



طراحی، مدل سازی و ساخت محفظه جدید شستشوی پیوسته فراصوتی با استفاده از تحلیل هارمونیک

عباس پاک^{۱*}، علی شیرین آبادی^۲، علیرضا شهیدی^۳

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 ۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
 ۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، پارک علم و فناوری موسسه فیزیک، ویلنیوس، لیتوانی
 * همدان، صندوق پستی ۶۵۱۷۸۳۸۶۹۵ a.pak@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه استفاده از فناوری‌های نوین در شستشوی قطعات به دلیل مشکلات روش‌های شستشوی سنتی مانند کیفیت پایین شستشو، عدم تکرار پذیری، ایمنی کم، خوردگی تجهیزات، سرعت پایین و مشکلات زیست‌محیطی مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. استفاده از فرایند شستشو با امواج فراصوتی یکی از روش‌های نوین شستشوی قطعات به صورت ایمن، سریع، با کیفیت و سازگار با محیط‌زیست است. لذا بهینه‌سازی و توسعه این فرایند شستشوی توسط محققین ضرورت پیدا کرده است. هدف از این پژوهش طراحی، مدل سازی و معرفی یک سیستم جدید شستشوی بهینه و پیوسته فراصوتی جهت بهبود کیفیت شستشو با استفاده از امواج فراصوتی است. در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از روش عددی اجزاء محدود و با انجام تحلیل‌های مودال، هارمونیک و تحلیل گذرا دینامیک سیال محاسباتی در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS 15 انجام شده است. در این مقاله پس از به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای نوسانی با اعمال تحریک هارمونیک، مقدار جابه‌جایی نقاط مختلف مشخص می‌شود؛ سپس با اعمال این جابه‌جایی به سیال، میدان فشار ایجاد شده در سیال داخل محفظه شبیه‌سازی و محدوده اثر بخشی شستشو با مقایسه فشار آکوستیک ایجاد شده مشخص شده است. مخزن شستشوی فراصوتی مدل سازی شده با ۹ عدد مبدل نوسانات مافوق صوت با فرکانس تشدید ۲۶/۵ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ وات با چیدمان مارپیچ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به دست آمده عملکرد مناسب سیستم شستشوی طراحی و ساخته شده را نشان می‌دهد؛ همچنین نتایج به دست آمده بیان می‌کند که شبیه‌سازی با روش اجزا محدود قابل اعتماد و روش مناسبی برای طراحی و بهینه‌سازی مخزن‌های شستشوی فراصوتی می‌باشد.

مقاله پژوهشی
 دریافت: ۱۳ فروردین ۱۴۰۲
 داوری اولیه: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۲
 پذیرش: ۳ خرداد ۱۴۰۲
کلیدواژگان:
 شستشوی فراصوتی
 مدل سازی
 کاویتاسیون
 شستشوی پیوسته
 تحلیل هارمونیک

Design, modeling and manufacturing a novel continues ultrasonic cleaning tank by harmonic response analysis

Abbas Pak^{1*}, Ali Shirin Abadi Farahani², Alireza Shahidi³

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University of technology, Arak, Iran

3- Science and technology park of institute of Physics, Vilnius, Lithuania

* P.O.B 6517838695 Hamedan, Iran, a.pak@basu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
 Received: 2 April 2023
 First Decision: 14 May 2023
 Accepted: 24 May 2023

Keywords:

Ultrasonic Cleaning
 Modeling
 Cavitation
 Continues Cleaning
 Harmonic Analysis

Abstract

Nowadays, the use of new technologies in the cleaning of parts has attracted the attention of various industries due to the problems of traditional cleaning methods such as low cleaning quality, lack of repeatability, low safety, equipment corrosion, low speed and environmental problems. Using the process of cleaning with ultrasonic waves is one of the new methods of cleaning parts in a safe, fast, high-quality and environmentally friendly way. Therefore, it is necessary to optimize and develop this cleaning process by researchers. The purpose of this research is to design, model and introduce a new optimal and continuous ultrasonic cleaning tank to improve the quality of cleaning using ultrasonic waves. In this research, the simulation has been done using finite element method (FEM) and by performing static, modal, harmonic analysis and computational fluid dynamic transient analysis in ANSYS 15 software. In this article, after obtaining the natural frequencies and the shape of the vibration modes, the amount of displacement of different points is determined by applying harmonic stimulation. Then, by applying this displacement to the fluid, the pressure field created in the fluid inside the simulation tank and the effective range of cleaning have been determined by comparing the created acoustic pressure. The modeled ultrasonic cleaning tank with 9 ultrasonic transducers with a resonant frequency of 26.5 kHz and a power of 100 watts with a spiral arrangement was manufactured and tested. The obtained results show the proper performance of the designed and manufactured ultrasonic cleaning tank. Also, the obtained results show that the simulation with the finite element method is reliable and a suitable method for designing and optimizing ultrasonic cleaning tanks.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Pak, A. Shirin Abadi Farahani, A. Shahidi, Design, modeling and manufacturing a novel continues ultrasonic cleaning tank by harmonic response analysis, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 10, pp. 21- 27, 2022 (in Persian). <https://doi.org/10.22034/IJME.2023.391622.1767>

