۰۲۳	۰,۸۸۹	۰,۰۶۴	۱,۸۸۷	۰,۸۵۶
۱۴۰	۲۴۰۶۲	۰,۸۹۶	۰,۰۸۴	۱,۹۲۰	۰,۷۹۵
۱۶۰	۲۴۱۵۵	۰,۸۸۳	۰,۰۷۲	۱,۸۷۹	۰,۷۹۱
۱۵۰	۲۴۰۳۵	۰,۸۸۹	۰,۰۹۴	۱,۸۹۶	۰,۷۲۶
۶۰	۲۴۰۲۳	۰,۸۶۲	۰,۱۴۶	۱,۹۸۲	۰,۶۴۲
۸۰	۲۴۵۴۴	۰,۸۹۵	۰,۱۵۹	۱,۸۳۴	۰,۵۵۹
۷۰	۲۴۶۷۷	۰,۸۸۴	۰,۱۴۸	۱,۷۸۷	۰,۵۱۰
۹۰	۲۴۷۲۴	۰,۸۷۲	۰,۱۷۱	۱,۸۴۳	۰,۵۱۰
۱۳۰	۲۵۳۵۴	۰,۸۰۸	۰,۱۸۵	۱,۶۶۷	۰,۲۲۱
۱۲۰	۲۵۴۱۷	۰,۷۲۳	۰,۱۳۱	۱,۶۰۲	۰,۰۶۳

^۱ Normalize

طبق رتبه‌بندی شکل فوق، بهترین شکل مود مربوط به فاصله ۱۰۰ mm است. لازم به ذکر است تمامی گزینه‌های مرتبط شده در جدول ۳ برای شکل مود طولی اول ترنسدیوسر می‌باشند. دلیل این امر یکنواختی، نسبت همراستایی و نسبت تبدیل پایین‌تر در هارمونیک‌های بالاتر شکل مود طولی می‌باشد.

با توجه به معیارهای دستیابی به بیشترین مقدار نسبت همراستایی و نسبت تبدیل و کمترین مقدار غیریکنواختی در سطح مرتعش ترنسدیوسر، در ادامه دو شکل مود با مطلوب‌ترین وضعیت (شکل ۸-الف) و نامطلوب‌ترین وضعیت (شکل ۸-ب) براساس معیارهای سه گانه مورد بررسی قرار گرفته است. مطلوب‌ترین وضعیت در شکل مود ارتعاش طولی ترنسدیوسرها با فاصله ۱۰۰ mm از یکدیگر و در فرکانس رزونانس برابر با ۲۴,۲ kHz بدست آمد (شکل ۸-الف). اما با پایین آمدن رتبه براساس سه معیار بیان شده (نامطلوب‌ترین وضعیت)، در شکل مود ارتعاش طولی با فاصله ترنسدیوسرها از هم برابر ۱۲۰ mm و در فرکانس برابر با ۲۵,۴۱ kHz بدست آمده است.

