



اثر چیدمان پیزوالکتریک بر چگالی انرژی آکوستیکی در ریزمحفظه فراصوتی تهیه نانوامولسیون

سید محمد محسن مدرس قیصری^۱، پدram صفرپور^۲ و مجید زندی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲ استادیار گروه انرژی‌های تجدید پذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۱

چکیده

امروزه نانوامولسیون‌ها و فناوری‌های تولید آن، به یکی از مباحث مهم در صنایع مختلف از جمله مهندسی شیمی، پزشکی و غذایی تبدیل شده است. موج‌دهی فراصوتی از مناسب‌ترین روش‌های تهیه نانوامولسیون‌ها است که در مقیاس‌های مختلف به کار برده می‌شود. در برخی از کاربردهای خاص، از ریزمحفظه‌ها برای تهیه نانوامولسیون استفاده می‌شود. انتشار امواج فراصوتی توسط سرامیک‌های پیزوالکتریک (پیزو) انجام شده که مهم‌ترین بخش یک حمام فراصوتی به شمار می‌رود. نحوه قرار گرفتن و بسامد تحریک پیزوها، تاثیر فراوانی بر بهمکنش امواج و کارایی حمام فراصوتی دارد. در این مقاله طی شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزار کامسول، به بررسی چهار چیدمان ریزمحفظه‌های فراصوتی مکعبی، پرداخته شده است. موج‌دهی فراصوتی در سه بسامد ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز انجام شده و تاثیر افزودن پیزوها در بسامدهای مختلف جهت دستیابی به مناسب‌ترین چیدمان ارزیابی شده است. نشان داده شد، افزودن دو پیزو به صورت روبروی هم به چیدمان، موجب افزایش چگالی انرژی آکوستیکی به صورت نمایی شده و این افزایش در بسامدهای کمتر بسیار محسوس‌تر است.

کلمات کلیدی: نانوامولسیون؛ موج‌دهی فراصوتی؛ ریزمحفظه؛ شبیه‌سازی انتشار امواج آکوستیکی؛ نرم‌افزار کامسول.

Piezoelectric Configurations Effects on Acoustic Energy Density in an Ultrasonic Microcontainer for Preparing Nanoemulsion

S. M. M. Modarres Gheisari¹, P. Safarpour², M. Zandi^{3,*}

¹ Ph.D. Student, School of Mechanical and Energy Systems Eng. Faculty, Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

² Assistant Prof., Mechanical and Energy Systems Eng. Faculty, Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

³ Assistant Prof., Renewable Energies Department, Mechanical and Energy Systems Eng. Faculty, Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Nanoemulsions and their preparing technologies have become one of the most important fields in various industries such as chemical engineering, pharmaceuticals and food. Ultrasonic irradiation is a method for preparing nanoemulsions, which is used in different scales. Microcontainers, by use of piezoelectric ceramic (abbr. piezo), are utilized to prepare nanoemulsions in some special researches. Irradiation of ultrasonic waves by these piezos in microcontainers is the most important part of nanoemulsion preparation process. Piezoes arrangement and their excite frequencies have a great effect on interacting waves and therefore, ultrasonic bath performance. In this paper, four configurations of cubic ultrasonic microcontainer have been analyzed by simulations in COMSOL Multiphysics software. Irradiation of ultrasonic waves performed at three frequencies 20, 200 and 300 kHz. In order to determine the best arrangement, the effect of adding piezoes in different frequencies and arrangements has been analyzed. It has been shown that adding two faced piezoes, leads to increasing acoustic energy density logarithmically and this increment is more evident in lower frequencies.

Keywords: Nanoemulsion; Ultrasonic Irradiation; Microcontainer; Simulating Acoustic Waves Propagation; COMSOL Multiphysics Software.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۷۳۹۳۲۶۴۴-۲۱-۹۸+

آدرس پست الکترونیک: m_zandi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

سابقه استفاده از امواج فراصوتی در کاربردهای مهندسی به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد. امروزه روش موج‌دهی فراصوتی در صنایع مختلفی از جمله، صنایع نفت و گاز [۱]، تشخیص فرسودگی [۲]، ماشینکاری و شکل‌دهی فلزات [۳]، رسوب زدایی و شستشو [۴]، صنایع غذایی [۵] و صنایع دارویی [۶]، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای مهم موج‌دهی فراصوتی در فرایندهای ساخت مواد، هم‌وزن سازی محلول‌ها و تولید نانوامولسیون (امولسیون با فاز محلول در ابعاد نانو) است که علاوه بر روش‌های شیمیایی و متالورژی، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۷].

انتشار امواج فراصوتی با تحریک سرامیک‌های پیزوالکتریک در بسامد مناسب ایجاد می‌شود [۸] که در این مقاله تحت عنوان "پیزو" نام برده شده‌اند. در حمام‌های فراصوتی با توجه به اهداف طراحی، پیزوهایی با چیدمان‌های متفاوت و بسامدهای مختلف تحریک وجود دارند. محدوده بسامد برای حمام‌های فراصوتی از ۲۰ کیلوهرتز تا ۴/۶ مگاهرتز گزارش شده است [۹]. گرچه افزایش بسامد کاری با کاهش شدت فشار آکوستیکی همراه است، ولی استفاده از بسامدهای محدوده مگاهرتزی می‌تواند موجب بهبود پایداری نانوامولسیون گردد [۱۰].

به طور معمول، توزیع فشار در یک حمام فراصوتی، یکنواخت نبوده و درصد امکان وقوع حفره‌زایی^۱ به سطح فشار محلی و نحوه توزیع آن بستگی دارد. هرچه توزیع فشار آکوستیکی یکنواخت‌تر باشد، کارایی حمام فراصوتی بیشتر و چیدمان پیزوها در آن مناسب‌تر بوده است. به همین دلیل، یکی از مهم‌ترین معیارها در زمینه طراحی حمام‌های فراصوتی، یکنواختی توزیع فشار آکوستیکی است که تا کنون محققان متعددی به بررسی آن پرداخته‌اند [۱۱-۱۴]. ریزمحفظه‌های فراصوتی یکی از انواع حمام‌های فراصوتی با حجم چند ده میلی‌لیتر هستند که می‌توانند جهت موج‌دهی فراصوتی در مقیاس آزمایشگاهی و ساخت و فرآوری مواد حساس به کار برده شوند [۱۵].

هدف از این مقاله، بررسی تاثیر چیدمان‌های مختلف و بسامدهای متفاوت پیزوها بر توزیع فشار آکوستیکی و چگالی

انرژی آکوستیکی در یک ریزمحفظه مکعبی و یافتن مناسب‌ترین چیدمان در بسامدهای مختلف کاری است. بدین ترتیب در راستای بهبود کارایی ریزمحفظه‌های فراصوتی مکعبی، ارزیابی‌های متعددی در بسامدهای ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز، طی چهار چیدمان متفاوت (موج‌دهی یک بعدی تا سه بعدی) انجام شده و به مقایسه نمودارهای چگالی انرژی آکوستیکی در حالت‌های مختلف جهت یافتن مناسب‌ترین چیدمان در هر بسامد پرداخته شده است.

۲- تئوری

جهت بیان تئوری کار، مدل ریاضی انتشار امواج در سیال و حفره‌زایی صوتی باید مد نظر قرار گیرند. در این مقاله برای شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوتی در ریزمحفظه، مواد از نرم‌افزار کامسول^۲ نسخه ۵.۲ و ماژول‌های مکانیک جامد^۳، الکترواستاتیک^۴ و فشار آکوستیکی^۵ آن استفاده شده است. این نرم‌افزار برای حل معادلات از روش عددی المان محدود استفاده می‌کند. اساس کار این روش، ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی و حل عددی آن‌ها با مقداردهی تکرارشونده روی گره‌های المان‌های مش است. این روش در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده، یا هنگامی که دامنه متغیر است و یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست، بسیار مفید است. با توجه به این نکته که دقت مش‌بندی در سطح و اطراف پیزو با سایر نقاط تفاوت بسیاری دارد، این روش می‌تواند بسیار کارا باشد.

