

بررسی اثر شعاع انحنای لبه یک ریزمحفظه فراصوتی پیزوالکتریکی جهت بهبود پایداری نانومولسیون

سید محمد محسن مدرس قیصری، رقیه گوگ‌ساز قوچانی، پدram صفر پور، مجید زندی*

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:

نانومولسیون
موج‌دهی فراصوتی
اثر لبه در ریزمحفظه
انتشار امواج آکوستیکی
نرم‌افزار کامسول

خلاصه: استفاده از امواج فراصوتی برای تهیه نانومولسیون‌ها از مهم‌ترین موضوع‌های پژوهشی مرتبط با صنایع داروسازی، غذایی، مهندسی مکانیک و شیمی است. تاکنون در این روش از محفظه با مقیاس‌های مختلفی استفاده شده که با توجه به کاربرد و دقت مورد نیاز، انتخاب می‌شود. تعداد و نحوه قرار گرفتن سرامیک‌های پیزوالکتریکی (پیزوها)، بسامد تحریک آن‌ها و میزان انحنا در لبه‌های محفظه، متغیرهای مختلفی در بهینه‌سازی طراحی یک حمام فراصوتی بوده که می‌توانند موجب تشدید یا خنثی شدن امواج با یکدیگر شوند. در این مقاله، طی ۳۶ حالت، با استفاده از نرم‌افزار کامسول، به بررسی تأثیر شعاع لبه در چهار چیدمان مختلف از پیزوهای یک ریزمحفظه فراصوتی مکعبی پرداخته شده است. شعاع لبه در سه مقدار صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر و تحریک پیزوها در بسامدهای ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان دادند حذف لبه‌ها، تأثیر مثبتی بر انتشار امواج و افزایش چگالی انرژی آکوستیکی داشته و در بسامدهای کمتر و در چیدمان‌های دارای تعداد پیزوی بیشتر، محسوس‌تر است. صحت‌سنجی‌های تجربی نیز با تهیه نانومولسیون در دو حالت حمام فراصوتی بدون شعاع لبه و با شعاع لبه انجام شد. نتایج آن، ضمن تأیید نتایج شبیه‌سازی، نشان داد که استفاده از حمام فراصوتی دارای شعاع لبه، موجب افزایش میزان پایداری فاز روغن در آب می‌شود.

۱- مقدمه

در این مقاله تحت عنوان پیزو نام برده شده‌اند، در بسامد مناسب ایجاد نمود [۲۳]. علاوه بر شکل و ابعاد محفظه، تعداد، چیدمان قرارگیری و همچنین بسامد تحریک پیزوها تأثیر به‌سزایی بر کارایی یک حمام فراصوتی دارند. این موارد با توجه به ابعاد حمام، سیال مورد استفاده و نوع کاربرد، انتخاب می‌شوند. تحقیق‌های متعددی در این زمینه و با بسامدهای ۲۰ کیلوهرتز تا ۴/۶ مگاهرتز [۲۴] صورت گرفته و نشان داده شده است که استفاده از بسامدهای بالا (محدوده مگاهرتز) می‌تواند موجب بهبود پایداری نانومولسیون گردد [۲۵ و ۲۶]. با این که افزایش مدت زمان موج‌دهی موجب کاهش اندازه نانوقطره‌های محلول می‌شود [۲۳] ولی دما را نیز افزایش می‌دهد که بایستی تحت کنترل قرار گیرد.

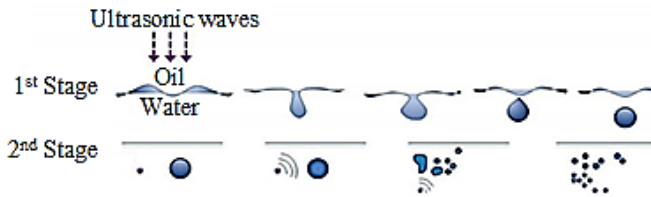
افزایش امکان وقوع کلویتاسیون صوتی که یکی از معیارهای کارایی حمام فراصوتی به‌شمار می‌آید، به سطح فشار موضعی و یکنواختی توزیع آن بستگی دارد. توزیع یکنواخت فشار آکوستیکی در یک حمام فراصوتی نیز رابطه مستقیمی با تعداد پیزوهای تعبیه شده در حمام فراصوتی دارد. از طرف دیگر، افزودن پیزو با چیدمان نامناسب می‌تواند تأثیر منفی بر موج‌دهی فراصوتی داشته باشد. به‌همین دلیل، یکنواختی توزیع فشار آکوستیکی یکی

بهره‌گیری از امواج فراصوتی در کاربردهای مهندسی، از اوایل قرن بیستم گزارش شده است [۱]. امروزه نیز موج‌دهی فراصوتی به یکی از پرکاربردترین روش‌ها در بخش‌های مختلف از جمله تشخیص فرسودگی [۲-۴]، انتقال حرارت [۵ و ۶]، ماشینکاری و شکل‌دهی فلزات [۷-۹]، رسوب زدایی و شستشو [۱۰-۱۳]، صنایع نفت و گاز [۱۴]، صنایع پزشکی و دارویی [۱۵ و ۱۶] و صنایع غذایی [۱۷] تبدیل شده است. فرایندهای ساخت مواد، هموژن‌سازی محلول‌ها و تولید امولسیون با فاز محلول در ابعاد نانو (نانومولسیون) یکی از کاربردهای مهم امواج فراصوتی است؛ که محققین متعددی علاوه بر روش‌های دیگر همچون روش‌های متالورژی [۱۸ و ۱۹] و شیمیایی [۲۰]، از آن استفاده کرده‌اند. دلایل اصلی استفاده از نانومولسیون‌ها را می‌توان در دو مورد ناچیز بودن جداشدگی و ته‌نشینی حین نگهداری نانومولسیون‌ها با توجه به اندازه بسیار ریز فاز محلول در آن‌ها و نیاز کمتر نانومولسیون‌ها به پایدارکننده‌ها خلاصه نمود [۲۱ و ۲۲].

امواج فراصوتی را می‌توان با تحریک سرامیک‌های پیزوالکتریکی، (که

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_zandi@sbu.ac.ir





شکل ۱: تهیه نانوامولسیون به روش موج‌دهی فراصوتی [۳۴]

Fig. 1. Preparing nanoemulsion with ultrasonic irradiation method [34]

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

مقادیر دینامیکی چگالی و سرعت انتشار موج در سیال نیز بر حسب تغییر بسامد (به ترتیب ρ_d و c_d)، با شرایط استاتیکی متفاوت بوده و از معادله‌های (۲) و (۳) قابل استخراج است [۳۰] که در آن‌ها ρ_0 و c_0 به ترتیب، چگالی و سرعت انتشار صوت در آب تحت شرایط استاتیکی و μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشند.

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

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

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، روش موج‌دهی فراصوتی به‌طور کلی کلی در دو مرحله انجام می‌شود [۲۳]:

با انتشار امواج و ایجاد ناپایداری بین سطحی، فاز محلول به‌صورت قطره‌های متوسط و بزرگ (حدود ۷۰ میکرومتر)، در فاز حلال پخش می‌شود که اندازه قطره‌ها تابعی از شدت امواج ارسالی و طول موج آن‌هاست. با ایجاد پدیده حفره‌زایی صوتی، ضربه‌های نقطه‌ای به قطره‌های فاز محلول باعث متلاشی شدن آن‌ها شده و اندازه‌شان تا ابعاد نانو کاهش می‌یابد.

حفره‌زایی صوتی با حفره‌زایی هیدرودینامیکی^۴، که پدیده‌ای نامطلوب در طراحی و به‌کارگیری راکتورها به‌حساب می‌آید [۳۶]، تفاوت دارد.