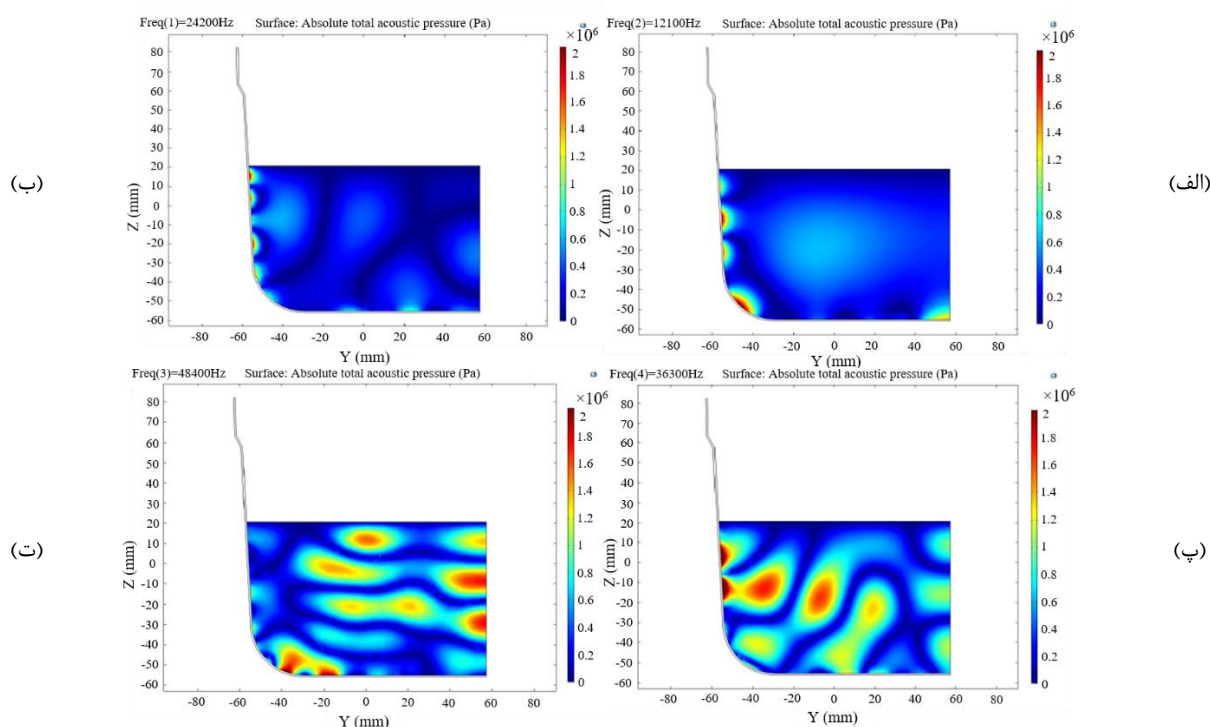


(الف) (ب)

شکل ۸ نتیجه تحلیل اجزاء محدود مودال ترنسدیوسر و مخزن در نرم افزار کامسول: الف) مطلوب‌ترین وضعیت با فاصله ۱۰۰ mm ترنسدیوسرها از هم و فرکانس ۲۴,۲ kHz و ب) نامطلوب‌ترین وضعیت با فاصله ۱۲۰ mm ترنسدیوسرها از هم و در فرکانس ۲۵,۴۱ kHz

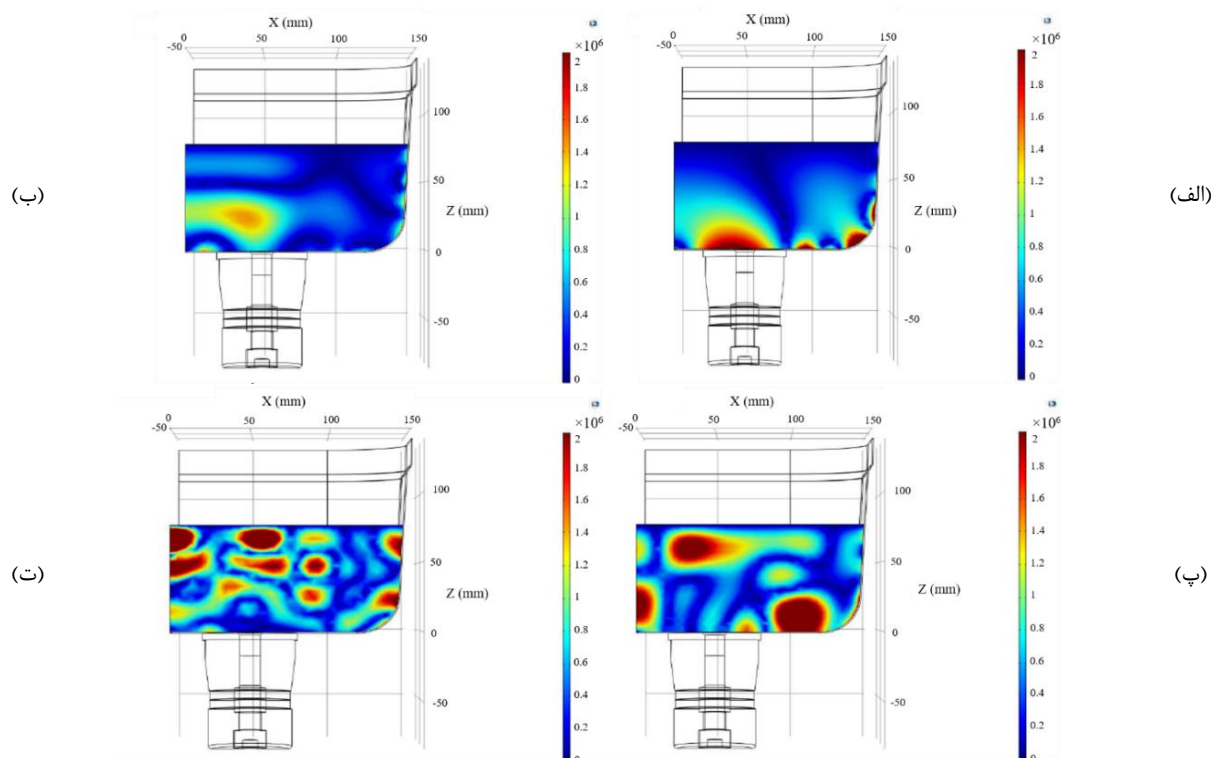
۳-۳-۳- نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک در آب

شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک در ظرف پر از آب را روی صفحه $X=0$ mm نشان داده است. نتایج در فرکانس‌های الف) ۵f، ب) f، پ) ۵f، و ت) ۲f به ترتیب در شکل ۹ الف تا ت نشان داده شده‌اند.



شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک اولتراسونیک در ظرف آب، روی صفحه $X=0$ mm در فرکانس‌های الف) ۵f، ب) f، پ) ۵f، و ت) ۲f

شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک، روی صفحه $Y = -42\text{mm}$ نشان داده است. نتایج میدان آکوستیک در فرکانس‌های الف ($0, \Delta f$ ، ب) f ، پ) Δf ، و ت) $2f$ به ترتیب در شکل ۱۰ الف تا ت نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک اولتراسونیک در ظرف آب، روی صفحه $Y = -42\text{mm}$ در فرکانس‌های الف ($0, \Delta f$ ، ب) f ، پ) Δf ، و ت) $2f$

۴- آزمون تجربی

۴-۱- روش تعیین میدان آکوستیک

براساس نتایج شبیه‌سازی تحلیل مودال، مجموعه ترنسدیوسر و مخزن ساخته و با در نظر گرفتن فاصله 100mm بین ترنسدیوسرها مونتاژ شدند. منبع تغذیه 25kHz و توان نامی فراصوتی 500W برای تحریک مجموعه شستشوی فراصوت مورد استفاده قرار گرفت. این منبع تغذیه دارای تنظیمات جستجوی خودکار فرکانس بود که با هدف تحقیق و ثابت بودن میدان آکوستیک، تنظیمات دستگاه از جستجوی خودکار فرکانس به فرکانس ثابت تغییر یافت. برای تعیین میدان آکوستیک، از هیدروفون مدل $\text{H}2\text{a}$ محصول شرکت آکواریان^۱ با حساسیت $1\text{V}/\mu\text{P}$ re: 180dB - و در محدوده فرکانسی $10\text{kHz} - 10\text{Hz}$ استفاده شده است. برای ضبط داده‌های صوتی از ضبط کننده فرکانس بالا مدل زوم $\text{H}6$ ^۲ استفاده شده است.

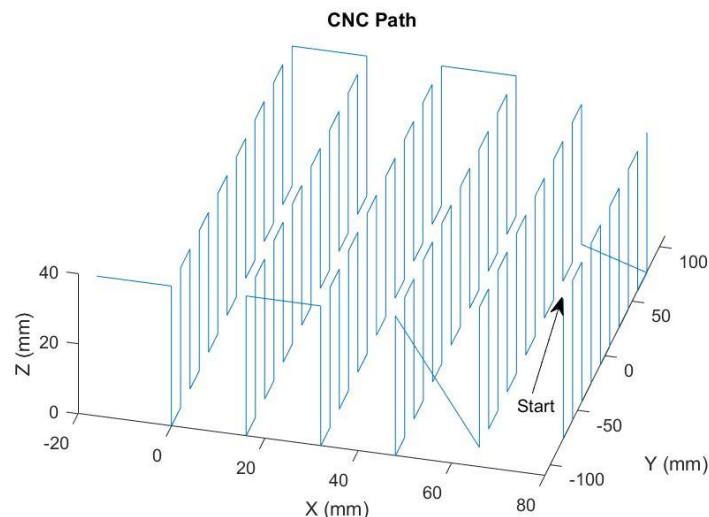
از نتایج آزمون تجربی دو پارامتر خروجی (۱) نمودار فرکانسی در محدود 20Hz تا 46kHz و (۲) فشار آکوستیک در نقاط مختلف مایع درون مخزن استخراج شده است. برای تعیین نمودار فرکانسی از داده‌های صوتی نمودار FFT استخراج شد و پاسخ فرکانسی در بازه مد نظر استخراج گردید. پاسخ فرکانسی دستگاه شستشوی فراصوت در دو توان 100W (توان کم) و 300W (توان زیاد) استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای تعیین میدان صوتی، هیدروفون در موقعیت‌های مختلف مخزن قرار داده شد و خروجی داده برداری به صورت یک فایل صوتی ذخیره گردید. موقعیت‌دهی هیدروفون با کمک یک دستگاه سی ان سی^۳ سه محور به صورت برنامه‌ریزی شده انجام شد. شکل ۱۱ مسیر حرکت هیدروفون (نصف مخزن) را با کمک ماشین سی ان سی نشان داده است. داده‌های صوتی با حرکت هیدروفون به صورت خطوط پیوسته ضبط گردید. همانطور که مشاهده می‌شود حرکت از سطح به عمق (عمق 0mm تا 40mm) و به صورت پله‌های با فاصله 20mm در جهت محور X و فاصله 20mm در جهت محور Y انجام شد.