مسئله مورد بررسی در این پژوهش، از نوع غیر خطی است و برای حل معادلات این سیستم غیر خطی، از حلگر مستقیم و روش کوپل کامل استفاده شده است. حلگرهای مستقیم نرم‌افزار کامسول عبارتند از: PARDISO، MUMPS و SPOOLES. که با توجه به قابلیت استفاده از حافظه سخت‌افزاری جهت پردازش و نیز امکان حل تحت شبکه، در این پژوهش حلگر MUMPS استفاده شده است. معادله امواج آکوستیکی برای شرایط امواج فراصوتی طولی و بدون

² COMSOL MULTIPHYSICS

³ Solid Mechanics

⁴ Electrostatics

⁵ Pressure Acoustic Module

¹ Cavitation

کاهش تدریجی حجم، به طور ناگهانی ترکیده و حفره‌زایی صوتی رخ می‌دهد [۲۱]. در غیر اینصورت امواج صوتی موجب نوسان‌های شعاعی حباب‌ها می‌شوند.



شکل ۱- ساز و کار حفره‌زایی صوتی [۲۲]

رفتار حباب قبل از ترکیدن (پدیده حفره‌زایی) را می‌توان مطابق معادله ۴ (رابطه ریلی- پلست) مدل‌سازی نمود [۲۳].

$$R\ddot{R} + \frac{3\dot{R}^2}{2} = \frac{1}{\rho} \left[\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_V \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} + p_V - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} - p_0 - P(t) \right] \quad (4)$$

که در آن، R ، \dot{R} و \ddot{R} به ترتیب شعاع لحظه‌ای حباب و مشتق زمانی اول و دوم آن، $P(t)$ فشار دینامیکی، σ کشش سطحی، ρ چگالی سیال، p_V فشار بخار، p_0 فشار هیدرواستاتیکی، κ شاخص پلی‌تروپیک و η لزجت دینامیکی است. در حفره‌زایی، احتمال وقوع پدیده‌های غیرمنتظره‌ای در کسری از ثانیه وجود دارد و با افزایش دمای داخلی حباب تا 3000°K و انتشار یک موج ضربه‌ای تا 6 GPa در کسری از زمان (از مرتبه میکروثانیه)، می‌تواند سرعت ساخت و فرآوری مواد را افزایش دهد [۱۱].

هرچه شعاع حباب‌ها کوچکتر باشد، در فشار بالاتری حفره‌زایی رخ می‌دهد؛ به بیان دیگر، وقوع حفره‌زایی برای حباب با شعاع R_0 نیازمند آستانه فشار صوتی حفره‌زایی P_c است که می‌توان آن را از طریق معادله ۵ محاسبه کرد [۱۱].

$$P_c = P_0 - P_v + \frac{2\sqrt{3}}{9} \left(\frac{2\sigma}{R_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن P_0 فشار استاتیکی، P_v فشار بخار اشباع و σ ضریب کشش سطحی است. بدین ترتیب در بخش بعدی به شبیه‌سازی یک ریزمحفظه فراصوتی پرداخته خواهد شد.

پلاریزاسیون یا منابع دو قطبی مطابق معادله (۱) است [۱۶] و [۱۷]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla P \right) + \frac{\omega^2 P}{\rho c^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن، ρ چگالی آب (kg/m^3)، c سرعت انتشار امواج فراصوت در آب (m/s)، $P = P_A \cos(\omega t)$ فشار آکوستیکی (P_A بیشینه فشار آکوستیکی، ω بسامد تحریک و t زمان بر حسب ثانیه) است.

فیزیک مورد استفاده، فیزیک آکوستیک فشار در حوزه بسامد^۱ بوده که تغییر فشار ناشی از انتشار امواج در سیال را در حوزه بسامد تحلیل می‌کند. معادله تغییر چگالی و سرعت انتشار موج در سیال تحت شرایط دینامیکی با بسامد ω به ترتیب عبارت است از [۱۱]:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{4 i \omega \mu}{3 \rho_0 c_0^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$c = c_0 \left(1 + \frac{4 i \omega \mu}{3 \rho_0 c_0^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن ρ_0 و c_0 به ترتیب، چگالی و سرعت انتشار صوت در آب تحت شرایط استاتیکی و μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشند.

اگرچه در طراحی و به‌کارگیری راکتورها، حفره‌زایی هیدرودینامیکی^۲ پدیده‌ای نامطلوب به حساب می‌آید [۱۸]؛ ولی حفره‌زایی صوتی ساز و کار اصلی در متلاشی شدن حباب‌ها حین نانوامولسیون‌سازی، به‌روش موجهی فراصوتی است [۱۹]. حفره‌زایی صوتی در اصل، نوسان‌های شعاعی حباب‌های گازی میکروسکوپی موجود در سیال است که با عبور امواج صورت می‌گیرد [۲۰]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هر سیکل از موج متناوب صوتی منتشر شده در سیال، دارای دو نیم‌سیکل فشاری مثبت و منفی است. نیم سیکل فشار منفی، موجب افزایش حجم و نیم سیکل فشار مثبت، موجب کاهش حجم حباب‌های میکروسکوپی می‌شود. اگر اندازه موج صوتی و قدرت خلأزایی آن به‌مقداری باشد که بتواند شعاع حباب را تا آستانه حفره‌زایی صوتی (حدود $2/3$ برابر شعاع حباب در حالت تعادل) برساند، حباب در نیم سیکل فشار مثبت، به‌جای

¹ Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)

² Hydrodynamic cavitation

۳- شبیه‌سازی

در این پژوهش پس از بیان مشخصه‌های ظاهری حمام فراصوتی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار کامسول، به چگونگی استفاده از ماژول‌های سرامیک پیزوالکتریک و انتشار امواج پرداخته شده است.

شکل حمام فراصوتی مکعب و هر بعد آن، دو سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. حمام فراصوتی شبیه‌سازی شده کامل محصور بوده و سطح آزاد ندارد. شش دیواره آن از نوع سخت^۱ بوده که در آن‌ها، مولفه عمود بر سطح مشتق فشار صفر است. بدین ترتیب، شرط مرزی سیال در دیواره‌ها را می‌توان با معادله ۶ فرض کرد.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

که در آن، p فشار آکوستیکی و n مولفه عمود بر سطح می‌باشد. شش پیزو در شش وجه مکعب قرار داده شده که مستقل از هم بوده و موج‌دهی فراصوتی بر اساس چهار چیدمان انجام گرفته است. در صورت عدم نیاز به یک پیزو، آن پیزو از شبیه‌سازی حذف و دیواره تمام آن وجه را می‌پوشاند. ولتاژ تحریک در همه آزمایش‌ها یکسان بوده $(U_0 = 30V)$ و شرایط مرزی سرامیک‌های پیزوالکتریک به صورت زیر است:

۱- در سطح تماس پیزو با سیال، نیروی الکتروستاتیکی U برابر صفر است.

۲- در سطح آزاد پیزو، نیروی الکتروستاتیکی U برابر U_0 است.

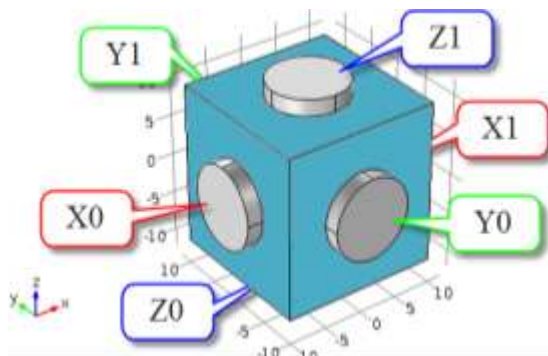
۳- در سطح آزاد پیزو، سرعت ارتعاش V برابر صفر است (قید سطح ساکن).