۱- مقدمه

امروزه فناوری شستشوی قطعات در مرحله گذار از فرایندهای شستشوی سنتی به روش‌های نوین می‌باشد. مشکلات پیش‌روی روش‌های سنتی شستشو همچون اسیدشویی از قبیل کیفیت پایین شستشو، تکرارپذیر نبودن کیفیت شستشو، خطرناک بودن کار با مواد خورنده، قرار گرفتن کارگران در معرض بخارات سمی، خوردگی تجهیزات، کاهش سرعت خط تولید، مشکلات زیست‌محیطی، هزینه‌های مرتبط با دفع اسیدهای مصرفی و ...، ضرورت استفاده از روش‌های نوین شستشو را ایجاد نموده است. لذا تقاضای صنایع مختلف به روش‌های شستشوی پاک، ایمن، سریع، با کیفیت و سازگار با محیط‌زیست بیش از پیش افزایش یافته است [۱، ۲].

شستشوی توسط امواج فراصوتی یک شیوه نوین و مؤثر در از بین بردن آلودگی‌های سطوح مختلف یک قطعه است. در این روش با اعمال نوسان مکانیکی فرکانس بالا به یک سیال و تشکیل و انفجار حباب‌های کاویتاسیونی باعث افزایش دمای موضعی (حدود ۵۰۰۰ درجهی کلون)، تولید فشار موج بالا (حدود ۲۰۰۰ اتمسفر) و جریان آکوستیکی با سرعت بسیار بالایی (۴۰۰ کیلومتر بر ساعت) گردیده که منجر به تمیز شدن هر نوع آلودگی می‌شود [۳]؛ لذا تمیزکاری فراصوتی با هدف رسیدن به بهترین کیفیت شستشوی سطح، تکرارپذیری بالای کیفیت شستشو، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و جایگزینی با روش‌های سنتی شستشو مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های شستشو توسط امواج فراصوتی از سه بخش اصلی شامل مبدل امواج فراصوتی (ترانسدیوسر)، مخزن و مولد قدرت تشکیل شده‌اند [۳]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرایند شستشوی فراصوتی اغلب به بررسی بخش اول و اثر پارامترهای امواج فراصوتی از قبیل فرکانس، توان و دامنه نوسانات و پارامترهای سیال از قبیل دما، کشش سطحی، غلظت و ... پرداخته‌اند و اثر این پارامترها بر روی تنش‌های برشی وارد شده به آلودگی تحت اثر انفجار حباب‌های کاویتاسیونی مؤثر در تمیزکاری، نحوه توزیع کانتور فشار در سیال تحت اثر میدان صوتی مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۱۲]؛ در نتیجه در زمینه بهینه‌سازی شکل مخزن و چیدمان مبدل‌های فراصوتی تحقیقات محدودتری نسبت به موارد ذکر شده صورت پذیرفته است. لذا طراحی و بهینه‌سازی شکل مخزن و چیدمان مبدل‌ها جهت بهبود تشکیل و توزیع حباب‌های کاویتاسیونی به‌ویژه در کاربردهای صنعتی جدید از جمله شستشوی پیوسته ضرورت و اهمیت پیدا کرده است.

استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های مختلف آن مانند تحلیل‌های مودال، هارمونیک و گذرا^۱ دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان ابزاری مناسب در زمینه بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرایند شستشوی فراصوتی مورد استفاده محققین و صنعتگران قرار گرفته است. چانگ و همکاران در سال ۲۰۰۳ با شبیه‌سازی دوبعدی المان محدود یک محفظه آزمایشگاهی با یک مبدل فراصوتی، شرایط تشکیل کاویتاسون را بر اساس شدت فشار بررسی نمودند. نتایج به‌دست‌آمده تطبیق خوب نتایج مدل‌سازی با نتایج عملی را نشان داده است. در پژوهش بعدی [۱۳] توسط چانگ و همکاران شبیه‌سازی یک محفظه شستشو دوار با استفاده از روش المان محدود دوبعدی توسط نرم‌افزار انسیس بررسی شد. این محفظه با چیدمان چند مبدل فراصوتی به‌منظور بررسی پاسخ آکوستیک در داخل سیال‌های مختلف مدل‌سازی و با انجام آزمون‌های عملی نتایج شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفت. فروغی و همکاران [۱۴] به بررسی تعداد، اندازه و توزیع حباب‌های کاویتاسیونی در اثر نحوه چیدمان مبدل‌های فراصوتی در بدنه محفظه شستشو پرداختند. در این پژوهش با استفاده از روش عددی اجزا محدود توسط نرم‌افزار انسیس، اثر چیدمان مبدل‌ها در مقدار و نحوه توزیع حباب‌های کاویتاسیونی به‌صورت مدل‌سازی سه‌بعدی از طریق بررسی میدان آکوستیکی درون سیال تمیزکاری مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل شده، چیدمان بهینه ترانسدیوسرها تعیین شده و صحت نتایج عددی، از طریق آزمایش‌های عملی ارزیابی و مورد تأیید قرار گرفت.