از مهم‌ترین معیارها در زمینه طراحی حمام‌های فراصوتی است که تا کنون بررسی‌های فراوانی در این زمینه انجام شده است [۳۰-۲۷]. بررسی و بهبود موج‌دهی فراصوتی در حمام با ابعاد چند ده میلی‌لیتر (ریزمحفظه‌های فراصوتی)، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی است که جهت تهیه نانوامولسیون در مقیاس آزمایشگاهی و ساخت و فرآوری مواد حساس به‌کار برده می‌شود [۳۱]. هدف از این تحقیق، بررسی اثر شعاع لبه بر توزیع فشار آکوستیکی و چگالی انرژی آکوستیکی در یک ریزمحفظه جهت افزایش پایداری نانوامولسیون، طی شبیه‌سازی چیدمان‌های مختلف پیرو در بسامدهای متفاوت و ارزیابی تجربی آن بوده که در پژوهش‌های مشابه، انجام نشده است. در این مقاله، پس از معرفی پیشینه تحقیق، در بخش دوم به بیان تئوری پژوهش پرداخته شده است. در راستای بهبود کارایی ریزمحفظه‌های فراصوتی مکعبی، بخش سوم با ابزار شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، ۳۶ حالت مختلف ریزمحفظه با شعاع لبه‌های صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر، در بسامدهای ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز و طی چهار چیدمان متفاوت پیرو (موج‌دهی یک بعدی تا سه بعدی) بررسی شده است. در بخش چهارم، بررسی توزیع فشار آکوستیکی مطلق حالت‌های ۳۶ گانه انجام شده؛ و بخش پنجم به استخراج مقادیر چگالی انرژی آکوستیکی، تحلیل نمودارهای آن و بررسی میزان تأثیر شعاع لبه در شرایط مختلف اختصاص یافته است. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری پژوهش آورده شده است.

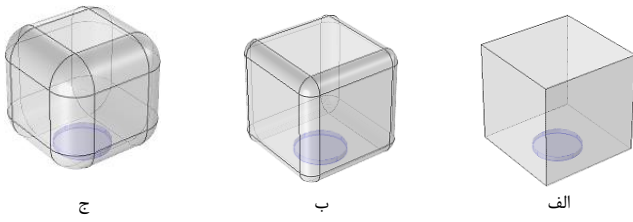
۲- تئوری

تحلیل انتشار امواج فراصوتی در این پژوهش، بر پایه استفاده از مدل ریاضی انتشار امواج در سیال و حفره‌زایی صوتی است. در این تحلیل از شبیه‌سازی ریزمحفظه فراصوتی به کمک نرم‌افزار المان محدود کامسول^۱ نسخه ۵/۲ و ماژول فشار آکوستیکی^۲ آن در حوزه بسامد^۳ استفاده شده است. با استفاده از نتایج به‌دست آمده، تحلیل تغییرهای فشار ناشی از انتشار امواج در بسامدهای مختلف انجام شده است.

از معادله (۱) می‌توان توزیع امواج آکوستیکی فراصوتی طولی و بدون پلاریزاسیون یا منابع دو قطبی را به‌دست آورد [۳۲ و ۳۳]، که در آن، ρ چگالی آب (kg/m^3)، c سرعت انتشار امواج فراصوت در آب (m/s)، $P = P_A \cos(\omega t)$ ، P_A بیشینه فشار آکوستیکی، ω بسامد تحریک و t زمان بر حسب ثانیه است.

1 COMSOL multiphysics
2 Pressure acoustic module
3 Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)

4 Hydrodynamic cavitation



شکل ۳: چیدمان اول با شعاع لبه‌های متفاوت (الف: صفر، ب: ۲/۵ و ج: ۵ میلی‌متر)

Fig. 3. First arrangement with different edge radii (a: 0, b: 2.5 and c: 5mm)

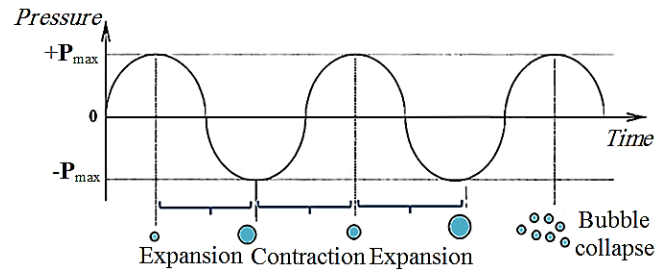
انتشار موج ضربه‌ای تا ۶ GPa در کسری از زمان (از مرتبه میکروثانیه) در موضع حفره‌زایی گزارش شده است [۴۱ و ۴۲]. کوچک‌تر بودن شعاع حباب موجب پایداری بیشتر آن و سخت‌تر شدن وقوع حفره‌زایی می‌شود. به بیان دیگر، تلاشی شدن حباب‌های کوچک‌تر، با افزایش آستانه فشار صوتی حفره‌زایی (P_c) همراه است که مقدار آن از معادله (۵) قابل استخراج است [۳۰].

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

در بخش بعدی با بیان مشخصه‌های حمام فراصوتی در نرم‌افزار کامسول و متغیرهای مورد مطالعه، به توضیح چگونگی استفاده از ماژول‌های شبیه‌سازی پیزوها و انتشار امواج در سیال پرداخته شده است.

۳- شبیه‌سازی

حمام فراصوتی شبیه‌سازی شده به شکل مکعب، با شعاع لبه صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر (شکل ۳) و با حجم ۸۰۰۰ میلی‌متر مکعب (طول ضلع ۲۰ میلی‌متر در حالت بدون شعاع لبه) طراحی شده است. این ریزمحفظة توسط شش دیواره از نوع سخت^۲ احاطه شده و سطح آزاد ندارد. با توجه به اینکه در این حالت، دیواره جذب انرژی نداشته و امواج را منعکس می‌کند، مؤلفه عمود بر سطح مشتق فشار صفر است و می‌توان شرط مرزی فشار سیال را با استفاده از معادله (۶) بیان نمود.



شکل ۲: حفره‌زایی صوتی ناشی از انتشار امواج [۳۵]

Fig. 2. Cavitation produced by irradiation of waves [35]

حفره‌زایی صوتی، نوسان‌های شعاعی حباب‌های گازی میکروسکوپی موجود در سیال است [۳۷] که ساز و کار اصلی در تلاشی شدن حباب‌ها حین نانومولسیون‌سازی به‌روش موج‌دهی فراصوتی به‌شمار می‌آید [۳۵ و ۳۸ و ۳۹]. حفره‌زایی صوتی با عبور امواج از سیال صورت گرفته و مطابق شکل ۲، مرتبط با نیم‌سیکل‌های فشاری مثبت و منفی امواج است. انبساط و انقباض حباب‌های میکروسکوپی به ترتیب در نیم سیکل‌های فشار منفی و نیم سیکل‌های فشار مثبت صورت می‌گیرد. با افزایش قدرت امواج صوتی، شدت انبساط و انقباض بیشتر شده، تا جایی که شعاع حباب (R) به آستانه حفره‌زایی صوتی^۱ برسد. مقدار این شعاع حدود ۲/۳ برابر شعاع حباب در حالت تعادل (R_0) بوده و تابعی از فشار هیدرواستاتیکی (P_0)، فشار بخار (P_V)، ضریب کشش سطحی (σ)، لزجت دینامیکی (μ) و شاخص پلی‌تروپیک (K) است. در این حالت، حباب به‌جای کاهش تدریجی حجم در نیم سیکل فشار مثبت، به‌طور ناگهانی متلاشی شده و حفره‌زایی صوتی رخ می‌دهد [۴۰]. معادله (۴) (رابطه ریلی-پلست) رفتار شعاع حباب قبل از متلاشی شدن را نشان می‌دهد [۳۱].