برای ساماندهی استفاده ترکیبی از پیزوها در این تحقیق، نام‌گذاری آن‌ها مطابق شکل ۲ انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود:

الف) پیزوهای چپ و راستی در راستای محور X ها به ترتیب X_1 و X_0

ب) پیزوهای راستی و چپ در راستای محور Y ها به ترتیب Y_1 و Y_0

پ) پیزوهای پایینی و بالایی در راستای محور Z ها به ترتیب، Z_0 و Z_1 نام‌گذاری شده‌اند. سیال مورد استفاده آب است و مشخصه‌های فیزیکی آن را می‌توان در جدول ۱ مشاهده نمود [۱۱]. برای بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر توزیع چگالی فشار آکوستیکی مطابق جدول ۲، چیدمان‌های مختلفی از پیزوها، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.



شکل ۲- نام‌گذاری سرامیک‌های پیزوالکتریک

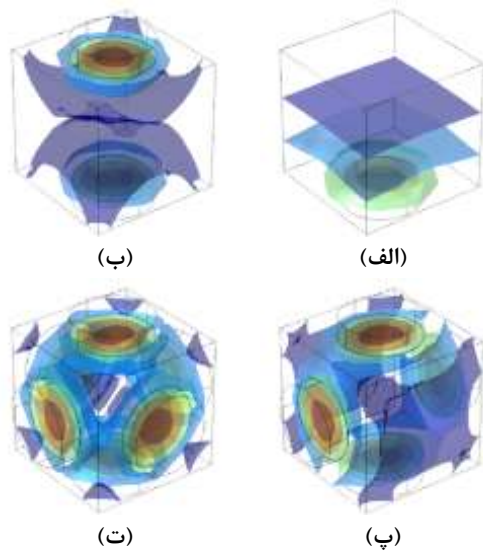
جدول ۱- مشخصه‌های فیزیکی استفاده شده در شبیه‌سازی

مقدار	مشخصه
۱۰۰۰	چگالی، $\rho (kg/m^3)$
۱۵۰۰	سرعت انتشار امواج، $c (m/s)$
$1/0.1 \times 10^{-2}$	لزجت دینامیکی، $\mu (Pa s)$

جدول ۲- چیدمان پیزوهای فعال در شبیه‌سازی‌های حمام فراصوتی

توضیح	پیزوهای فعال						شماره چیدمان
	Y1	Y0	X1	X0	Z1	Z0	
یک بعدی با یک پیزو	۱	○	○	○	○	○	●
یک بعدی با دو پیزو	۲	○	○	○	○	●	●
دو بعدی، هر بعد دو پیزو	۴	○	○	●	●	●	●
سه بعدی، هر بعد دو پیزو	۶	●	●	●	●	●	●

^۱ Sound Hard Boundary (Wall)



شکل ۳- نمایشی از توزیع فشار آکوستیکی در چیدمان‌های چهارگانه (الف: چیدمان اول، ب: چیدمان دوم، پ: چیدمان سوم و ت: چیدمان چهارم)

جدول ۳- جنس و ابعاد پیزوها

بسامد (kHz)	جنس	شعاع (mm)	ضخامت (mm)
۲۰	PZT-۴	۶	۲
۲۰۰	PZT-۵h	۶	۱
۳۰۰	PZT-۵j	۷	۰/۵

جدول ۴- مناسب‌ترین بسامد در چیدمان‌های چهارگانه

بسامد اصلی (Hz)	چیدمان			
	اول (Hz)	دوم (Hz)	سوم (Hz)	چهارم (Hz)
۲۰,۰۰۰	۳۷,۰۱۵	۳۶,۹۸۸	۳۶,۹۷۳	۳۶,۹۶۱
۲۰۰,۰۰۰	۲۲۲,۱۶۰	۲۲۱,۸۴۴	۲۲۱,۹۰۴	۱۸۱,۱۶۸
۳۰۰,۰۰۰	۳۰۵,۴۰۳	۲۹۶,۲۱۵	۲۷۷,۰۳۹	۳۰۵,۳۲۰

در شبیه‌سازی انتشار امواج در محیط‌های حاوی سیال، اندازه‌مش‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است. در مش‌بندی بزرگ، شبیه‌سازی انتقال امواج به درستی صورت نمی‌گیرد و از طرف دیگر، مش‌بندی کوچک موجب افزایش حجم

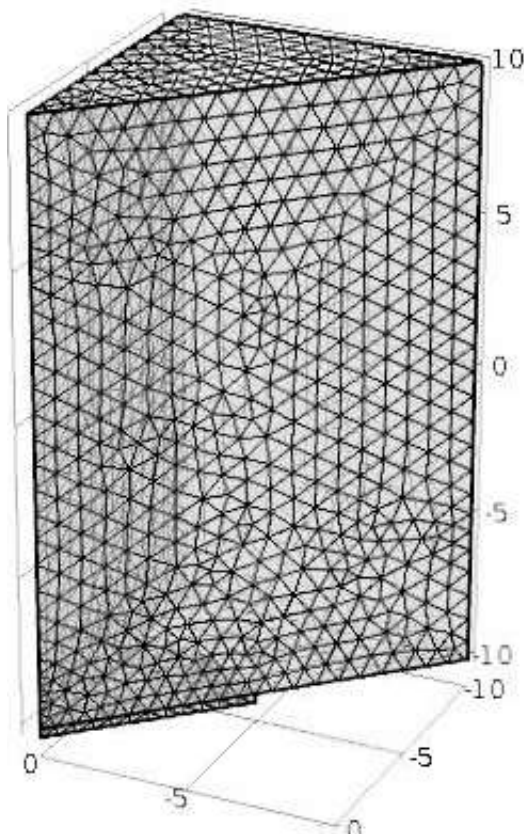
در چیدمان اول از یک پیزو در کف استفاده شده است (شکل ۳-الف). از این چیدمان، به عنوان پایه‌ایی برای ارزیابی سایر چیدمان‌ها استفاده شده است. چیدمان دوم، سوم و چهارم از پیزوهای روبروی هم تشکیل شده‌اند که به ترتیب دارای دو (شکل ۳-ب)، چهار (شکل ۳-پ) و شش (شکل ۳-ت) پیزو می‌باشند. در چیدمان‌های شماره یک و دو، موج‌دهی فقط در یک بعد انجام می‌شود. در چیدمان‌های سوم و چهارم نیز، موج‌دهی دو بعدی (راستای محور Zها و Xها) و سه بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

می‌توان با بهره‌گیری از تقارن و کاهش حجم محاسبه‌ها، موجب افزایش سرعت شبیه‌سازی گردید. متقارن‌ترین حالت، چیدمان شماره چهار (شکل ۳-ت) است. در این چیدمان می‌توان مطابق شکل ۴، طی پنج مرحله استفاده از تقارن، حجم محاسبه‌ها را حدود پنجاه برابر کمتر نمود؛ همچنین حجم محاسبه‌ها در چیدمان‌های اول تا سوم را نیز می‌توان به ترتیب تا $\frac{1}{8}$ ، $\frac{1}{16}$ و $\frac{1}{16}$ کاهش داد.

برخی محققان در بررسی‌های خود از موج‌دهی فراصوتی با بسامدهای ۲۰ [۹ و ۲۴]، ۲۰۰ [۱۰ و ۲۵] و ۳۰۰ [۲۶] کیلوهرتز برای تهیه نانوامولسیون استفاده کرده‌اند. در این مقاله نیز از این دامنه بسامدها برای بررسی اثر آن‌ها بر توزیع فشار آکوستیکی و چگالی انرژی آکوستیکی در حمام فراصوتی استفاده شده است. جنس و ابعاد پیزوها در هر بسامد با توجه به نمونه‌های موجود شبیه‌سازی یا تجاری انتخاب شده‌اند که جزئیات آن را می‌توان در جدول ۳ مشاهده کرد.