تانگسوها و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش تحلیل هارمونیک توسط نرم‌افزار انسیس توزیع فشار آکوستیک را با توجه به چیدمان‌های مختلف مبدل‌ها بررسی نمودند. مخزن مورد بررسی به‌صورت مکعبی با حجم ۱۸ لیتر شامل ۸ مبدل با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز، مجموع توان ۴۰۰ وات است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که چیدمان مناسب ترانسدیوسرها باعث افزایش فشار آکوستیک و توزیع بهتر در سراسر مخزن شده است. در مطالعه بعدی توسط تانگسوها [۱۶] در سال ۲۰۲۰ میلادی مدل‌سازی عددی برای یک مخزن مکعبی با ظرفیت ۱۰ لیتر و چهار مبدل ۲۸ کیلوهرتز با استفاده از تحلیل پاسخ هارمونیک و دینامیک سیالات محاسباتی انجام گردید. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ هارمونیک نشان داد که فشار آکوستیک با نتایج آزمایش خوردگی فویل مطابقت دارد و با تغییر چیدمان

^۱ Transient

تشکیل شده است (شکل ۱). جنس محفظه از فولاد ضدزنگ 304L انتخاب شده است.

با توجه به شکل استوانه‌ای مخزن از مبدل‌های با مقطع مقعر مطابق با شکل ۲ استفاده شده است. این نوع مبدل‌ها کاملاً بر روی سطح لوله قرار گرفته که با توجه به تحلیل‌های انجام شده امکان انتشار امواج در راستای شعاع لوله به‌طور کامل فراهم شده است [۱۸]. جهت تأمین انرژی الکتریکی و تحریک مبدل‌ها از منبع تغذیه ساخت سوئیس مدل MPI-US2000 استفاده شده است.

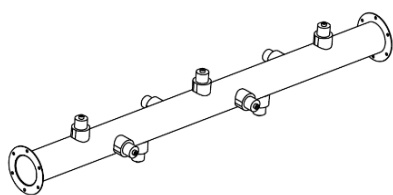


Fig. 1 Schematic view of ultrasonic cleaning tank

شکل ۱ نمای طرح‌واره از مخزن شستشوی فراصوتی



Fig. 2 100 watts transducer with concave cross-section

شکل ۲ ترانسدیوسر ۱۰۰ وات با سطح مقطع مقعر

پس از طراحی اولیه محفظه با ایجاد مدل اجزا محدود تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی شامل تحلیل مودال به‌منظور استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای نوسانی، تحلیل استاتیکی تنش به‌منظور کنترل وضعیت تنش، تحلیل هارمونیک به‌منظور تعیین نقشه جابه‌جایی در محفظه و سپس تحلیل دینامیک سیال محاسباتی سیال داخل محفظه در نرم‌افزار CFX به‌منظور بررسی مناطق شکل‌گیری کاویتاسیون انجام گرفته است.

۳- مدل سازی اجزا محدود

مدل سازی مجموعه کامل به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ANSYS انجام گردیده است. در شکل ۳ مدل محفظه و مبدل‌های قرار گرفته بر روی سطح آن نشان داده شده است.

مبدل‌ها فشار آکوستیک افزایش و شرایط تمیزکاری بهبود یافته است.

در آخرین تحقیق فوفایو و همکاران [۱۷] با استفاده از تحلیل پاسخ هارمونیک در نرم‌افزار ANSYS فشار آکوستیک داخل مخزن را برای سه جنس مختلف مخزن شامل شیشه، اکریلیک و فولاد ضدزنگ در یک مخزن کوچک با ظرفیت ۳/۹۲ لیتر با دو ترانسدیوسر با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و توان کلی ۱۰۰ وات شبیه‌سازی و بررسی نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که فشار آکوستیکی به جنس مخزن بستگی دارد و به ترتیب مخزن از جنس اکریلیک، شیشه و فولاد ضدزنگ بالاترین تا کمترین سطح فشار آکوستیکی را تولید کرده است.