$$R\ddot{R} + \frac{3\dot{R}^2}{2} = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - P_V \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} + P_V - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - P_0 - P_d(t) \right] \quad (4)$$

در این معادله، \dot{R} و \ddot{R} به ترتیب مشتق زمانی اول و دوم شعاع لحظه‌ای حباب می‌باشند. به دلیل شدت زیاد، ابعاد کوچک و مدت کوتاه حفره‌زایی، احتمال وقوع پدیده‌های غیرمنتظره‌ای در محل رخداد آن وجود دارد. حفره‌زایی می‌تواند موجب افزایش سرعت فرآیند ساخت مواد گردد [۳۰]. در بعضی از پژوهش‌ها، افزایش دمای داخلی حباب تا ۳۰۰۰ K و

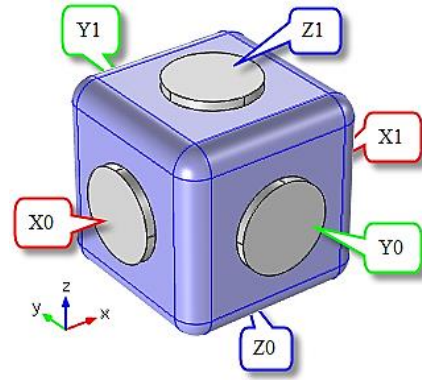
2 Sound hard boundary (wall)

1 Acoustic cavitation threshold

Table 1. Active PZTs in arrangements

جدول ۱: پیزوهای فعال در چیدمان‌ها

پیزوهای فعال		شماره چیدمان				
Y1	Y0	X1	X0	Z1	Z0	
○	○	○	○	○	●	اول
○	○	○	○	●	●	دوم
○	○	●	●	●	●	سوم
●	●	●	●	●	●	چهارم



شکل ۴: نام سرامیک‌های پیزوالکتریک

Fig. 4. Names of piezoelectric ceramics

انجام شده است. بدین ترتیب، پیزوهای هم محور با محور Xها به ترتیب X_1 و X_0 ، پیزوهای هم محور با محور Yها به ترتیب Y_1 و Y_0 و پیزوهای هم محور با محور Zها به ترتیب Z_1 و Z_0 نام گذاری شده‌اند. سیال حمام فراصوتی شبیه‌سازی شده، آب است که چگالی آن ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سرعت انتشار امواج در آن ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و لزجت دینامیکی آن برابر $10^{-3} \times 1/0.1$ پاسکال ثانیه است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر شعاع لبه بر میزان چگالی انرژی آکوستیکی، ۳۶ حالت شبیه‌سازی در نظر گرفته شده که طی آن‌ها، در سه بسامد مختلف (۲۰، ۳۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز)، از چهار چیدمان (جدول ۱) استفاده شده است. ارزیابی هر چیدمان نیز با سه شعاع لبه صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر انجام گرفته است. چیدمان اول شامل یک پیزو در کف است (شکل ۵-الف). این چیدمان که در آن موج‌دهی در یک بعد و با یک پیزو انجام می‌گیرد، می‌تواند به عنوان مبنای ارزیابی سایر چیدمان‌ها نیز محسوب شود. تعداد پیزوها در چیدمان‌های دوم تا چهارم، زوج بوده که در آن‌ها پیزوها به صورت روبروی هم قرار داده شده و به ترتیب دارای دو (شکل ۵-ب)، چهار (شکل ۵-پ) و شش (شکل ۵-ت) پیزو می‌باشند. از نظر بُعد موج‌دهی نیز در چیدمان‌های شماره یک و دو، فقط موج‌دهی در یک بعد تحلیل شده و در چیدمان‌های سوم و چهارم نیز به ترتیب، موج‌دهی در دو بعد (راستای محورهای X و Z) و سه بعد مورد

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

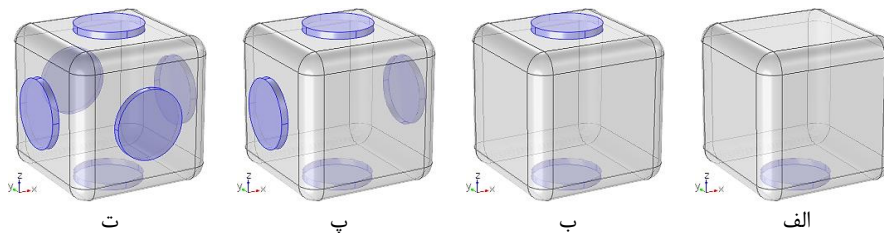
سرامیک‌های پیزوالکتریک در مرکز وجه‌های مکعب قرار داده شده‌اند که تحریک هر کدام مستقل از دیگری است. چیدمان‌های موج‌دهی فراصوتی بر اساس فعال بودن یا نبودن پیزوها تعریف شده‌اند. در تمامی شبیه‌سازی‌ها ولتاژ تحریک اولیه سرامیک‌های پیزوالکتریک (U_0)، ۳۰ ولت در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی آن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱- نیروی الکتروستاتیکی اعمالی در سطح تماس پیزو با سیال، برابر صفر است ($U_{in} = 0V$).

۲- نیروی الکتروستاتیکی اعمالی در سطح آزاد پیزو، برابر $U_{out} = U_0$ است.

۳- در سطح آزاد پیزو، سرعت ارتعاش سطح برابر صفر است (قید سطح ساکن) [۳۰].

مطابق شکل ۴، نام‌گذاری پیزوها با توجه به راستای قرارگیری آن‌ها



شکل ۵: چیدمان‌های چهارگانه (الف: اول، ب: دوم، پ: سوم و ت: چهارم)

Fig. 5. Four arrangements (a: first, b: second c: third and d: fourth)

Table 2. Material and dimensions of PZTs

جدول ۲: جنس و ابعاد پیزوها

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

مناسب‌ترین بسامد، پیزو/پیزوها با بیشترین کارایی و کمترین هدر رفت، انرژی ورودی را به امواج آکوستیکی تبدیل می‌کنند. بدین ترتیب در هر شبیه‌سازی ابتدا در بازه‌ای اطراف بسامد اصلی، شبیه‌سازی را انجام داده تا پس از استخراج چگالی انرژی آکوستیکی در آن بازه، بسامد مناسب و متناسب با بیشترین چگالی انرژی آکوستیکی مشخص شود (جدول ۳).

یکی از نکته‌های مهم در شبیه‌سازی انتشار امواج در سیال، اندازه‌گیری مش‌بندی است. محیط‌های دارای مش‌بندی بزرگ، توانایی شبیه‌سازی انتقال همه امواج را ندارند. بیش از حد کوچک بودن مش‌بندی نیز موجب افزایش شدید حجم محاسبات می‌شود. برای حل صحیح این موضوع، بایستی اندازه مش را متناسب با بیشترین بسامد امواج منتشر شده در محیط انتخاب نمود؛ به نحوی که در کوچکترین طول موج، حداقل ۵ المان (۶ گره) وجود داشته باشد [۵۱ و ۵۲]. با توجه به رابطه بین بسامد و طول موج، حداکثر اندازه مش را می‌توان مطابق معادله (۷) به‌دست آورد.

$$dx_{\max} = \frac{c}{\omega \times 5} \quad (7)$$

به طور نمونه، تعداد المان‌ها در حالت شعاع لبه ۵ میلی‌متر، بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز و برای ابعاد کاهش یافته (با استفاده از تقارن) چیدمان‌های اول تا چهارم به ترتیب برابر ۱۶۳۶۰، ۸۳۲۶، ۸۲۴۷ و ۲۶۹۷ عدد است.