¹ Aquarian Audio Products

² ZOOM H6 Handy Recorder

³ Computer Numerically Control (CNC)



شکل ۱۱ مسیر حرکت هیدروفون (نصف مخزن) به کمک ماشین سی ان سی

داده‌برداری به صورت پیوسته در تمام مسیر انجام گرفته است و در بازه‌های ۱mm، ریشه میانگین مربعات^۱ مقادیر ذخیره شده محاسبه شده است. خروجی هیدروفون یک فایل صوتی می‌باشد. برای ذخیره سازی داده‌ها، سرعت پیشروی ماشین کنترل عددی ۶۰۰mm/min معادل ۱cm/s تنظیم شد. بنابراین متناسب با طی کردن طول مسیر با زمان، داده‌های مرتبط با هر خط مسیر بدست می‌آیند. سپس با جدا کردن داده‌ها روی یک خط به تناسب ۱mm، مقدار ریشه میانگین مربعات صوت در این بازه بدست آمده است. شکل ۱۲ نمای تجهیزات داده برداری میدان آکوستیک شامل ماشین کنترل عددی (CNC) سه محور، مجموعه ترنسدیوسر و مخزن را نشان داده است.



شکل ۱۲ نمای چیدمان آزمون نقشه‌برداری فشار صوتی درون مخزن مایع

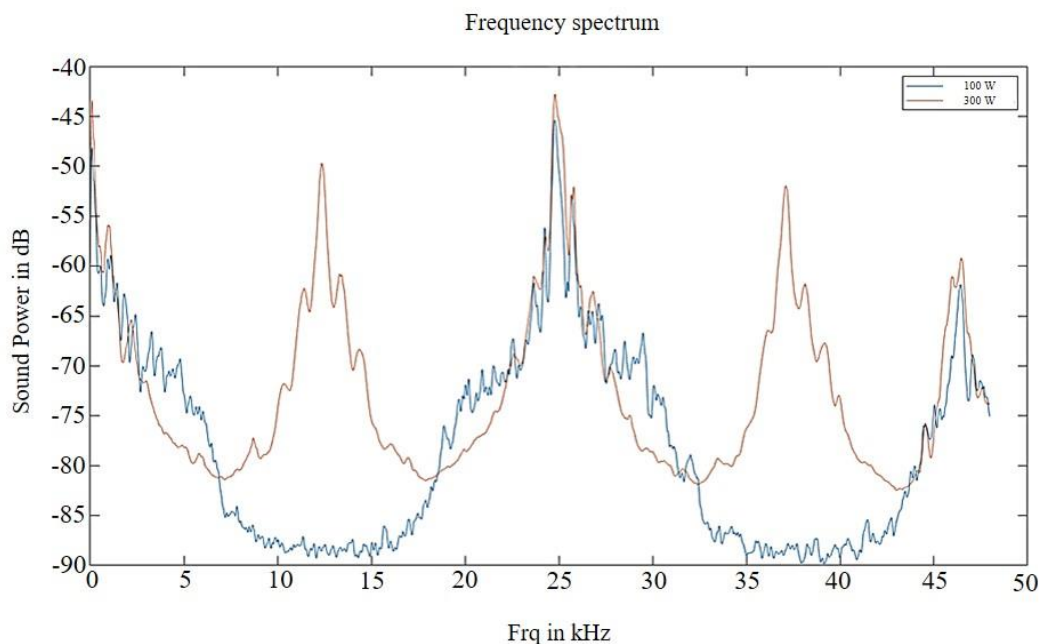
^۱ Root Mean Square (RMS)