با توجه به بررسی تحقیقات گذشته مشاهده شد که اکثر مطالعات بر روی مدل‌سازی و بررسی مخزن‌های مکعبی شکل با ابعاد محدود انجام شده است؛ اما در برخی از کاربردهای صنعتی نیاز به انجام فرایند شستشوی و یا اعمال نوسانات فراصوتی به مخزن در حالت عبور قطعات مانند مفتول یا صنایع شیمیایی و غذایی است. هدف از این تحقیق طراحی و مدل‌سازی یک مخزن استوانه‌ای شکل و استفاده از ترانسدیوسرهایی با سطح مقطع مقعر و چیدمان مارپیچی جهت استفاده در سیستم‌های شستشوی فراصوتی پیوسته است. جهت مدل‌سازی و بررسی شرایط مخزن پیشنهادی از تحلیل‌های استاتیکی، مودال، هارمونیک و تحلیل دینامیک سیال محاسباتی در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS 15 استفاده شده است. با استفاده از تحلیل مودال فرکانس‌های طبیعی مجموعه و شکل مدهای نوسانی مخزن متناسب با فرکانس تحریک مبدل‌های فراصوتی استخراج و سپس با اعمال تحریک هارمونیک و استخراج نحوه نوسان مجموعه، مقدار جابه‌جایی قسمت‌های مختلف مخزن تعیین گردید. با اعمال جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده از تحلیل هارمونیک به سیال، میدان فشار ایجاد شده در سیال در اثر نوسانات فراصوتی منتقل شده از مبدل به محفظه حاوی سیال تمیزکاری شبیه‌سازی و محدوده اثر بخشی شستشو (تشکیل کاویتاسیون) با مقایسه فشار آکوستیک ایجاد شده در سیال با فشار بحرانی آستانه کاویتاسیون مشخص شد.

۲- طراحی و انتخاب مخزن

مخزن مدل‌سازی و طراحی شده از یک محفظه استوانه‌ای شکل به قطر ۳۰ سانتی‌متر مجهز به ۹ عدد مبدل فراصوتی با فرکانس شدید ۲۶/۵ کیلوهرتز و با توان ۱۰۰ وات با چیدمان مارپیچ

نتایج حاصل از انطباق کانتور جابه‌جایی در چهار فرکانس نزدیک به فرکانس مرکزی محفظه در شکل ۶ ارائه شده است.

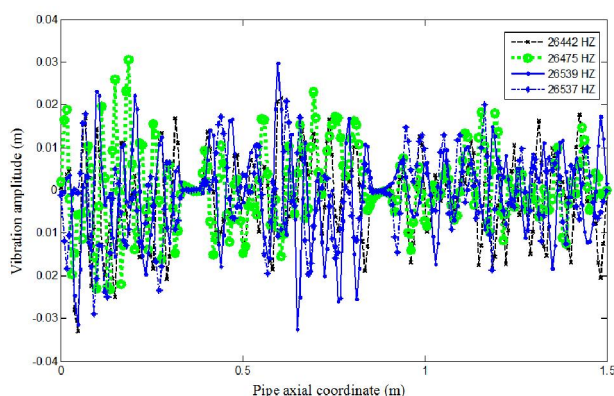


Fig. 6 Radial deformation contour comparison at four frequencies near central natural frequency

شکل ۶ مقایسه کانتور جابه‌جایی شعاعی در ۴ فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس مرکزی

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، هر چه قدر فرکانس به مقدار ۲۶۵۰۰ نزدیک می‌شود دامنه نوسان بیشتر می‌شود. با توجه به فرکانس مبدل‌های فراصوتی (۲۶۵۰۰ هرتز) شرایط تشدید مناسب برای محفظه و انتشار نوسانات به سیال فراهم شده است.

۲-۳- تحلیل هارمونیک

تحلیل هارمونیک مخزن به‌منظور استخراج نقشه جابه‌جایی و دامنه نوسان در بخش‌های مختلف محفظه و در نتیجه تعیین شرایط مرزی سیال داخل لوله انجام شده است. با استفاده از مدل اجزا محدود ایجاد شده تحلیل هارمونیک انجام و نقشه توزیع جابه‌جایی و مقدار دقیق جابه‌جایی هر قسمت از محفظه در فرکانس مرکزی ۲۶۵۰ هرتز حاصل شده است. با توجه به شکل محفظه و متقارن بودن آن در شکل ۷، مقدار جابه‌جایی شعاعی نقاط روی یک خط واقع بر روی محفظه (۲۰۰ نقطه) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار نوسان در طول محفظه نیز تقریباً یکسان بوده و به‌صورت جابه‌جایی هارمونیک در راستای شعاع هر مقطع از محفظه می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل هارمونیک به‌عنوان ورودی تحلیل گذرا دینامیک سیال محاسباتی استفاده شده است.