۴- حل عددی

در این بخش به بیان نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار کامسول

ارزیابی قرار گرفته‌اند.

استفاده از تقارن می‌تواند موجب کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت شبیه‌سازی گردد. چیدمان شماره چهار (شکل ۵-ت)، متقارن‌ترین حالت است که در آن می‌توان طی پنج مرحله استفاده از تقارن، حجم محاسبات را حدود پنجاه برابر کاهش داد. به‌طور مشابه در چیدمان‌های اول تا سوم نیز می‌توان با استفاده از تقارن، حجم محاسبات را به ترتیب تا $\frac{1}{8}$ ، $\frac{1}{16}$ و $\frac{1}{16}$ کاهش داد.

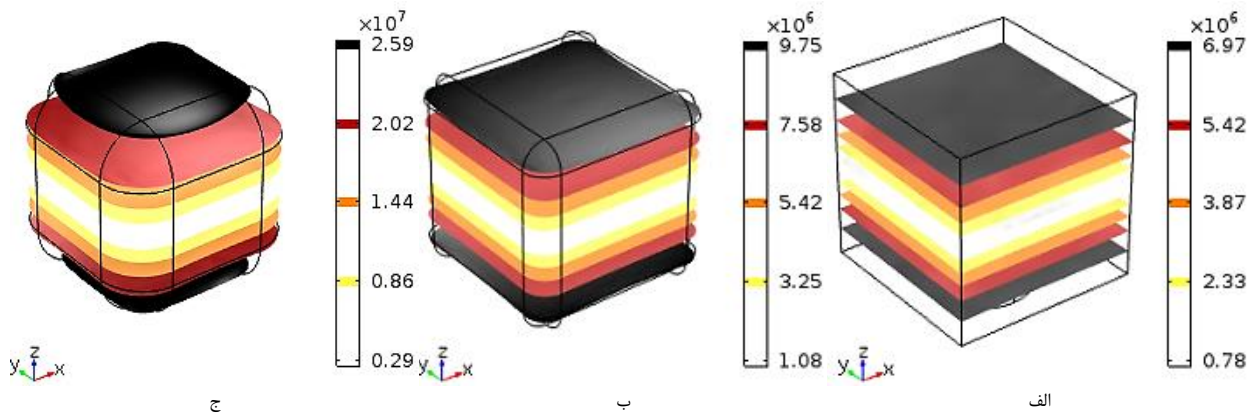
همان‌گونه که در مقدمه بیان شده، با مراجعه به بسامدهای مورد استفاده در تحقیق‌های ارائه شده توسط سایر محققان، جهت بررسی اثر شعاع لبه بر توزیع فشار آکوستیکی و چگالی انرژی آکوستیکی از بسامدهای ۲۰ کیلوهرتز [۲۴ و ۲۶ و ۴۷-۴۳]، ۲۰۰ کیلوهرتز [۲۵ و ۴۸ و ۴۹] و ۳۰۰ کیلوهرتز [۵۰]، استفاده شده است. جنس و ابعاد پیزوها در هر بسامد با توجه به نمونه‌های موجود تجاری یا شبیه‌سازی شده انتخاب شده‌اند که جزییات آن را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

با توجه به تفاوت کارایی یک پیزو در حالت‌های بدون بار و حین باردهی، بایستی مناسب‌ترین بسامد را در هر کدام از ۳۶ حالت به‌دست آورد. در این

Table 3. Best fitted frequencies related to the most values of acoustic energy densities of the 36-states (Hz)

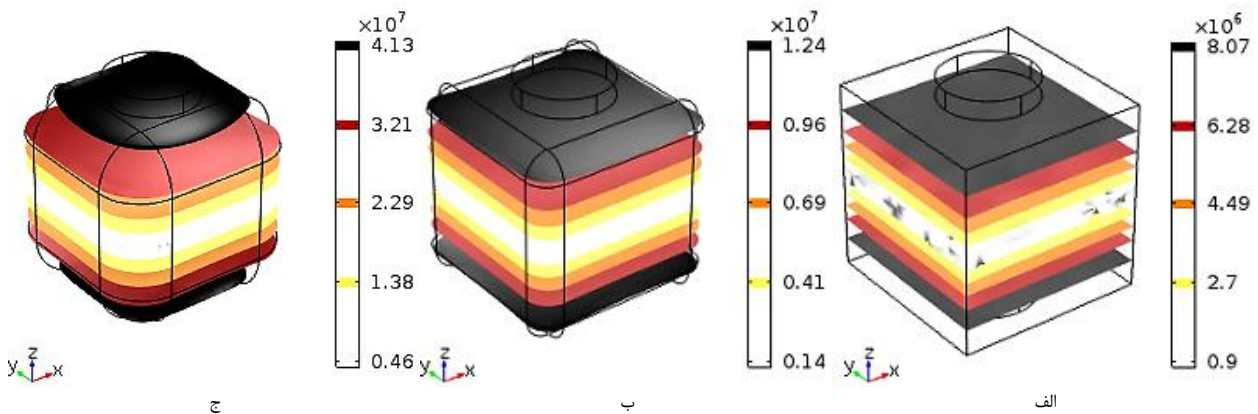
جدول ۳: بسامدهای متناسب با بیشترین چگالی انرژی آکوستیکی در حالت‌های ۳۶-گانه (هرتز)

شماره چیدمان	بسامد اصلی (Hz) شعاع لبه (mm)		
	اول	دوم	سوم
چهارم			
۳۶/۹۸۶	۳۷/۰۲۴	۳۷/۰۰۳	۳۶/۹۹۳
۳۷/۳۱۹	۳۷/۳۵۲	۳۷/۳۳۱	۳۷/۳۲۵
۳۸/۰۳۷	۳۸/۰۲۶	۳۸/۰۱۱	۳۸/۰۲۳
۱۸۱/۱۶۸	۱۸۱/۴۲۲	۱۸۱/۳۹۴	۱۸۱/۳۳۰
۱۹۰/۳۰۶	۱۸۳/۱۵۳	۱۹۰/۴۲۷	۱۹۰/۳۶۳
۱۷۹/۹۳۱	۱۸۰/۰۴۴	۱۸۰/۰۲۱	۲۰۵/۶۴۲
۳۰۵/۳۱۹	۳۰۵/۴۲۹	۳۰۵/۳۰۲	۳۱۴/۱۴۱
۳۲۲/۹۳۴	۳۰۲/۴۳۵	۳۱۲/۶۷۶	۲۸۳/۴۵۴
۳۰۴/۲۱۲	۳۲۱/۸۲۷	۲۸۸/۴۲۹	۲۸۸/۴۸۸



شکل ۶: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان اول در بسامد ۲۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 6. Absolute acoustic pressure distribution of first arrangement at 20 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۷: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان دوم در بسامد ۲۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 7. Absolute acoustic pressure distribution of second arrangement at 20 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)

مطابق شکل‌های ۶ تا ۹، در بسامد ۲۰ کیلوهرتز:

۱- امواج صوتی ساده و جدا از هم و با ساختار لایه‌ای هستند.