کارآیی یک پیزو در حالت‌های بدون بار و حین باردهی تفاوت دارد. به همین دلیل بایستی در هر چیدمان، مناسب‌ترین بسامد را به دست آورد که در آن، پیزوها با بیشترین کارایی و کمترین هدر رفت، انرژی ورودی را به امواج آکوستیکی تبدیل کنند. بدین ترتیب در هر چیدمان ابتدا در بازه‌ایی شامل بسامد اصلی، شبیه‌سازی انجام گرفته تا پس از استخراج نمودار چگالی انرژی آکوستیکی در آن بازه، مناسب‌ترین بسامد برای تحریک آن چیدمان مشخص شود. بسامدهای متناسب با بیشترین چگالی انرژی آکوستیکی در چیدمان‌های مختلف را می‌توان در جدول ۴ مشاهده کرد.

موج‌های منتشر شده، به پیچیدگی و ظرافت امواج صوتی افزوده شده و ساختار امواج به ترتیب به شکل‌های کروی و لایه‌ای-کروی تبدیل می‌شوند. ساختار امواج صوتی در چیدمان‌های اول و دوم بسامد ۲۰ کیلوهرتز (شکل ۶-الف و ب)، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ چرا که علاوه بر بسامد کم و طول موج به نسبت بلند، دیواره‌ها نیز از نوع سخت تعریف شده‌اند و موج‌دهی در هر دو چیدمان در یک بعد انجام شده است. با کوچک شدن اندازه طول موج، تفاوت نقاط کنج و خطوط لبه در بسامدهای ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز به وضوح مشاهده می‌شود. در مواردی که نقاط کنج دارای بیشینه فشار هستند، مرکز مکعب نیز بیشترین فشار را دارد (شکل ۷-الف، ۷-پ، ۷-ت، شکل ۸-الف، ۸-ب و ۸-پ). در سایر موارد نیز خطوط لبه و چند ناحیه متقارن در مرکز مکعب دارای بیشینه فشار هستند (شکل ۷-ب و شکل ۸-ت).



شکل ۴- مش‌بندی مناسب ابعاد کاهش یافته چیدمان اول در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز

محاسبه می‌شود. اندازه مش برای شبیه‌سازی یک موج بایستی متناسب با طول موج منتشر شده در محیط باشد؛ به نحوی که در کوچکترین طول موج، حداقل ۵ المان (۶-گره) وجود داشته باشد. با توجه به رابطه بین بسامد و طول موج، می‌توان از معادله ۷ برای تعیین حداکثر اندازه مش‌بندی قابل قبول استفاده کرد [۲۷].

$$dx_{max} = \frac{V}{f * 5} \quad (7)$$

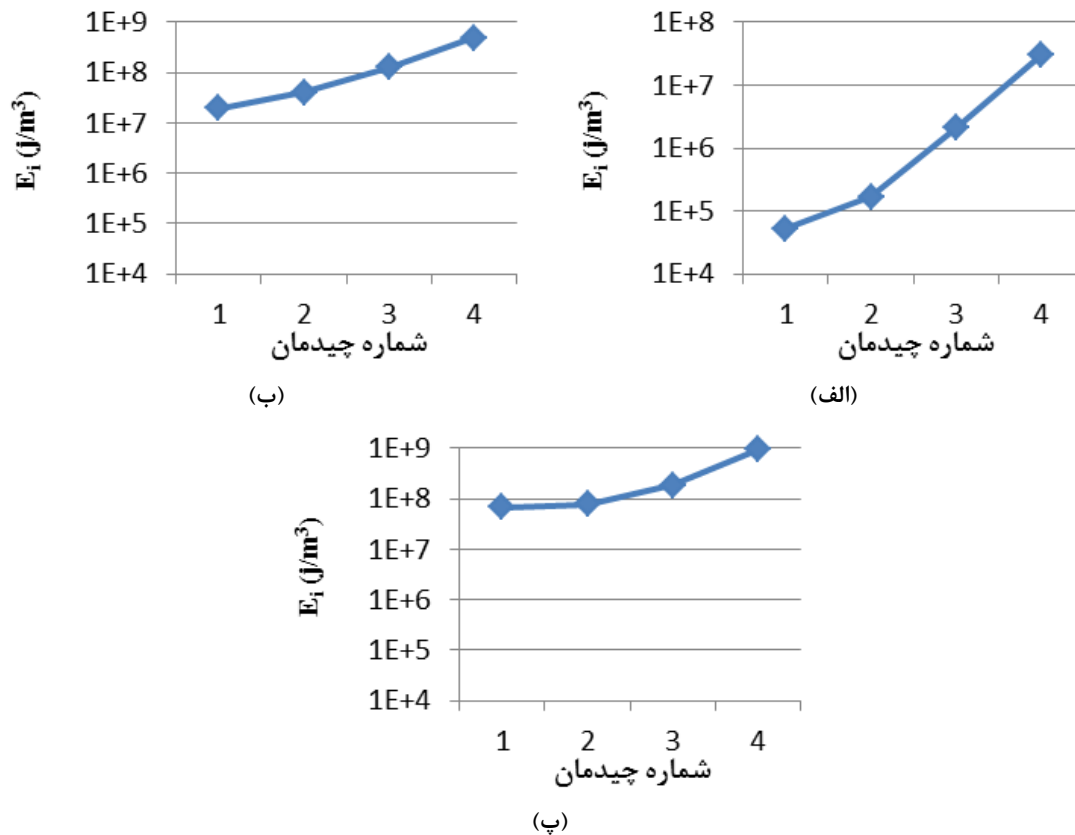
که در آن، $V = 1500 \text{ m/s}$ ، سرعت انتشار موج در آب و f بسامد تحریک پیزو است. به طور نمونه، تعداد المان‌ها در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز برای چیدمان‌های اول تا چهارم و با ابعاد کاهش یافته (با استفاده از تقارن) به ترتیب برابر ۲۶۷۴۰، ۱۳۷۷۸، ۱۴۲۷۶ و ۴۹۰۸ عدد است.

۴- فشار آکوستیکی

وجود پیزوهای غیر فعال در شبیه‌سازی باعث اختلال در نتایج می‌شود؛ به نحوی که در بسامدهایی خاص، ولتاژ قابل توجهی (حدود پنج برابر ولتاژ تحریک) در پیزوهای غیرفعال مشاهده شده که ناشی از خاصیت جذب انرژی (معکوس حالت انتشار امواج) در حالت تشدید پیزوها است. به همین دلیل در تمامی شبیه‌سازی‌ها، پیزوهای غیرفعال به‌طور کامل حذف شده‌اند. با توجه به ابعاد کوچک حمام فراصوتی، از تاثیر جاذبه زمین نیز صرف‌نظر شده است.

تحریک ناهمگام پیزوهای روبروی هم، موجب خنثی شدن اثر آن‌ها با یکدیگر و کاهش چگالی انرژی آکوستیکی تا حد صفر ($E=0 \text{ J/m}^3$) می‌شود. به همین دلیل، مطابق شرایط مرزی شماره ۱ و ۲، تحریک پیزوها به صورت همگام تعریف شده است.

یکی از خروجی‌های مهم شبیه‌سازی انتشار امواج، شکل‌های توزیع فشار آکوستیکی است. با استفاده از این خروجی‌ها می‌توان به میزان فشار آکوستیکی و یکنواختی آن، و در نتیجه شدت احتمال وقوع حفره‌زایی در حمام فراصوتی پی برد. شکل‌های ۶ تا ۸ توزیع فشار آکوستیکی چیدمان‌های چهارگانه در سه بسامد تحریک را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، در بسامد ۲۰ کیلوهرتز امواج صوتی بسیار ساده، جدا از هم و با ساختار لایه‌ای هستند. با افزایش بسامد به ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز و با کاهش طول



شکل ۵- چگالی انرژی آکوستیکی در چیدمان‌های چهار گانه در بسامدهای: الف) ۲۰، ب) ۲۰۰ و پ) ۳۰۰ کیلوهرتز