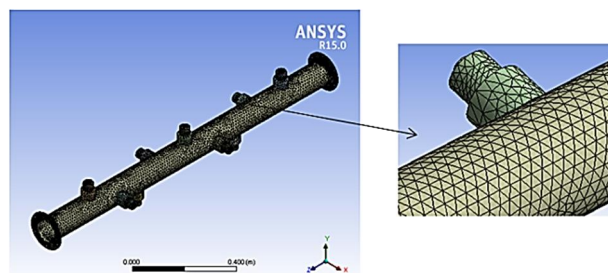


Fig. 3 FEM meshed model of ultrasonic cleaning tank

شکل ۳ مدل اجزا محدود مش‌بندی شده محفظه شستشوی فراصوتی

۱-۳- تحلیل مودال

با استفاده از مدل اجزا محدود ایجاد شده در مرحله قبل و روش تحلیلی مستقیم، تحلیل مودال در بازه فرکانسی ۲۶ تا ۲۷ کیلوهرتز انجام و مودهای ارتعاشی در این بازه مشاهده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده فرکانس‌های نزدیک به فرکانس ۲۶/۵ کیلوهرتز (فرکانس مرکزی)، دارای مود ارتعاشی شعاعی و غالب هستند (شکل‌های ۴ و ۵).

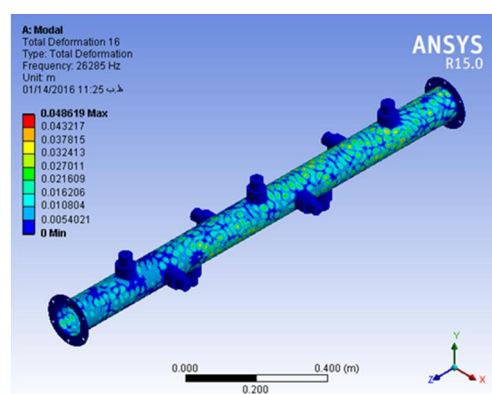


Fig. 4 Radial mode shape at 26285 Hz

شکل ۴ شکل مود نوسانی شعاعی در فرکانس ۲۶۲۸۵ هرتز

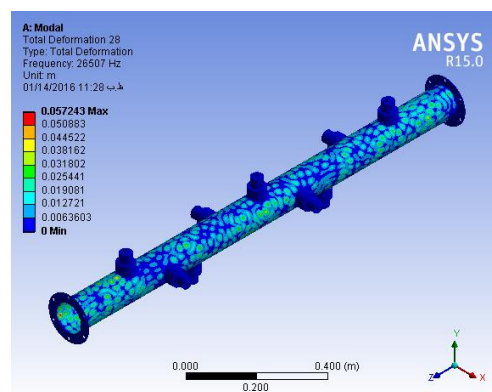


Fig. 5 Radial mode shape at 26507 Hz

شکل ۵ شکل مود نوسانی شعاعی در فرکانس ۲۶۵۰۷ هرتز

محفظه با صرف نظر از فشار استاتیکی، شرط لازم برای شروع شکل گیری حباب در داخل آب برابر شدن برآیند فشارهای وارد شده به سیال با فشار اشباع آب در دمای کاری می باشد [۱۹].

$$P_{atm} - P_v = P_a \quad (1)$$

در این رابطه P_a فشار آکوستیکی و P_v فشار بخار آب است.

در نتیجه مقدار فشار آکوستیک برابر است با:

$$101325 - 3169 = 98.156 \text{ KPa}$$

این مقدار فشار منفی لازم برای شکل گیری کویتناسیون توسط تحریک آکوستیک می باشد؛ همچنین با محاسبه طول موج فشار آکوستیک و در نظر گرفتن این نکته که کویتناسیون در بیشترین فشار منفی ($\frac{3}{4}\lambda$) شروع می شود، تمرکز کویتناسیون در مرکز محفظه می باشد. شرایط انتشار موج و سیکل های کشش و فشار در شکل ۹ نشان داده شده است.

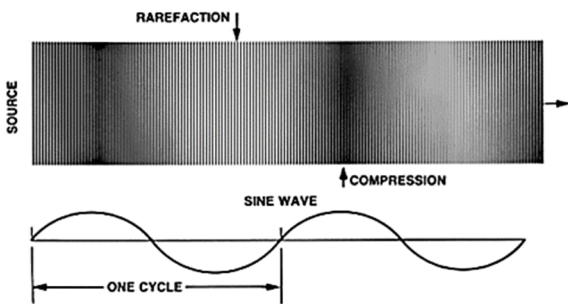


Fig. 9 Compression and Rarefaction cycle created by acoustic wave

شکل ۹ سیکل کشش و فشار ایجاد شده در یک موج صوتی

با انجام تحلیل دینامیک سیال محاسباتی نتایج نقشه توزیع فشار در آب داخل محفظه طراحی شده به دست آمد. نقشه توزیع فشار برای زمانی که بیشترین فشار منفی در مرکز محفظه حاوی آب ایجاد می شود، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