۴-۲- نتایج آزمون تجربی

۴-۲-۱- نتایج تحلیل فرکانسی

شکل ۱۳ نتایج طیف فرکانسی حاصل از تحریک و داده‌برداری موج صوتی مجموعه ترنسدیوسرها، مخزن و مایع را در فرکانس رزونانس ۲۴,۲kHz نشان داده است. لازم به ذکر است در این حالت، ترنسدیوسرها در فاصله بهینه ۱۰۰mm از یکدیگر قرار دارند. همانطور که از نمودار مشخص است، در توان‌های تحریک پایین، پاسخ تحریک در فرکانس‌های f و $2f$ مشاهده می‌شود. از طرفی افزایش توان تحریک ارتعاشات سبب افزایش امواج ضربه‌ای شده و میکروجت‌ها پس از فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون می‌شود و باعث افزایش درجه بی‌نظمی شکل موج‌های صوتی می‌شود. بنابراین با افزایش توان تحریک ارتعاشات علاوه بر فرکانس‌های f و $2f$ ، پاسخ فرکانسی در سایر فرکانس‌های $0.5f$ و $1.5f$ هم قابل مشاهده است (شکل ۱۳).

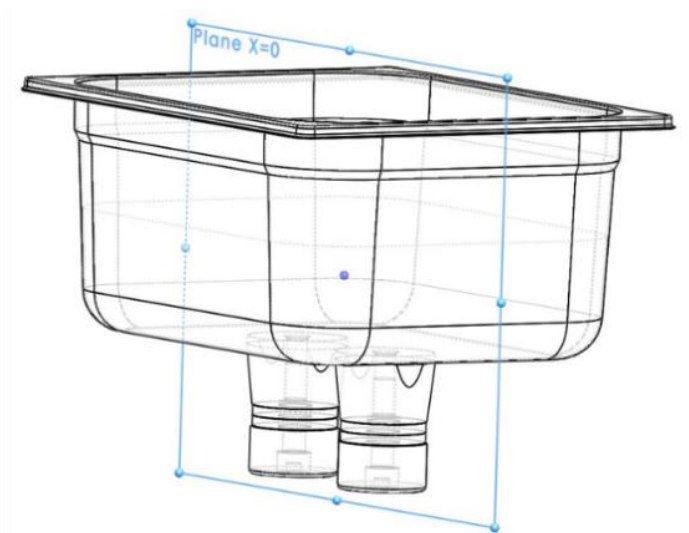
ایجاد فرکانس‌های $0.5f$ و $1.5f$ در ظرف سبب افزایش نقاط گره و شکم در محیط سیال می‌شود. با افزایش نقاط گره و شکم در بستر سیال، کاویتاسیون یکنواختی رخ می‌دهد که بهبود عملکرد شستشو را به همراه دارد. تمرکز انفجار حباب‌ها در پدیده کاویتاسیون بخشی از سطح را تمیز و بخشی دیگر بصورت ناقص باقی می‌ماند. اگر در بین دو نقطه گره اصلی چند نقطه گره دیگر بوجود بیاید از شدت انفجار حباب در نقاط گره f و $2f$ کاسته شده، اما انفجارهای پیوسته‌ای بین این دو گره را رقم می‌زند و انفجارهای کاویتاسیون به طور یکنواخت در حجم مایع بوجود می‌آید.



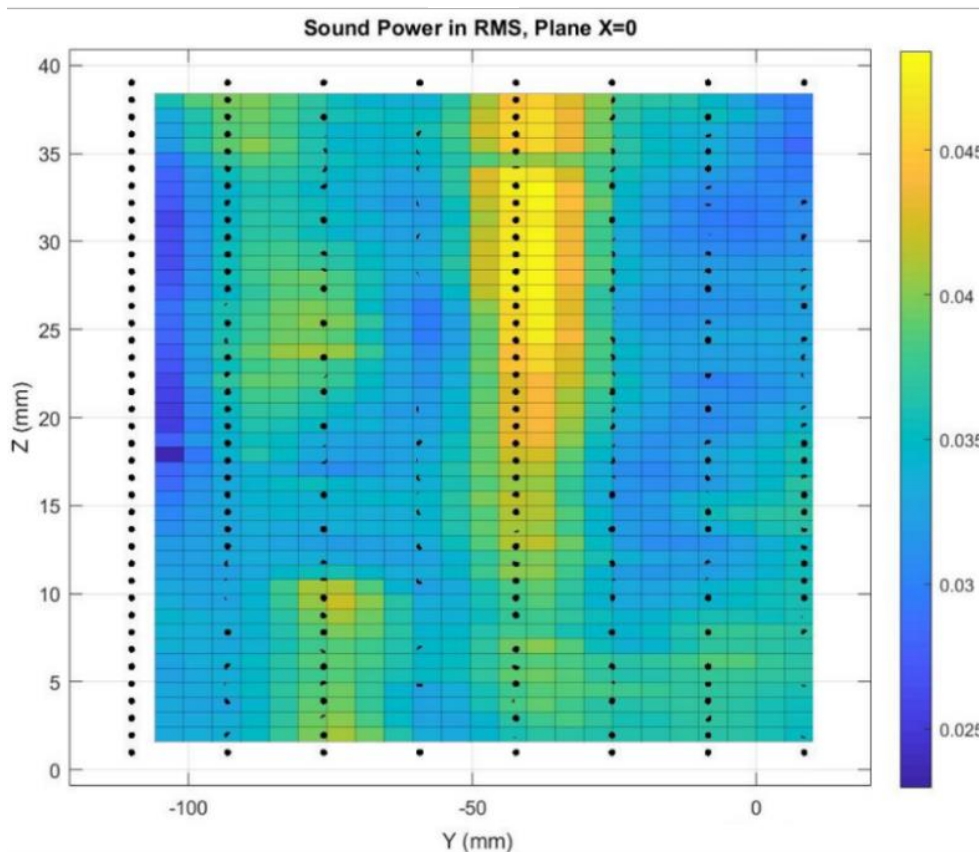
شکل ۱۳ مقایسه طیف فرکانسی در توان ۱۰۰ (توان کم) و ۳۰۰ وات (توان زیاد)