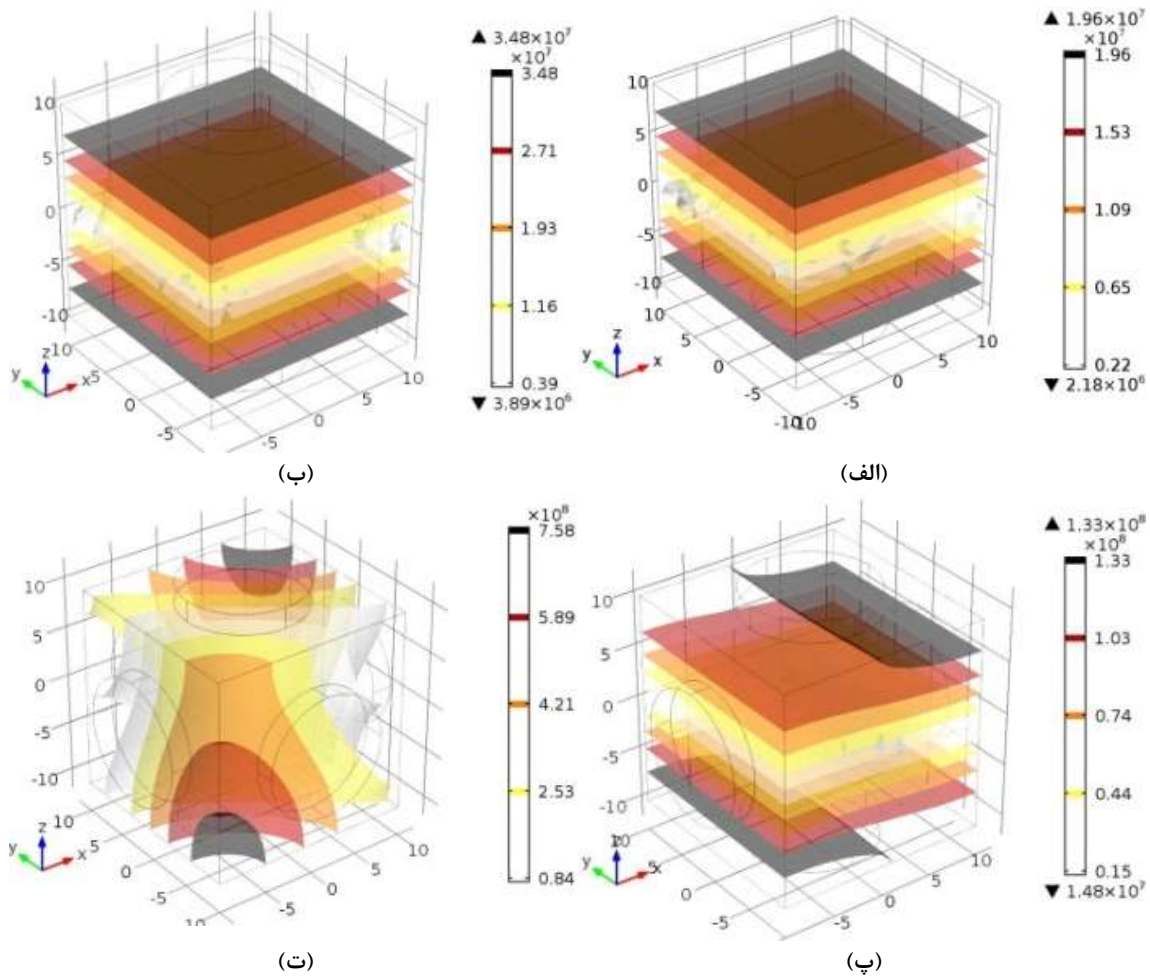
۵- چگالی انرژی آکوستیکی

برای مقایسه متغیرهای شبیه‌سازی و تعیین مناسب‌ترین حالت، می‌توان از میانگین حجمی چگالی انرژی آکوستیکی، که فرمول آن در معادله ۸ آمده [۱۱] استفاده نمود. واحد چگالی انرژی آکوستیکی، پاسکال یا همان ژول بر متر مکعب است و میزان انرژی آکوستیکی محیط بر واحد حجم را بیان می‌کند. به دلیل وجود نیم سیکل‌های فشاری و کششی در حمام فراصوتی، برای بررسی توزیع فشار آکوستیکی بایستی از قدر مطلق یا توان دوم آن استفاده کرد. چگالی انرژی آکوستیکی، تابعی از توان دوم فشار آکوستیکی است و می‌تواند معیار مناسبی برای مقایسه فشار آکوستیکی حمام‌های فراصوتی باشد. رسیدن اندازه فشار به آستانه فشار حفره‌زایی P_c ، نیز یکی از معیارهای ارزیابی

کارایی یک حمام فراصوتی است و با مقایسه چگالی انرژی آکوستیکی می‌توان کارایی دو چیدمان را با یکدیگر مقایسه کرد.

$$\bar{E} = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \frac{1}{2} \left(\frac{p^2}{\rho c^2} \right) dV \quad (۸)$$

که در آن V_0 حجم سیال است. در جدول ۵ چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌های چهارگانه E_i (i: شماره چیدمان)، در بسامدهای ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز آورده شده است. همانطور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد پیژوها، رشد چگالی انرژی آکوستیکی به صورت نمایی افزایش یافته است و نیز با کاهش بسامد، میزان رشد چگالی انرژی آکوستیکی طی چیدمان‌های چهارگانه افزایش یافته است.



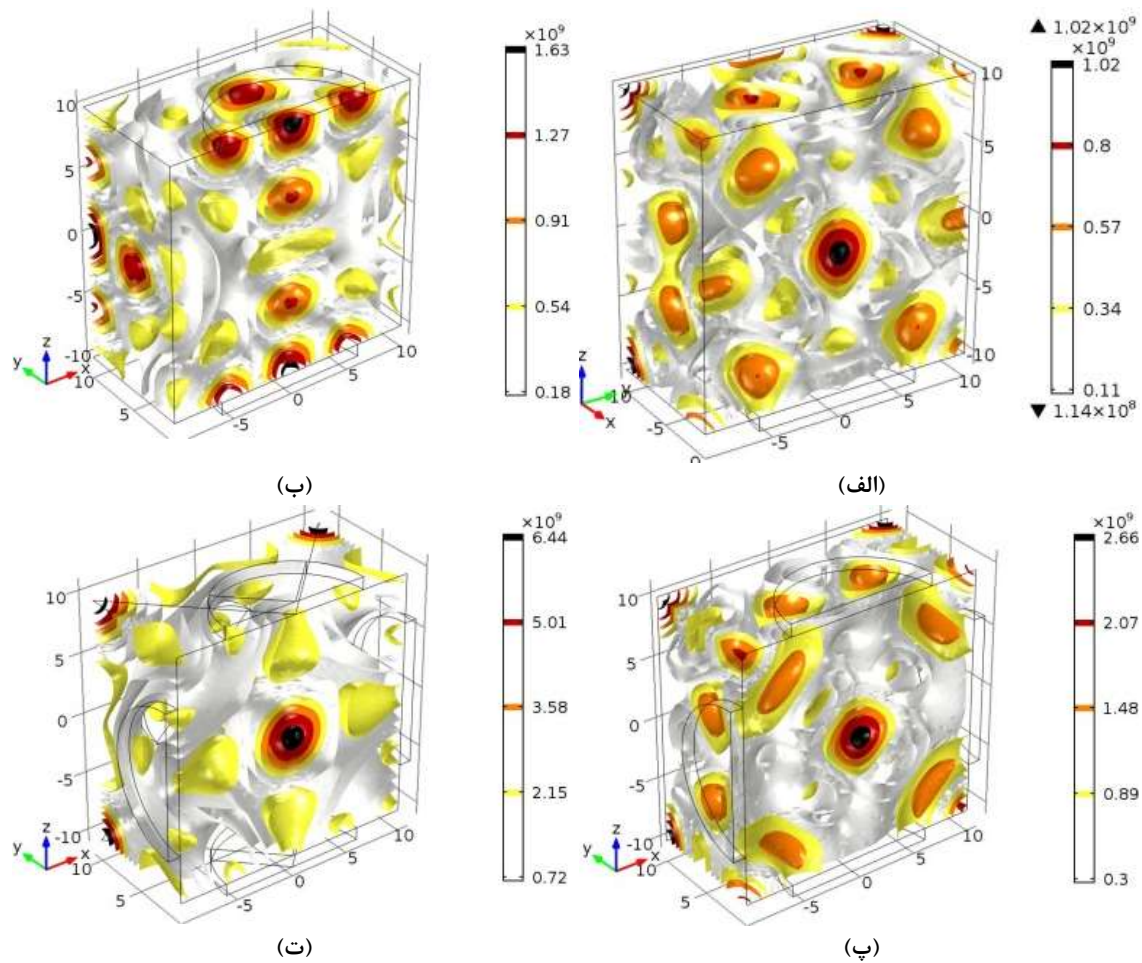
شکل ۶- توزیع فشار آکوستیکی در بسامد ۲۰ کیلوهرتز (الف) چیدمان اول، (ب) چیدمان دوم، (پ) چیدمان سوم و (ت) چیدمان چهارم