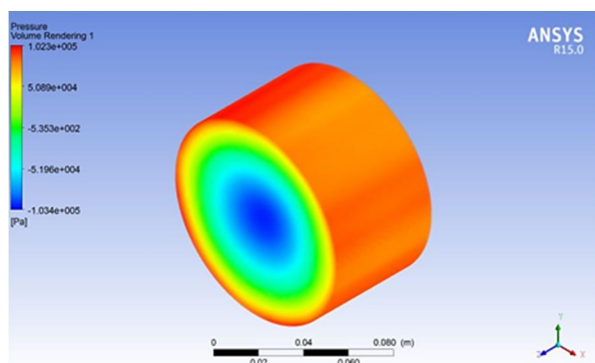


Fig. 10 Fluid pressure contour created by transducer harmonic agitation

شکل ۱۰ کانتر فشار ایجاد شده در سیال تحت اثر تحریک هارمونیک ترانسیدوسرها

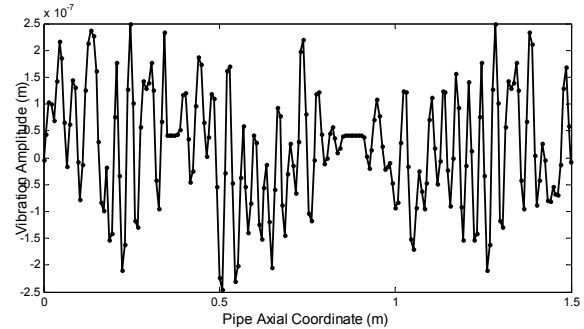


Fig. 7 Vibration amplitude affected by harmonic agitation along tank

شکل ۷ دامنه ارتعاشات تحت اثر تحریک هارمونیک در طول مخزن

۳-۳- تحلیل گذرا دینامیک سیالات محاسباتی

جهت بررسی نحوه تشکیل کویتناسیون در داخل سیال از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. سیال داخل محفظه آب در نظر گرفته شده و با توجه به تقارن و تکراری بودن شرایط در طول مخزن، بخشی از مخزن مطابق شکل ۸ در نرم افزار CFX مدل سازی و مش بندی شد؛ سپس خروجی تحلیل هارمونیک به عنوان شرایط مرزی در تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به صورت جابه جایی در راستای شعاعی محفظه در نظر گرفته شده و تحلیل گذرا سیال انجام شد و سپس خروجی توزیع فشار در سیال تحت اثر نوسان مبدل های فراصوتی و انتقال آن نوسان از لوله به سیال به دست آمده است.

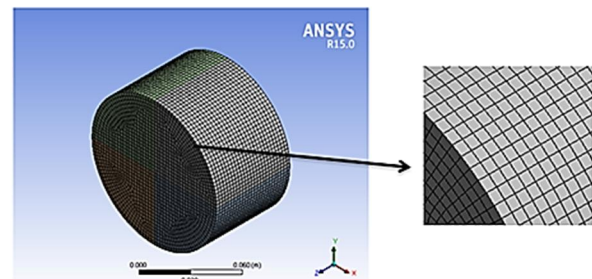


Fig. 8 Fluid meshing finite element software

شکل ۸ مش بندی سیال در نرم افزار اجزا محدود

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل هارمونیک (توزیع جابه جایی)، اختلاف سرعت صوت در مخزن استوانه ای و سیال ($C_{Water} = 1481 \frac{m}{s}$, $C_{Steel} = 5100 \frac{m}{s}$) و همچنین شکل سطح مقطع مبدل های فراصوتی با تقریب قابل قبولی امواج منتقل شده از مبدل، از تمامی محیط یک مقطع لوله به سیال منتقل می شوند.

با استخراج فشار اشباع آب و فشارهای وارد به آب داخل

فرکانس قابل تغییر بین ۲۰ تا ۱۲۰ کیلوهرتز بود. پس از ساخت محفظه با استفاده از آزمون فویل آلومینیوم که یک روش رایج برای تشخیص کیفی شدت و موقعیت پدیده کایتاسیون در سیستم‌های شستشوی فراصوتی است، عملکرد دستگاه مورد مطالعه قرار گرفت. در این آزمون الگوی فرسایشی به وجود آمده بر روی فویل آلومینیومی که برای مدت زمان مشخصی در معرض محفظه شستشوی فراصوتی قرار گرفته است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با انجام این آزمون مشاهده شد که تمامی طول محفظه متأثر از تشکیل کایتاسیونی است. همان‌طور که در شکل ۱۳ شدت فرسایش به‌وجود آمده بر روی فویل مورد آزمایش نیز نشانگر تمرکز کایتاسیون در اطراف مرکز محفظه بود، این نتیجه با نتایج به‌دست‌آمده بر اساس مدل‌سازی انجام شده و پارامترهای طراحی شامل جنس و ابعاد لوله و چیدمان ترانسدیوسرها منطبق بوده است.