۴-۲-۲- نتایج میدان آکوستیک

برای تعیین میدان آکوستیک، هیدروفون در موقعیت‌های مختلف مخزن حرکت داده شد و نتایج ذخیره شده توسط سیستم داده‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۴ میدان صوتی حاصل از تحریک ترنسدیوسرها در فرکانس ۲۴,۲kHz نشان داده است. در شکل ۱۴ بخش (الف) نمای شماتیک صفحه $X = 0$ mm نسبت به مخزن را نشان داده است. قسمت (ب) شکل ۱۴ نمودار مقادیر ریشه میانگین مربعات فشار صوتی را در صفحه $X = 0$ mm نشان داده است. در شکل ۱۴ و در موقعیت بالای ترنسدیوسر، در نقطه $Y = 50$ mm، شدت بالای فشار صوتی میدان آکوستیک مشاهده می‌شود. این الگو با نقاط با فشار زیاد در شبیه‌سازی میدان آکوستیک در فرکانس‌های f و $2f$ به ترتیب در شکل ۹ ب و ج (در موقعیت $Y = 50$ mm) تطابق دارد. تطابق‌پذیری فوق در فرکانس $2f$ نشان می‌دهد که هر دو فرکانس از سطح ترنسدیوسر ساطع می‌شوند.



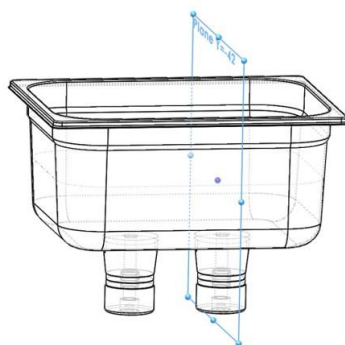
(الف)



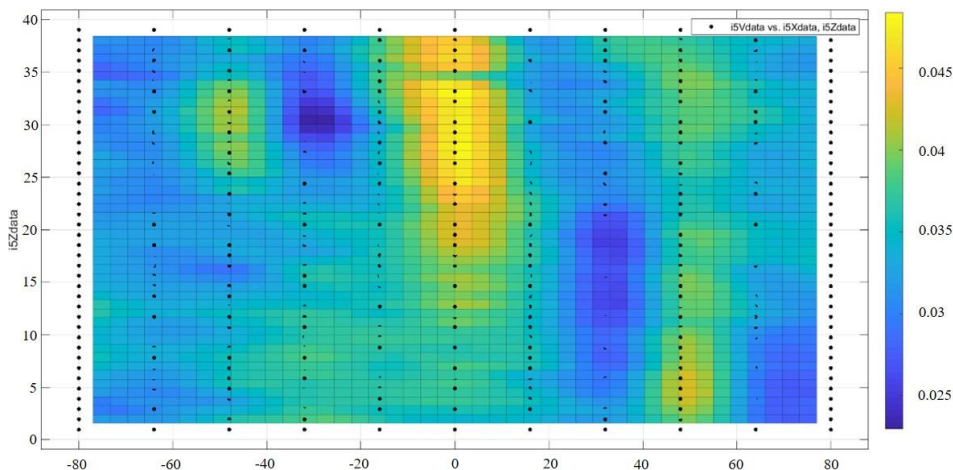
(ب)