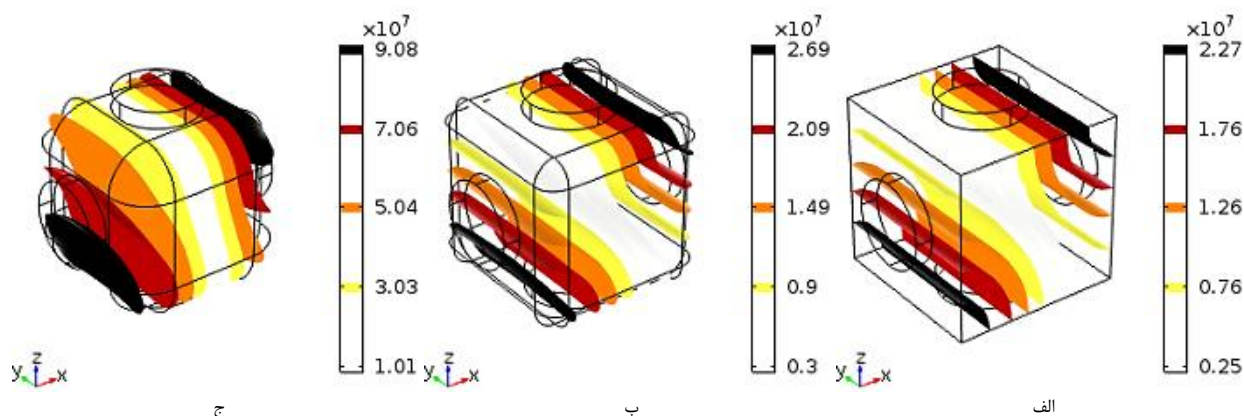
۲- کم‌ترین مقدار فشار آکوستیکی در مرکز مکعب بوده و محدوده آن با توجه به چیدمان، شکل گرفته است. به بیان دیگر، در چیدمان اول و دوم به صورت صفحه افقی، در چیدمان سوم به صورت رویه مایل با بردار نرمال در راستای قطر وجه فاقد پیرو، و در چیدمان چهارم، به صورت رویه مایل با بردار نرمال در راستای قطر مکعب مشاهده می‌شود.

۳- ساختار و شکل امواج صوتی در چیدمان‌های اول و دوم تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و به صورت لایه‌ای با صفحه‌های افقی می‌باشند. این رخداد به این دلیل است که در این شبیه‌سازی‌ها مقدار بسامد، به نسبت کم، و طول موج بلند بوده، و موج‌دهی در یک بعد انجام می‌شود.

در قالب توزیع فشار آکوستیکی و چگالی انرژی آکوستیکی پرداخته شده است.

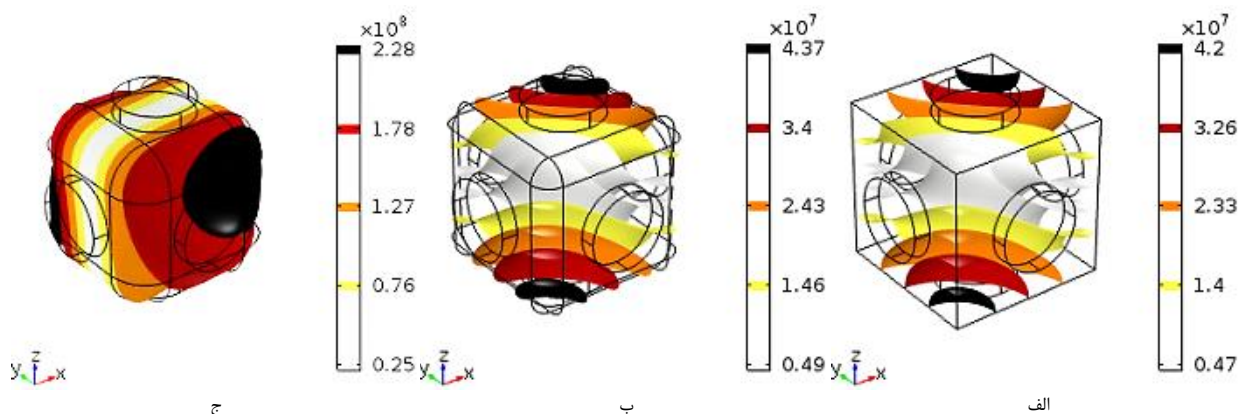
۴-۱- توزیع فشار آکوستیکی

شکل‌های توزیع فشار آکوستیکی، یکی از خروجی‌های مهم شبیه‌سازی انتشار امواج در یک حمام فراصوتی است. بررسی این شکل‌ها، مقدار و چگونگی تغییر فشار آکوستیکی را مشخص کرده و توانایی مقایسه کردن شدت احتمال وقوع حفره‌زایی در نقاط مختلف حمام فراصوتی در حالت‌های متفاوت را ممکن می‌سازد. شکل‌های ۶ تا ۱۷ توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان‌های اول تا چهارم، در بسامدهای تحریک مناسب و در سه حالت شعاع لبه را نشان می‌دهند.



شکل ۸: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان سوم در بسامد ۲۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 8. Absolute acoustic pressure distribution of third arrangement at 20 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۹: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان چهارم در بسامد ۲۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 9. Absolute acoustic pressure distribution of fourth arrangement at 20 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)

نیز افزایش یافته است.

۳- تنها در حالت چیدمان اول-شعاع لبه ۲/۵ میلی‌متر (شکل ۱۰-ب)، ساختار امواج به صورت لایه‌ای-کروی بوده و در بقیه حالت‌ها به صورت کروی است.

۴- با افزایش شعاع لبه به ۵ میلی‌متر، علاوه بر مقدار، یکنواختی توزیع فشار آکوستیکی نیز بیشتر شده است.

۵- حوالی نقطه مرکزی در تمامی حالت‌ها به غیر از حالت‌های چیدمان اول، حالت با شعاع لبه ۲/۵ میلی‌متر (شکل ۱۰-ب) و چیدمان سوم، حالت با شعاع لبه ۵ میلی‌متر (شکل ۱۲-پ)، دارای فشار مطلق بیشینه است.

۶- در تمامی حالت‌ها به غیر از حالت چیدمان اول-بدون شعاع لبه و حالت‌های با شعاع لبه ۵ میلی‌متر، نقاط کنج دارای فشار مطلق بیشینه هستند

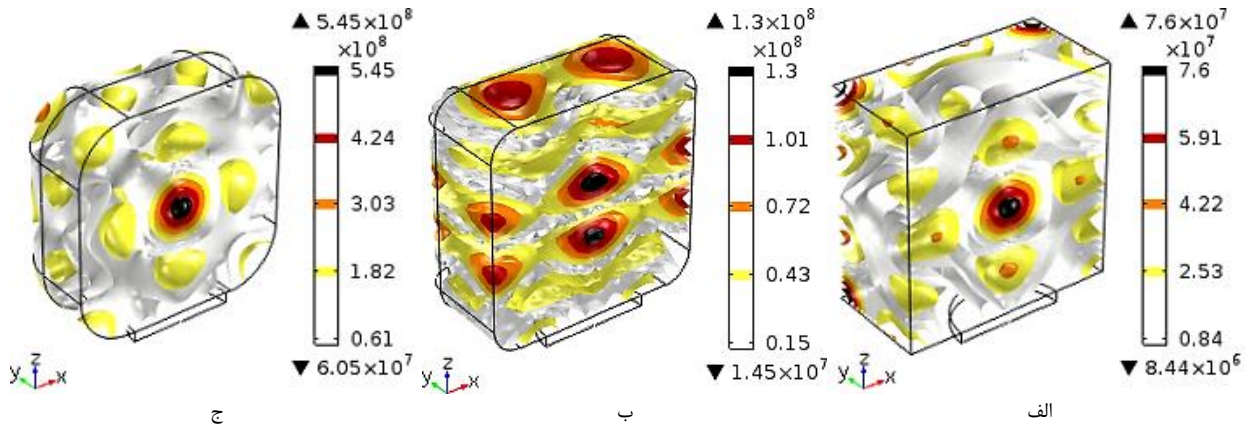
۴- در چیدمان‌های اول و دوم به دلیل موج‌دهی یک بعدی، بیشترین فشار آکوستیکی مطلق در نزدیکی صفحه‌های بالایی و پایینی رخ داده است.