Fig. 12 The tank is manufactured based on the design

شکل ۱۲ مخزن ساخته شده بر اساس طراحی انجام شده

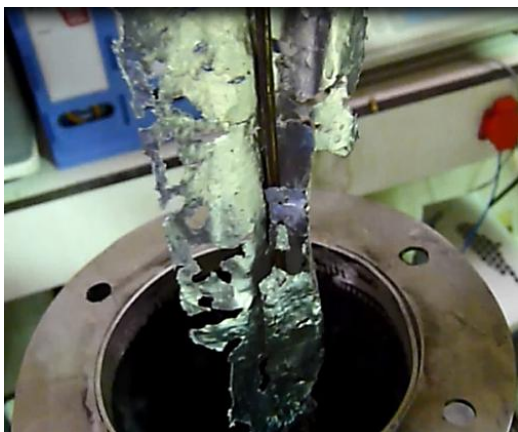


Fig. 13 Foil condition after being effected by ultrasonic vibration for 10 second

شکل ۱۳ وضعیت فویل پس از اعمال ارتعاش فراصوتی به مدت ۱۰ ثانیه

با توجه به شکل ۱۰ توزیع فشار در یک مقطع از آب داخل محفظه به‌صورت نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی مقادیر فشار در راستای قطر مقطع از موقعیت صفر تا ۹۸ میلی‌متر ارائه شده است. مقدار کمترین فشار منفی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی برابر ۱۰۳ کیلو پاسکال می‌باشد که از مقدار محاسبه شده در رابطه ۱، (۹۸/۱۵۶ کیلو پاسکال) بیشتر می‌باشد، لذا شرایط شکل‌گیری حباب فراهم شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده شد، حداکثر فشار منفی ایجاد شده در سیال در مرکز لوله متمرکز بوده و مقدار آن از فشار آکوستیک محاسبه شده برای شروع کایتاسیون در آب در دمای معمول کمتر می‌باشد. لذا از نظر تئوری بر اساس رابطه ۱ وقوع پدیده کایتاسیون در محفظه شستشوی قطعی است.

بر اساس نتایج تحلیل هارمونیک در شکل ۱۱ شرایط آب در تمام بخش‌های محفظه با تقریب قابل قبولی مشابه می‌باشد؛ لذا این شرایط برای همه سیال داخل محفظه برقرار است و حداقل فاصله میان ترانسدیوسرها نیز با توجه به شرایط انتشار موج با تقریب قابل قبولی برابر قطر لوله $(2 \times \frac{3\lambda}{4})$ در نظر گرفته شد. چیدمان مارییج که به‌منظور برقراری توزیع یکنواخت جرمی در سراسر محفظه و همچنین ایجاد شرایط یکسان در طول محفظه تمیزکاری استفاده شده است، در تحلیل‌های مودال و هارمونیک مورد تأیید قرار گرفت. با انتخاب این چیدمان برای ترانسدیوسرها، سیال داخل محفظه در معرض شرایط یکسانی قرار خواهد گرفت و این امر منجر به یکنواخت شدن فرایند شستشوی خواهد شد.

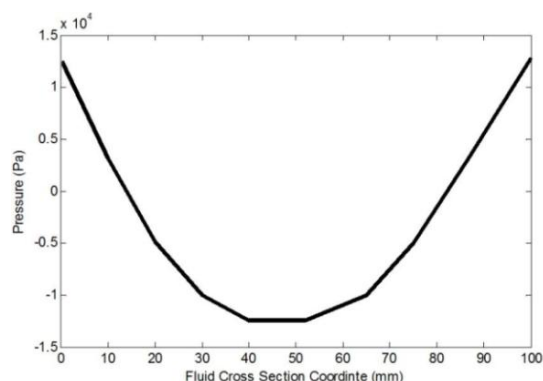


Fig. 11 Pressure Created along the cross-section of fluid

شکل ۱۱ فشار ایجاد شده در راستای مقطع سیال

۴- ساخت و بررسی عملکرد مخزن

جهت بررسی عملکرد محفظه طراحی و مدل‌سازی شده یک مخزن با مشخصات طراحی شده مطابق شکل ۱۲ ساخته شد. مولد قدرت مورد استفاده دارای حداکثر توان ۱۸۰۰ وات و