شکل ۱۴ الف) صفحه $X=0$ mm در آزمون نقشه‌برداری و ب) نتایج هیدروفون، میانبایی نقاط در صفحه $X=0$ mm (از وسط مخزن تا انتهای ظرف ترنسدیوسر سمت چپ)

شکل ۱۵ نمای موقعیت نمایش داده‌های فشار آکوستیک و نمودار مربوط به آن در صفحه $Y=-42$ mm را نشان داده است. الگوی مقایسه شده بالا، در صفحه $Y=-42$ mm نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود نیز قابل مشاهده است. در قسمت ب شکل ۱۵ در موقعیت نقاط $X=0$ mm پرفشار دیده می‌شود که مطابق با الگوی سه‌تایی در شبیه‌سازی اجزا محدود (قسمت ب شکل ۱۰) است. در شکل ۱۰، نتایج شبیه‌سازی میدان آکوستیک، نقاط با شدت میدان آکوستیک بالا بر روی دیواره ظرف قابل مشاهده است. اما در آزمون تجربی (شکل ۱۵-ب) چنین مناطقی قابل مشاهده نیستند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵ الف) صفحه $Y = -42\text{mm}$ در آزمون نقشه‌برداری و ب) نتایج هیدروفون، میانبایی نقاط در صفحه $Y = -42\text{mm}$

دلیل این اختلاف در نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان بدین صورت بیان داشت که در آزمایش تجربی برخلاف شبیه‌سازی، امکان اندازه‌گیری فشار با هیدروفون روی دیواره‌های ظرف وجود ندارد. از طرفی در آزمون تجربی با افزایش توان، نزدیک ترنسدیوسر یک لایه عایقی از کاپیتاسیون ایجاد می‌شود که مانع عبور امواج می‌شوند به مناطق دورتر از سطح ترنسدیوسر می‌شود. در حالی که بخش شبیه‌سازی نمی‌تواند خواص و اثرات پدیده کاپیتاسیون را مدل کند که سبب بروز اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از شبیه‌سازی اجزا محدود برای پیش‌بینی رفتار ارتعاشی و میدان آکوستیک حاصل از یک مجموعه‌ی شستشوی فراصوتی استفاده شد. شبیه‌سازی شامل تحلیل مودال و تعیین میدان آکوستیک درون محفظه انجام شد. در بخش آزمون‌های تجربی، با تحریک ترنسدیوسر در فرکانس $24,2\text{kHz}$ ، محدوده میدان آکوستیک در مجموعه شستشوی فراصوت تعیین شد. همچنین با استفاده از هیدروفون، ضبط‌کننده فرکانس بالا و ماشین کنترل عددی (CNC) مقدار فشار آکوستیک در نواحی مختلف مایع درون مخزن بدست آمد. از مقادیر حاصل نقشه شدت فشار صوتی در صفحات تقارن مخزن مایع تعیین گردید. به طور خلاصه نتایج زیر بدست آمد:

- پارامترهای خروجی شبیه‌سازی شامل نسبت همراستایی، غیریکنواختی و نسبت تبدیل، معیارهای مناسبی برای جدا کردن شکل موده‌های طولی قابل قبول و یافتن فرکانس تشدید و بهینه‌سازی فاصله ترنسدیوسرها از هم می‌باشد.
- در روند تغییر شدت امواج، ابتدا فرکانس تشدید (f) و فرکانس هارمونیک دوم ($2f$) که در شکل‌گیری میدان موثراند تحریک می‌شوند. هر چقدر که توان ارتعاشات افزایش پیدا می‌کند ضرایب دیگر فرکانس تشدید شامل زیرهارمونیک‌های $0,5f$ و $1,5f$ نیز ظاهر می‌شوند. در نتیجه نقاط گره و شکم بیشتری برای یکنواختی بیشتر شست و شو ایجاد می‌شود. از این روش برای تعیین آستانه توان مورد نیاز برای شستشوی مناسب با عملکرد بالا می‌توان استفاده کرد.

- با توجه به نتایج تجربی و شبیه‌سازی، در شدت‌های بالا و تحریک فرکانس‌های ۰.۵f تا ۲f، مناطق پرفشاری درست بالای ترنسدیوسرها بدست می‌آیند.