به بیان دیگر، با توجه به اهمیت طول موج در سه بسامد مورد ارزیابی، مشاهده می‌شود که هرچه بسامد تحریک کمتر باشد (۲۰ کیلوهرتز نسبت به ۲۰۰ کیلوهرتز و ۲۰۰ کیلوهرتز نسبت به ۳۰۰ کیلوهرتز)، با افزودن پیزو به چیدمان و بالابردن ابعاد موج‌دهی، نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی بیشتر است. به نحوی که بیشترین رشد چگالی انرژی آکوستیکی، در بسامد ۲۰ کیلوهرتز رخ داده است.

برای مقایسه میزان تاثیر افزوده شدن پیزوها بر افزایش چگالی انرژی آکوستیکی، بایستی مقادیر یکه چگالی انرژی آکوستیکی را با یکدیگر مقایسه کرد. بدین منظور، مطابق

جدول ۵- چگالی انرژی آکوستیکی در چیدمان‌های چهار گانه

بسامد تحریک (kHz)	E_p (j/m ³)	E_r (j/m ³)	E_v (j/m ³)	E_1 (j/m ³)	۲۰
۲۰	۳۰,۰۹۸,۶۹۵	۲,۰۷۸,۲۱۰	۱۶۸,۶۷۷	۵۳,۲۶۴	۲۰
۲۰۰	۴۸۳,۳۶۶,۷۲۱	۱۲۷,۸۴۲,۰۵۹	۴۱,۰۶۵,۵۶۹	۱۹,۸۱۷,۵۴۰	۲۰۰
۳۰۰	۹۳۴,۵۹۰,۴۰۳	۱۸۶,۷۱۹,۴۷۱	۷۸,۲۱۰,۰۳۹	۶۷,۶۶۶,۷۳۱	۳۰۰



شکل ۷- توزیع فشار آکوستیکی در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز (الف) چیدمان اول، (ب) چیدمان دوم، (پ) چیدمان سوم و (ت) چیدمان چهارم

مقادیر یکه شده چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌های دوم تا چهارم بر مقدار چیدمان اول ($E_1^n = E_1$) می‌توان به بررسی تاثیر افزودن پیزوها پرداخت.

$$E_i^n = \frac{E_i}{N_i} \quad (9)$$

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین تاثیر به ترتیب در موارد چیدمان چهارم به اول در بسامد ۲۰ کیلوهرتز (حدود ۹۴ برابر)، چیدمان سوم به اول در بسامد ۲۰ کیلوهرتز (حدود ۱۰ برابر) و چیدمان چهارم به اول در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز (حدود ۴ برابر) است. کمترین تاثیر نیز به ترتیب در موارد چیدمان دوم به اول در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز (حدود ۰/۶ برابر)، چیدمان سوم به اول در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز (حدود ۰/۷ برابر) و چیدمان دوم به اول در

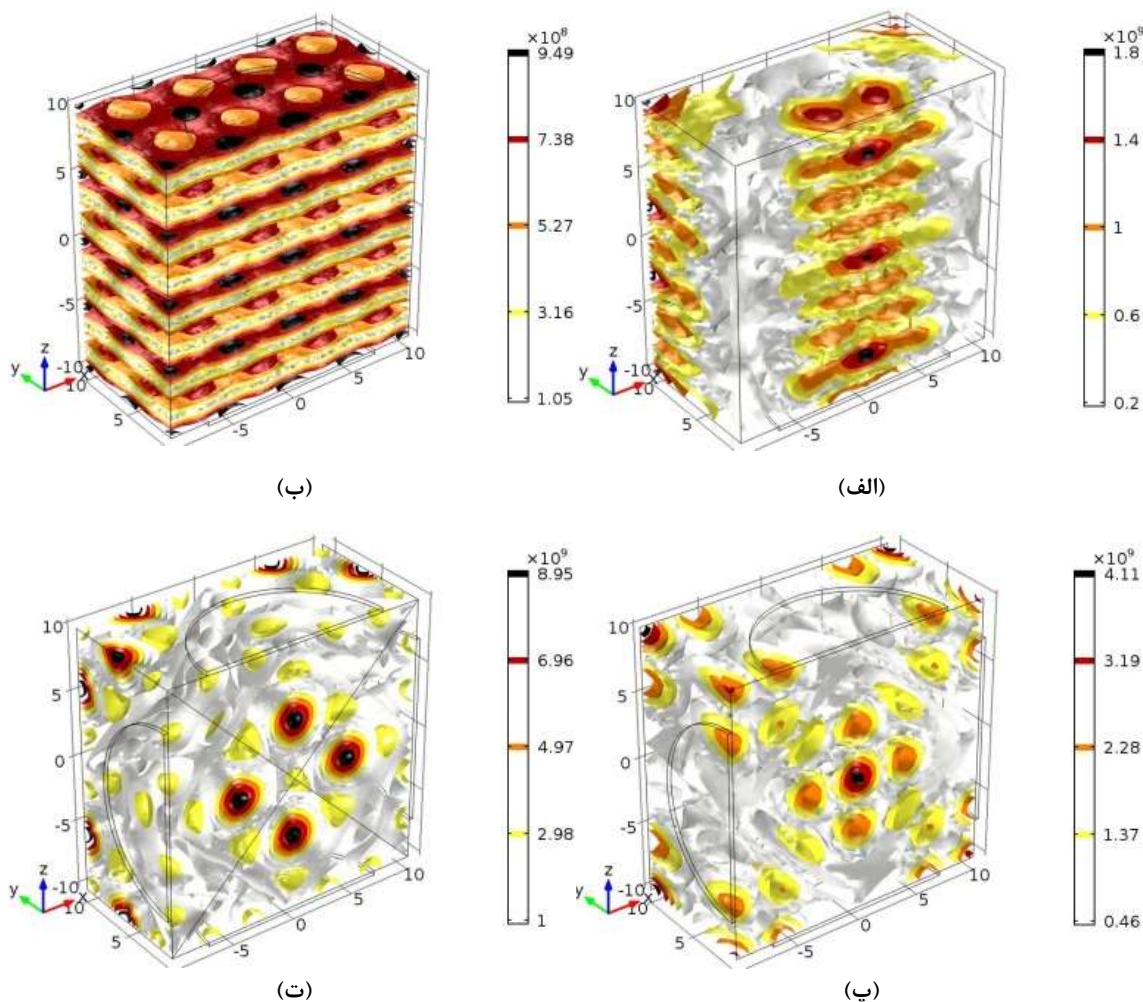
جدول ۶- نسبت مقادیر یکه چگالی انرژی آکوستیکی

چیدمان‌ها				بسامد تحریک (kHz)
$\frac{E_2^n}{E_1^n}$	$\frac{E_3^n}{E_1^n}$	$\frac{E_4^n}{E_1^n}$	$\frac{E_1^n}{E_1^n}$	
۹۴/۱۸	۹/۷۵	۱/۵۸	۱	۲۰
۴/۰۷	۱/۶۱	۱/۰۴	۱	۲۰۰
۲/۳۰	۰/۶۹	۰/۵۸	۱	۳۰۰

معادله ۹ اعداد جدول ۵ را بر تعداد پیزوها (N_i) تقسیم کرده تا مقادیر E_i^n به دست آید. حال مطابق جدول ۶، با تقسیم

ارسال امواج به صورت سه بعدی عمود بر هم باشد. نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی با افزایش بسامد کاهش می‌یابد، به نحوی که افزودن یک پیزو و سه پیزو در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز با اینکه به ترتیب موجب ۱/۶۱ و ۲/۷۶ برابر شدن چگالی انرژی آکوستیکی می‌شوند، ولی از نظر مصرف انرژی به صرفه نمی‌باشند. در این بسامد، تنها چیدمان چهارم (افزودن پنج پیزو) از نظر مصرف انرژی به صرفه بوده و انرژی آکوستیکی آن، ۲/۳ برابر شش حمام فراصوتی با چیدمان اول است. درسامدهای بالا به دلیل کوچکتر بودن طول موج، اضافه شدن پیزو، می‌تواند موجب خنثی شدن اثر پیزوهای سابق و کاهش رشد چگالی انرژی آکوستیکی گردد.