- [7] H. Lais, P.S. Lowe, T.H. Gan, L.C. Wrobel, Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 7, pp. 1-15, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045>
- [8] W. Tangsopa, T. Keawklan, K. Kesngam, S. Ngaochai, J. Thongsri, Improved Design of Ultrasonic cleaning tank using harmonic response analysis in ANSYS, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, pp. 159, 2018, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/159/1/012042>
- [9] H. Lais, P.S. Lowe, T.H. Gan, L.C. Wrobel, Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 7, No 1-15, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045>
- [10] P. Dunst, T. Hemsel, P. Bornmann, W. Littmann, W. Sextro, Optimization of ultrasonic acoustic standing wave systems, *Actuators*, Vol. 9, No. 1, 2020, <https://doi.org/10.3390/act9010009>
- [11] W. Tangsopa, J. Thongsri, A dual frequency ultrasonic cleaning tank developed by transient dynamic analysis, *Applied Sciences*, Vol. 11, pp. 699, 2021, <https://doi.org/10.3390/app11020699>
- [12] J. Thongsri, Vibration analysis and development of a submersible ultrasonic transducer for an application in the inhibitory activity of pathogenic bacteria, *IEEE Access*, 9, pp. 142362-142373, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120136>
- [13] A. Gachagan, A. Msnab, R. blindt, M. Patrick, A high power ultrasonic array based test cell, *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 57-68, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.055>
- [14] A. Abdollah, S. Foroughi, A. Pak, A. Hajjalimohammadi, Ultrasonic transducers layout optimization in the process of finite element method, *Proceedings of The 11th International Conference on Manufacturing Engineering Iran*, 2010. (in Persian)
- [15] W. Tangsopa, J. Thongsri, Development of an Industrial Ultrasonic Cleaning Tank Based on Harmonic Response Analysis, *Ultrasonics*, Vol. 91, pp. 68-76, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.013>
- [16] W. Tangsopa, J. Thongsri, A novel ultrasonic cleaning tank developed by harmonic response analysis and computational fluid dynamics, *Metals*, Vol. 10, pp. 335, 2020, <https://doi.org/10.3390/met10030335>
- [17] S. Phophayu, K. Kliangklom, J. Thongsri, Harmonic response analysis of tank design effect on ultrasonic cleaning process, *Fluid*, Vol. 7, No 3, pp. 99, 2022, <https://doi.org/10.3390/fluids7030099>
- [18] L. Habiba, S. Premesh, G. Tat-Hean, C. Luiz Wrobel, Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 45, pp. 7-16, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045>
- [19] A. Farahani, *Design of ultrasonic inline wire claeing system*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 2018. (in Persian)

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک مخزن استوانه‌ای شکل جدید با استفاده از مبدل‌هایی با سطح مقطع مقعر و چیدمان مارپیچی جهت استفاده در سیستم‌های شستشوی فراصوتی پیوسته انجام شده است. جهت مدل‌سازی از تحلیل‌های استاتیکی، مودال، هارمونیک و تحلیل گذرا دینامیک سیال محاسباتی در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS 15 استفاده شده است. با انجام مدل‌سازی میدان فشار ایجاد شده در سیال در اثر نوسانات فراصوتی منتقل شده از مبدل به محفظه حاوی سیال تمیزکاری (آب) شبیه‌سازی شد و محدوده تشکیل کاپیتاسیون با مقایسه فشار آکوستیک ایجاد شده در سیال با فشار بحرانی آستانه کاپیتاسیون مشخص گردید.

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با روش اجزا محدود و نتایج آزمون تجربی نشان می‌دهد که محفظه جدید طراحی شده عملکرد مناسبی در شستشوی فراصوتی طولی پیوسته دارد و مدل‌سازی عددی ابزار مناسبی برای طراحی محفظه شستشوی فراصوتی است. استفاده از سیستم شستشوی فراصوتی معرفی شده در این مقاله می‌تواند جایگزین قابل‌قبولی برای سیستم‌های سنتی شستشو باشد و امکان استفاده صنعتی از این سیستم در صنایع مختلف مانند صنایع شیمیایی، صنایع غذایی و صنایع پیشرفته وجود دارد.

۶- مراجع

- [1] ASM Handbook, Surface Engineering, ASM International Society, Vol. 5, 1994.
- [2] H.L. Zhao, D.X. Wang, Y.X. Cai, F.C. Zhang, Removal of iron from silica sand by surface cleaning using power ultrasound, *Minerals Engineering*, Vol. 20, No. 8, pp. 816-818, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.10.005>
- [3] J.O. Kima, S. Choi, J. H. Kimb, Vibroacoustic characteristics of ultrasonic cleaners, *Applied Acoustics*, Vol. 58, pp. 211-228, 1999, <https://doi.org/10.3390/met10030335>
- [4] B. Niemczewski, Estimation of the suitability of selected organic solvents for ultrasonic cleaning, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 6, pp.149-156, 1999, [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(98)00044-3)
- [5] E.I. Maisonhaute, C. Prado, P. C. White, R. G Compton, Surface acoustic cavitation understood via nanosecond electrochemistry, Part III: shear stress in ultrasonic cleaning, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 9, No. 6, pp. 297-303, 2002, [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(02\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(02)00089-5)
- [6] A. Gachagan, D. Speirs, A. McNab, The design of a high power ultrasonic test cell using finite element modelling techniques, *Ultrasonics*, Vol. 41, pp. 283-288, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00453-5](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00453-5)