References

- [1] Yusof NS, Babgi B, Alghamdi Y, Aksu M, Madhavan J, Ashokkumar M. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications. *Ultrasonics sonochemistry*. 2016 Mar 1;29:568-76. doi: [10.1016/j.ultsonch.2015.06.013](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.013)
- [2] Gallego-Juárez JA, Graff KF, Lucas M, editors. *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Woodhead Publishing; 2023 Apr 6.
- [3] Jamshidi R. *Modeling and numerical investigation of acoustic cavitation with applications in sonochemistry*. Universitätsbibliothek Clausthal; 2014.
- [4] Wei Z, Weavers LK. Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors. *Ultrasonics sonochemistry*. 2016 Jul 1;31:490-8. doi: [10.1016/j.ultsonch.2016.01.036](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.036)
- [5] Zhong L. COMSOL multiphysics simulation of ultrasonic energy in cleaning tanks. In *COMSOL conference 2015*.
- [6] Azhdast MH, Hojjat Y, Haleh H, Azhdast A. Design and manufacturing an ultrasonic cleaner by considering the effect of frequency, time, Temperature and erosion. 8th National Conference on Manufacturing Engineering of Iran; 2016; Tehran. doi: [10.13140/RG.2.1.2339.7364](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2339.7364) [In Persian]
- [7] Lais H, Lowe PS, Gan TH, Wrobel LC. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. *Ultrasonics sonochemistry*. 2018 Jul 1;45:7-16. doi: [10.1016/j.ultsonch.2018.02.045](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045)
- [8] Abdullah A, Foroghi S, Pak A, Mohammadi AHA. Optimization of Transducers Arrangement in Ultrasonic Washing Process by Finite Element Method. 11th National Conference on Manufacturing Engineering of Iran. [In Persian]
- [9] Gonzalez-Avila SR, Prabowo F, Kumar A, Ohl CD. Improved ultrasonic cleaning of membranes with tandem frequency excitation. *Journal of membrane science*. 2012 Oct 1;415:776-83. doi: [10.1016/j.memsci.2012.05.069](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.05.069)
- [10] Joyce EM, Wu X, Mason TJ. Effect of ultrasonic frequency and power on algae suspensions. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 2010 May 6;45(7):863-6. doi: [10.1080/10934521003709065](https://doi.org/10.1080/10934521003709065)
- [11] Hamidi H, Mohammadian E, Junin R, Rafati R, Azdarpour A, Junid M, Savory RM. The effect of ultrasonic waves on oil viscosity. *Petroleum Science and Technology*. 2014 Oct 2;32(19):2387-95. doi: [10.1080/10916466.2013.831873](https://doi.org/10.1080/10916466.2013.831873)
- [12] Moholkar VS, Sable SP, Pandit AB. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission. *AIChE journal*. 2000 Apr;46(4):684-94. doi: [10.1002/aic.690460404](https://doi.org/10.1002/aic.690460404)
- [13] Gürses BO, Özdemir AO, Tonay Ö, Şener M, Perinçek S. The Effect of Fabric Position to the Distribution of Acoustic Pressure Field in Ultrasonic Bath. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017 Oct 1 (Vol. 254, No. 16, p. 162004)*. IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/254/16/162004](https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/16/162004)
- [14] McQueen DH. Frequency dependence of ultrasonic cleaning. *Ultrasonics*. 1986 Sep 1;24(5):273-80. doi: [10.1016/0041-624X\(86\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(86)90105-8)
- [15] Kobayashi T, Kobayashi T, Hosaka Y, Fujii N. Ultrasound-enhanced membrane-cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments. *Ultrasonics*. 2003 May 1;41(3):185-90. doi: [10.1016/S0041-624X\(02\)00462-6](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00462-6)
- [16] Khajehesamedini A, Sadatshojaie A, Parvasi P, Rahimpour MR, Naserimojarad MM. Experimental and theoretical study of crude oil pretreatment using low-frequency ultrasonic waves. *Ultrasonics sonochemistry*. 2018 Nov 1;48:383-95. doi: [10.1016/j.ultsonch.2018.05.032](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.032)
- [17] Haghighi SF, Parvasi P, Jokar SM, Basile A. Investigating the effects of ultrasonic frequency and membrane technology on biodiesel production from chicken waste. *Energies*. 2021 Apr 11;14(8):2133. doi: [10.3390/en14082133](https://doi.org/10.3390/en14082133)
- [18] Abedini R, Abdullah A, Alizadeh Y, Fartashvand V. Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017;3(3):1-12. [In Persian]
- [19] Shalvandi M, Aghaei A. Investigation of the effect of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of carbon steel in friction drilling process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Sep 23;8(7):1-9. [In Persian]
- [20] Jahromi MS, Abedini R. Design optimization and comparison of two hemostatic ultrasonic scalpels. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024 Sep 10:1-2. doi: [10.1007/s12008-024-02084-7](https://doi.org/10.1007/s12008-024-02084-7)