۵- در چیدمان‌های سوم و چهارم به دلیل موج‌دهی دو بعدی و سه بعدی، بیشترین فشار آکوستیکی مطلق به ترتیب در نزدیکی لبه مشترک بین وجه‌های دارای پیزو و کنج مکعب قرار گرفته است.

توزیع فشار آکوستیکی مطلق و ساختار امواج صوتی در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز را می‌توان در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مشاهده نمود. مطابق این شکل‌ها:

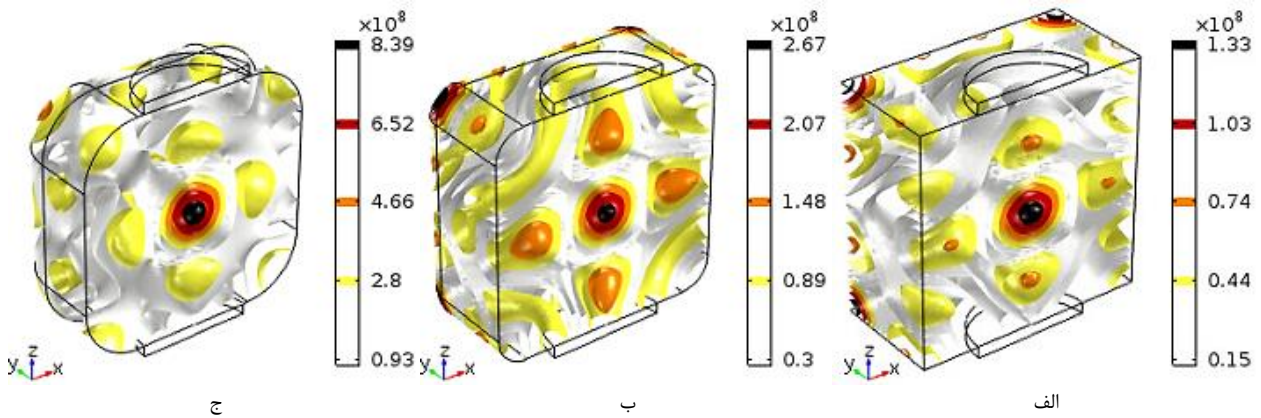
۱- نسبت به بسامد ۲۰ کیلوهرتز، لایه‌های امواج صوتی ظریف‌تر و ساختار آن‌ها پیچیده‌تر شده است.

۲- در هر چهار چیدمان، با افزایش شعاع لبه، بیشینه فشار آکوستیکی



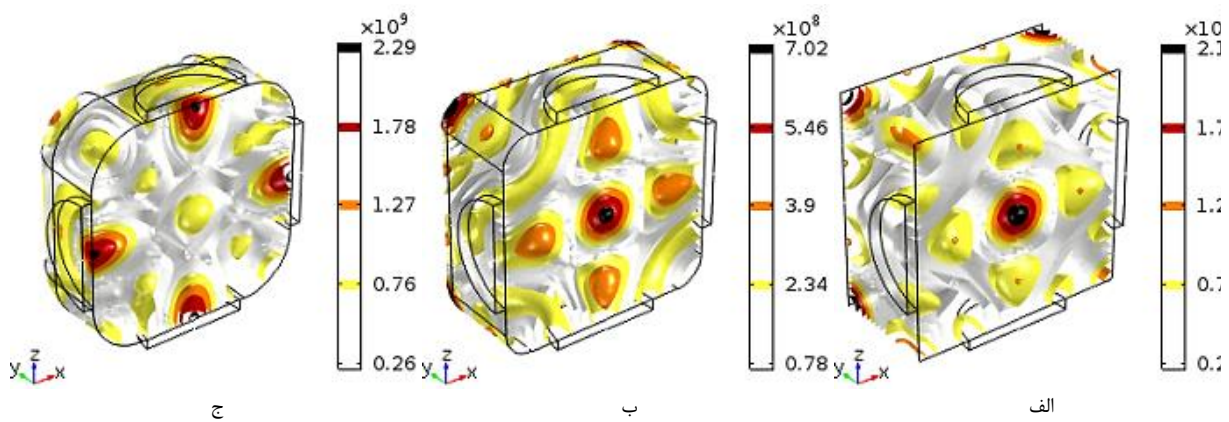
شکل ۱۰: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان اول در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 10. Absolute acoustic pressure distribution of first arrangement at 200 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



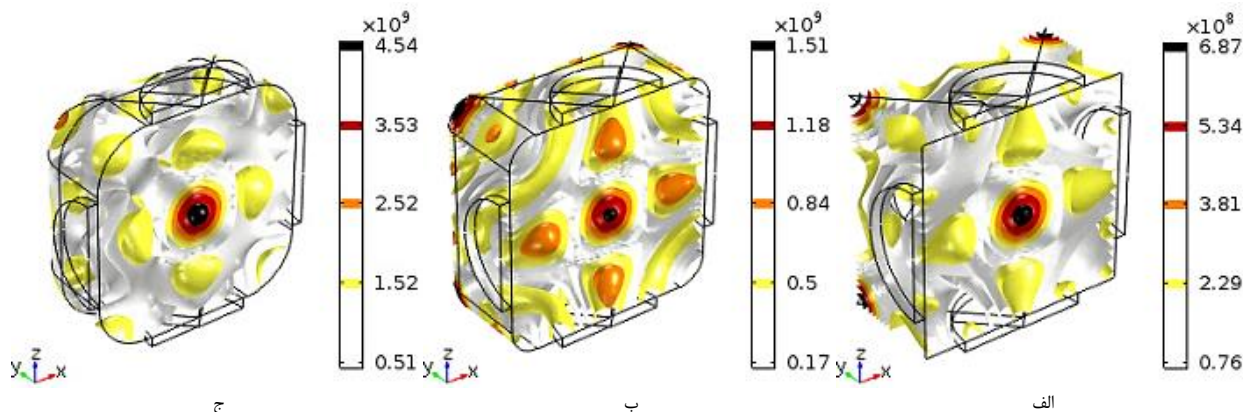
شکل ۱۱: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان دوم در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 11. Absolute acoustic pressure distribution of second arrangement at 200 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۱۲: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان سوم در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 12. Absolute acoustic pressure distribution of third arrangement at 200 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۱۳: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان چهارم در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 13. Absolute acoustic pressure distribution of fourth arrangement at 200 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)

شده است. جهت عدم اختلال نتایج، در تمامی شبیه‌سازی‌ها پیزوهای غیرفعال به‌طور کامل حذف شده‌اند. وجود پیزوهای غیر فعال در شبیه‌سازی موجب می‌شود در بسامدهایی خاص، ولتاژی معادل چند برابر ولتاژ تحریک اولیه (تا حدود ۱۵۰ ولت) در پیزوهای غیرفعال مشاهده شود. این ولتاژ که ناشی از خاصیت جذب انرژی در حالت تشدید پیزوها (معکوس حالت انتشار امواج) است، تشخیص مناسب‌ترین بسامد تحریک را با مشکل مواجه می‌کند. همچنین با توجه به ابعاد کوچک حمام فراصوتی، از تأثیر جاذبه زمین صرف‌نظر شده است.