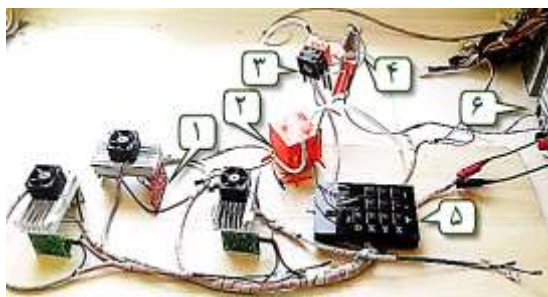
بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز (به‌طور تقریبی یکسان) است. با نمایش نموداری این اعداد (شکل ۱۰) می‌توان دریافت که بیشترین رشد مقادیر یکه چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌ها در بسامد ۲۰ کیلوهرتز و کمترین رشد در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز رخ داده است. به عنوان مثال، شش برابر کردن تعداد پیزوها و قرار دادن آن‌ها به صورت عمود بر هم، در بسامد ۲۰ کیلوهرتز (چیدمان چهارم نسبت به چیدمان اول) علاوه بر افزایش بسیار زیاد چگالی انرژی آکوستیکی (بیش از ۵۶۰ برابر)، از نظر میزان مصرف انرژی نیز به صرفه است و انرژی آکوستیکی آن، بیش از ۹۴ برابر شش حمام فراصوتی با چیدمان اول است. این امر می‌تواند به دلیل تشدید ناشی از



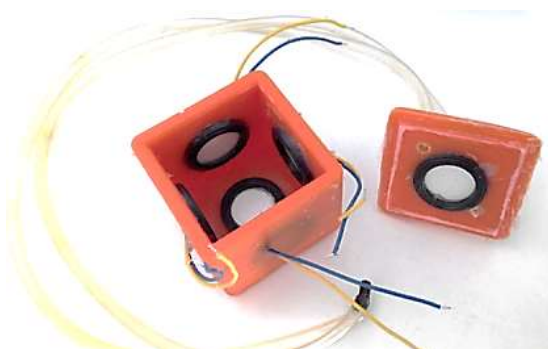
شکل ۸- توزیع فشار آکوستیکی در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز الف) چیدمان اول، ب) چیدمان دوم، پ) چیدمان سوم و ت) چیدمان چهارم

۳. موج‌دهی فراصوتی در حمام‌های فراصوتی با چیدمان‌های چهارگانه، در سه مرحله به مدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه.
۴. نمونه برداری از نانوامولسیون تهیه شده بعد از هر مرحله.
۵. سانتریفیوژ کردن هریک از نمونه‌ها با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۳۰ دقیقه.
۶. اندازه‌گیری میزان شفافیت نمونه‌های سانتریفیوژ شده با استفاده از کدورت سنج.

در این پژوهش، ارزیابی تجربی تاثیر چیدمان سرامیک‌های پیزو الکتریک در یک حمام فراصوتی با اندازه‌گیری کدورت نانوامولسیون‌های تهیه شده با هر چیدمان انجام شده است. میزان شفافیت یک نانوامولسیون، معیاری از تشکیل نانوامولسیون پایدار بوده و بیشتر بودن آن نشان‌دهنده پایداری بیشتر نانوامولسیون و عملکرد بهتر حمام فراصوتی است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در جدول ۷ و شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۰- تجهیزات آزمایش تجربی



شکل ۱۱- حمام فراصوتی مکعبی با قابلیت نصب شش سرامیک پیزوالکتریک



شکل ۹- نسبت مقادیر یکه چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌ها به چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان اول

با توجه به مطالب بیان شده مشخص گردید، افزودن تعداد پیزو، موجب بهبود کارایی حمام فراصوتی می‌شود. در بخش بعد به صحت‌سنجی تجربی این امر پرداخته می‌شود.

۶- نتایج تجربی

جهت راستی آزمایشی نتایج شبیه‌سازی، یک مجموعه حمام فراصوتی طراحی و ساخته شده است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این مجموعه شامل موارد زیر است:

۱. شش عدد درایور جهت کنترل ارتعاشات سرامیک‌های پیزوالکتریک.
۲. حمام فراصوتی با قابلیت نصب شش پیزو در شش وجه (شکل ۱۱).
۳. خنک کننده سیال
۴. پمپ جریان سیال
۵. صفحه کنترل
۶. منابع تغذیه

چهار آزمایش تجربی برای چهار چیدمان انجام شده که نحوه انجام هر آزمایش بدین شرح است:

۱. تهیه ۳۰۰ میلی‌لیتر آب و روغن زیتون تصفیه شده با غلظت ۵٪ (حاوی ۲۸۵ میلی‌لیتر آب و ۱۵ میلی‌لیتر روغن) و بدون هیچ‌گونه سورفکتانت.
۲. تهیه امولسیون اولیه با استفاده از همزن با سرعت ۱۳۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه.

زمانی ۳۰ دقیقه‌ای، میزان انرژی آکوستیکی بیشتری به نانوامولسیون اعمال شده و پایداری آن در مقادیر بزرگتری افزایش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر چهار چیدمان از سرامیک‌های پیزوالکتریک بر چگالی انرژی آکوستیکی در یک ریزمحفله فراصوتی مکعبی پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار المان محدود کامسول و در سه بسامد ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز انجام شده است. چیدمان اول شامل، یک پیزو در کف بوده و چیدمان‌های دوم تا چهارم به ترتیب دارای دو، چهار و شش پیزو هستند که موج‌دهی‌های یک بعدی تا سه بعدی را انجام می‌دهند. پس از استخراج چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌ها و یکه کردن آن‌ها، به بررسی تاثیر افزودن پیزوها پرداخته شده است. به این ترتیب، نشان داده شد که در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز، با اینکه برخی از چیدمان‌ها چگالی انرژی آکوستیکی بیشتری دارند، ولی از نظر مصرف انرژی به صرفه نمی‌باشند. به عنوان مثال، در این بسامد، چیدمان چهارم مناسب‌ترین چیدمان بوده، زیرا انرژی آکوستیکی آن، ۲/۳ برابر شش حمام فراصوتی با چیدمان اول است. اگرچه این رفتار در بسامدهای مختلف یکسان است، ولی شدت رشد چگالی انرژی آکوستیکی متفاوت است. نتایج نشان داد که به طور کلی، شدت انرژی آکوستیکی که معیاری از شدت کویتاسیوت صوتی است، با بسامد تحریک نسبت عکس دارد.