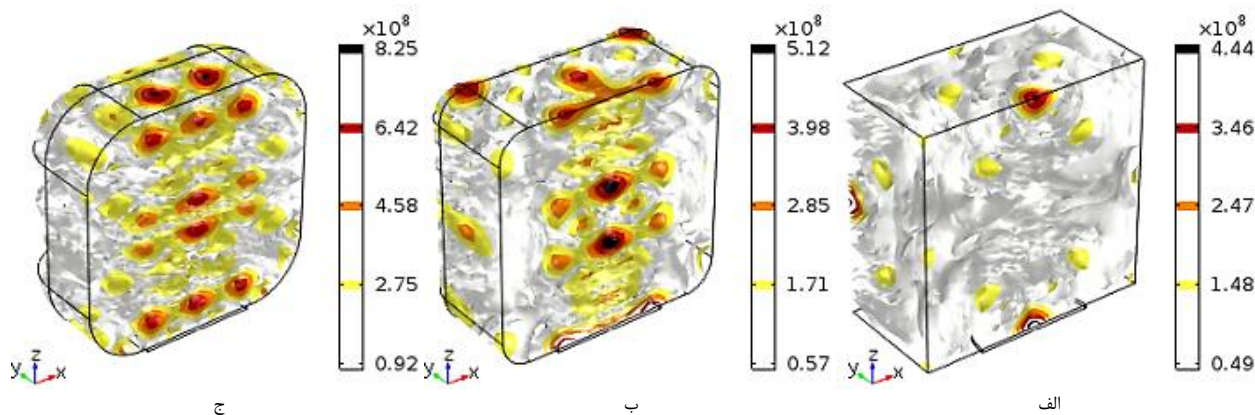
که نشان می‌دهد افزودن شعاع لبه ۵ میلی‌متر باعث شده تا تمرکز فشاری نقاط کنج در فضای ریزمحفظه پخش شود.

شکل‌های ۱۴ تا ۱۷، به توزیع فشار آکوستیکی مطلق در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز اختصاص دارد.

۱- به دلیل کوچکتر شدن طول موج، لایه‌های امواج صوتی در این بسامد نسبت به بسامد ۲۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز ظریف‌تر و دارای ساختار پیچیده‌تری شده‌اند.

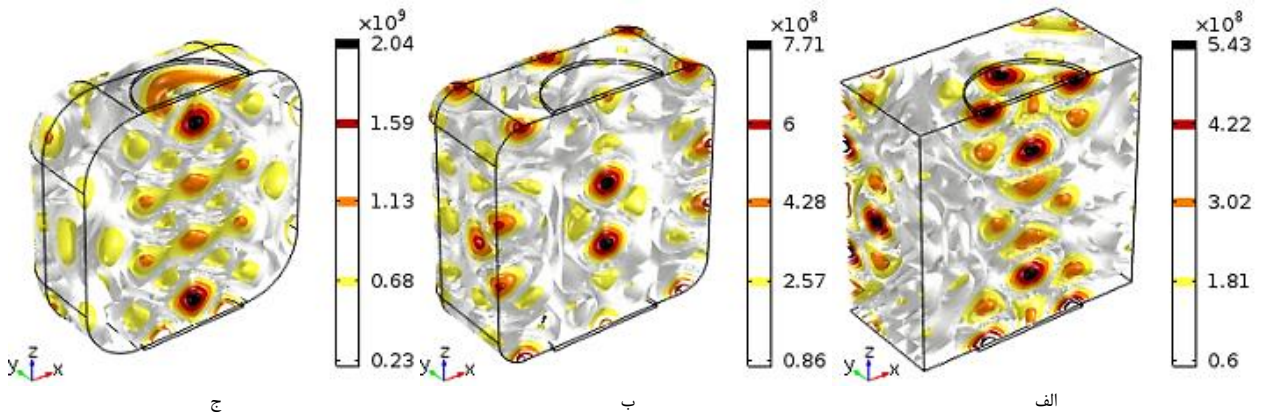
۲- فقط در چیدمان چهارم که موج‌دهی به‌صورت سه بعدی است، نقطه مرکزی دارای بیشترین فشار آکوستیکی مطلق است.

۳- افزایش شعاع لبه، موجب افزایش و یکنواختی توزیع فشار آکوستیکی



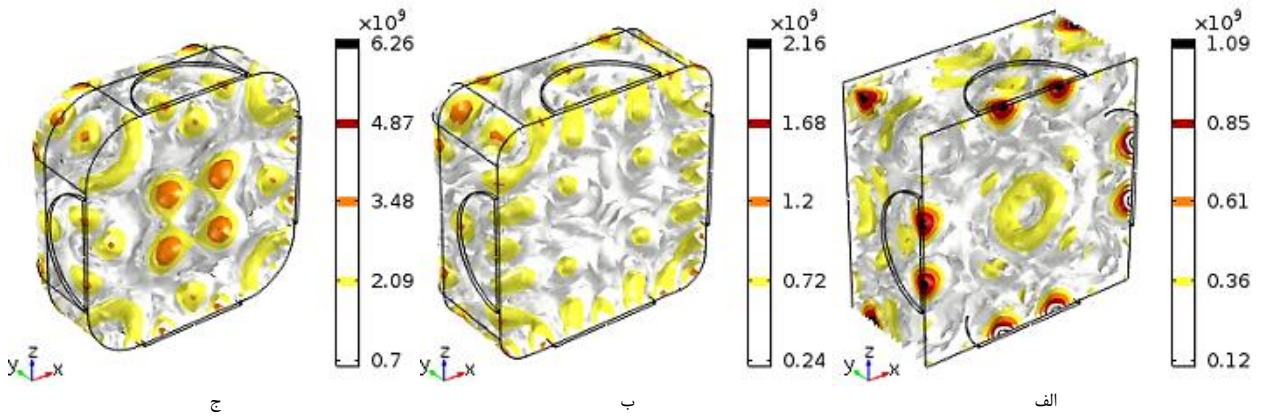
شکل ۱۴: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان اول در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 14. Absolute acoustic pressure distribution of first arrangement at 300 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



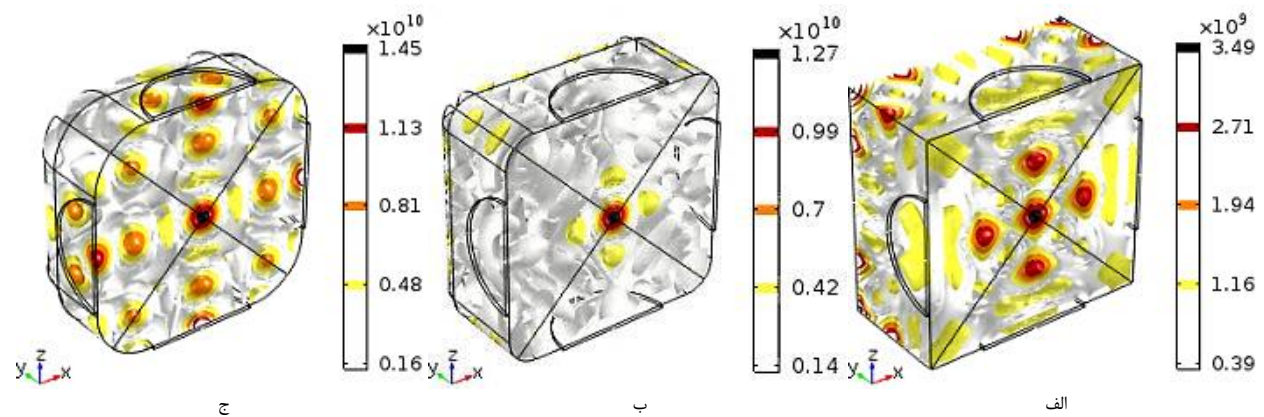
شکل ۱۵: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان دوم در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 15. Absolute acoustic pressure distribution of second arrangement at 300 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