۷- علائم

c سرعت انتشار موج در سیال، m/s

dx اندازه مش‌بندی، m

n مولفه عمود بر سطح

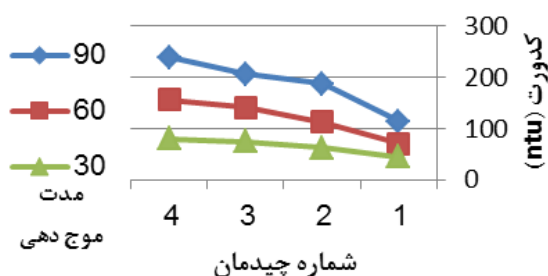
P فشار آکوستیکی، kg/ms^2

t زمان، s

U ولتاژ تحریک (نیروی الکترودینامیکی)، V

جدول ۷- کدورت نانوامولسیون‌های تهیه شده (ntu)

مدت موج‌دهی (دقیقه)	چیدمان			
	اول	دوم	سوم	چهارم
۳۰	۴۴	۶۲	۷۴	۷۹
۶۰	۷۰	۱۱۳	۱۴۱	۱۵۷
۹۰	۱۱۴	۱۸۷	۲۰۶	۲۳۹



شکل ۱۲- کدورت نانوامولسیون‌های تهیه شده در حمام‌های فراصوتی با چیدمان‌های مختلف و طی موج‌دهی با مدت‌های متفاوت (ntu)

همانطور که مشاهده می‌شود:

۱. میزان کدورت نانوامولسیون با افزایش تعداد پیزوها، افزایش یافته است و این نشان‌دهنده افزایش کارایی حمام فراصوتی تحت تاثیر افزایش شدت موج‌دهی است. به عبارت دیگر، هدف پژوهش تایید شده است که افزایش پایداری نانوامولسیون با بهره‌گیری از موج‌دهی فراصوتی است.
۲. بیشتر شدن مدت زمان موج‌دهی نیز، تاثیر مثبتی بر افزایش کدورت نانوامولسیون داشته است. این امر نشان می‌دهد که با موج‌دهی بیشتر، پایداری نانوامولسیون بیشتر می‌شود. مشابه بند قبل، هدف پژوهش در این بند نیز تایید می‌شود.
۳. تاثیر افزودن پیزو در موج‌دهی با مدت ۹۰ دقیقه بیشتر از موج‌دهی با مدت ۳۰ دقیقه است. این امر می‌تواند ناشی از اثرگذاری تجمعی انرژی آکوستیکی اعمال شده روی نانوامولسیون باشد. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد پیزو، در بازه‌های

- [10] Hirai Y, Koshino M, Matsumura Y, Atobe M (2015) Synthesis of spherical polymer nanoparticles reflecting size of monomer droplets formed by tandem acoustic emulsification. *Chem Lett* 44(11): 1584-1585.
- [11] Zhai, W., Liu, H. M., Hong, Z. Y., Xie, W. J., & Wei, B. (2017). A numerical simulation of acoustic field within liquids subject to three orthogonal ultrasounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 130–135.
- [12] Dähnke SW, Keil FJ (1999) Modeling of linear pressure fields in sonochemical reactors considering an inhomogeneous density distribution of cavitation bubbles. *Chem Eng Sci* 54(13-14): 2865-2872.
- [13] Yasui K, Kozuka T, Tuziuti T, Towata A, Iida Y, King J, Macey P (2007) FEM calculation of an acoustic field in a sonochemical reactor. *Ultrason Sonochem* 14(5): 605-614.
- [14] Sáez V, Frías-Ferrer A, Iniesta J, González-García J, Aldaz A, Riera E (2005) Characterization of a 20 kHz sonoreactor. Part I: Analysis of mechanical effects by classical and numerical methods. *Ultrason Sonochem* 12: 59065.
- [15] Shchukin DG, Gorin DA, Möhwald H (2006) Ultrasonically induced opening of polyelectrolyte microcontainers. *Langmuir* 22(17): 7400-7404.
- [16] Moheimani SOR, Fleming AJ (2006) *Piezoelectric Transducers for vibration control and damping*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- [17] COMSOL, COMSOL Multiphysics Modeling Guide.
- [18] Mason TJ (1997) Ultrasound in synthetic organic chemistry. *Chem Soc Rev* 26(6): 443.
- [19] Kwan JJ, Graham S, Myers R, Carlisle R, Stride E, Coussios CC (2015) Ultrasound-induced inertial cavitation from gas-stabilizing nanoparticles. *Phys Rev E* 92(2): 23019.
- [20] Harvey G, Gachagan A, Mutasa T (2014) Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods. *IEEE T Ultrason Ferr* 61(3): 481-495.
- [21] Apfel RE (1981) Acoustic cavitation prediction. *J Acoust Soc Am* 69(6): 1624.
- [22] Canselier JP, Delmas H, Wilhelm AM, Abismaïl B (2002) Ultrasound emulsification—An overview. *J DISPERS SCI TECHNOL* 23(April 2015): 333-349.
- [23] Harkin A, Nadim A, Kaper TJ (1999) On acoustic cavitation of slightly subcritical bubbles. *Phys Fluids* 11(2): 274-287.
- [24] Nakabayashi K, Amemiya F, Fuchigami T, Machida K, Takeda S, Tamamitsu K, Atobe M (2011) Highly clear and transparent nanoemulsion preparation under surfactant-free conditions using
- حجم سیال، m^3 V
- لزجت دینامیکی یا برشی، kg/m^1s^1 μ
- چگالی، kg/m^3 ρ
- بسامد تحریک، $1/s$ ω
- ضریب کشش سطحی، N/m^1 σ
- شاخص پلی تروپیک K

۸- مراجع

- [1] Bera A, Mandal A (2015) Microemulsions: A novel approach to enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 5(3): 255-268.
- [۲] طاهری م، فورگی نژاد ا، شیوا م، امام س م، حدادی ا (۲۰۱۶) ارزیابی تغییرات فرمول بندی لاستیک با اندازه گیری سرعت امواج فراصوتی. *مکانیک سازه ها و شماره ها* ۲۹۴-۲۵۸ (۲): ۶۳.
- [۳] افتخاری شهری س ا، احمدی بروغنی س ی، خلیلی خ (۲۰۱۵) طراحی سیستم هیدروفورمینگ لوله همراه با ارتعاشات آلتراسونیک قالب. *مکانیک سازه ها و شماره ها* ۱۴۸-۱۳۵ (۱): ۵.
- [4] Choi J, Kim T, Kim H, Kim W (2016) Ultrasonics Sonochemistry Ultrasonic washing of textiles. *Ultrason Sonochem* 29: 563-567.
- [5] Anton N, Vandamme TF, Cedex FI (2009) The universality of low-energy nano-emulsification. *Int J Pharmaceut* 377(1-2): 142-147.
- [6] Chang WT, Chen YC, Lin RC, Cheng CC, Kao KS, Huang YC (2011) Wind-power generators based on ZnO piezoelectric thin films on stainless steel substrates. *Curr Appl Phys* 11(1): S333-S338.
- [7] Cravotto G, Cintas P (2006) Power ultrasound in organic synthesis: moving cavitation chemistry from academia to innovative and large-scale applications. *Chem Soc Rev* 35(2): 180-196.
- [8] Kaci M, Meziani S, Arab-Tehrany E, Gillet G, Desjardins-lavisse I, Desobry S (2014) Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: Formation and stability of emulsifier free emulsion. *Ultrason Sonochem* 21(3): 1010-1017.
- [9] Kobayashi D, Hiwatashi R, Asakura Y, Matsumoto H, Shimada Y, Otake K, Shono A (2015) Effects of operational conditions on preparation of oil in water emulsion using ultrasound. *Physcs Proc* 70: 1043-1047.

- colloidal crystal films of various colors. *Ultrason Sonochem* 21(6): 1921-1927.
- [26] Bhangu SK, Gupta S, Ashokkumar M (2017) Ultrasonic enhancement of lipase-catalysed transesterification for biodiesel synthesis. *Ultrason Sonochem* 34: 305-309.
- [27] COMSOL, Acoustics Module Application Library, Piezoelectric Tonpilz Transducer.
- tandem acoustic emulsification. *Chem Commun* 47(20): 5765.
- [25] Hirai Y, Nakabayashi K, Kojima M, Atobe M (2014) Size-controlled spherical polymer nanoparticles: Synthesis with tandem acoustic emulsification followed by soap-free emulsion polymerization and one-step fabrication of