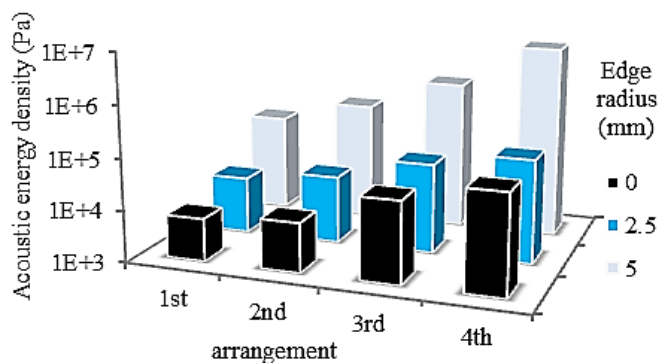
شکل ۱۶: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان سوم در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 16. Absolute acoustic pressure distribution of third arrangement at 300 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۱۷: توزیع فشار آکوستیکی مطلق چیدمان چهارم در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز با شعاع لبه الف: صفر، ب: ۲/۵ و پ: ۵ میلی‌متر (پاسکال)

Fig. 17. Absolute acoustic pressure distribution of fourth arrangement at 300 kHz with edge radii of a: zero, b: 2.5 and c: 5mm (Pa)



شکل ۱۸: چگالی انرژی آکوستیکی در بسامد ۲۰ کیلوهرتز (پاسکال)

Fig. 18. Acoustic energy density at 20 kHz (Pa)

همانطور که بیان شد، شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های مختلف و با شعاع‌های لیه متفاوت انجام شده است و افزایش شعاع لیه موجب کاهش حجم سیال (V_0) و افزایش چگالی انرژی آکوستیکی می‌شود. بدین ترتیب برای یکسان بودن حجم سیال (8000 mm^3) و قابل مقایسه بودن نتایج، ضلع مکعب در حالت‌های شعاع لیه ۲/۵ و ۵ میلی‌متر، اندکی افزوده شده است. مقادیر ابعاد حمام فراصوتی در حالت‌های با شعاع لیه را می‌توان در جدول ۴ مشاهده نمود. در جدول ۵ گزیده چگالی انرژی آکوستیکی حالت‌های ۳۶ گانه آورده شده است که نمودارهای آن به تفکیک بسامدهای ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز به ترتیب در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نمایش داده شده‌اند.

مطابق شکل ۱۸ و با بررسی اثر شعاع لیه بر چگالی انرژی آکوستیکی در چیدمان‌های چهار گانه در بسامد ۲۰ کیلوهرتز مشاهده می‌شود: افزوده شدن پیروزو (چیدمان با شماره بیشتر)، موجب بیشتر شدن چگالی

Table 4. Micro container cube length dimension in filleted edge states

جدول ۴: اندازه ضلع مکعب ریزمخفظه در حالت‌های با شعاع لیه

شعاع لیه (mm)	۲/۵	۰	۵
اندازه ضلع (mm)	۲۰/۲۶۵	۲۰/۰۰۰	۲۰/۹۵۵

۴-۲- چگالی انرژی آکوستیکی

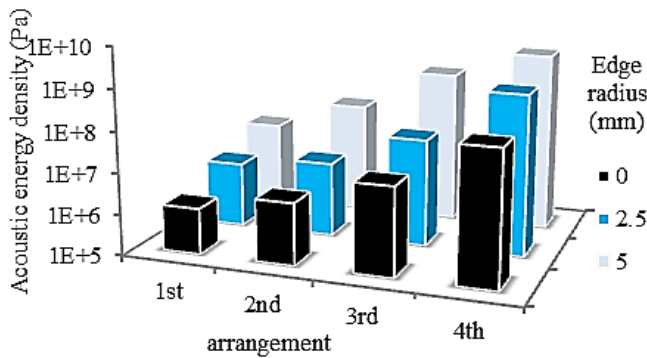
تعیین مناسب‌ترین طراحی برای یک حمام فراصوتی می‌تواند با مقایسه میانگین حجمی چگالی انرژی آکوستیکی (\bar{E}) حالت‌های مختلف صورت پذیرد. چگالی انرژی آکوستیکی از معادله (۸) قابل استخراج است که واحد آن، پاسکال (ژول بر متر مکعب) است. به بیان دیگر، چگالی انرژی آکوستیکی نمایانگر میزان انرژی آکوستیکی منتشر شده در یک متر مکعب است. همانطور که اشاره شد، نوسان‌های پیروزو منجر به نیم سیکل‌های فشاری و کششی در حمام فراصوتی می‌شود؛ به همین دلیل برای بررسی توزیع فشار آکوستیکی بایستی از قدر مطلق فشار استفاده نمود. مطابق معادله (۸)، چگالی انرژی آکوستیکی تابعی از توان دوم فشار است و می‌تواند معیار مناسبی برای مقایسه فشار آکوستیکی حالت‌های مختلف باشد. یکی دیگر از معیارهای ارزیابی کارایی یک حمام فراصوتی، رسیدن اندازه فشار به آستانه فشار حفره‌زایی، P_c ، است و چگالی انرژی آکوستیکی می‌تواند ملاک مناسبی در این زمینه باشد.

$$\bar{E} = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \frac{1}{2} \left(\frac{P^2}{\rho c^2} \right) dV \quad (8)$$

Table 5. Acoustic energy density of the 36-states (Pa)

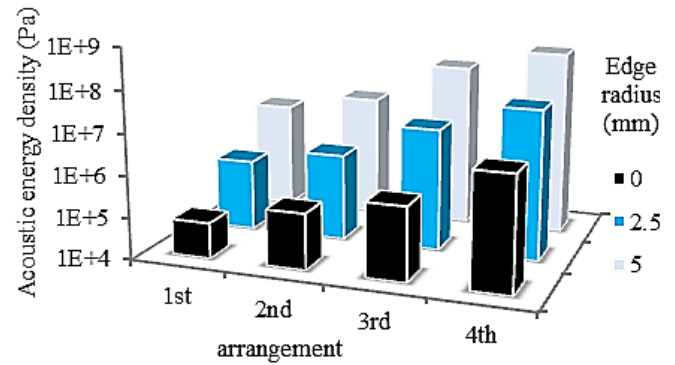
جدول ۵: چگالی انرژی آکوستیکی حالت‌های ۳۶-گانه (پاسکال)

شماره چیدمان	شعاع لیه (mm)	بسامد تحریک (kHz)	اول	دوم	سوم	چهارم
	۰		$6/74 \times 10^3$	$9/07 \times 10^3$	$3/81 \times 10^4$	$8/52 \times 10^4$
	۲/۵	۲۰	$1/26 \times 10^4$	$2/02 \times 10^4$	$5/45 \times 10^4$	$1/01 \times 10^5$
	۵		$7/90 \times 10^4$	$2/00 \times 10^5$	$7/72 \times 10^5$	$5/29 \times 10^6$
	۰		$7/14 \times 10^4$	$2/20 \times 10^5$	$5/86 \times 10^5$	$5/49 \times 10^6$
	۲/۵	۲۰۰	$5/13 \times 10^5$	$1/20 \times 10^6$	$8/29 \times 10^6$	$3/84 \times 10^7$
	۵		$3/76 \times 10^6$	$8/85 \times 10^6$	$8/40 \times 10^7$	$2/63 \times 10^8$
	۰		$1/31 \times 10^6$	$3/23 \times 10^6$	$1/43 \times 10^7$	$1/78 \times 10^8$
	۲/۵	۳۰۰	$3/82 \times 10^6$	$6/50 \times 10^6$	$4/12 \times 10^7$	$7/96 \times 10^8$
	۵		$1/05 \times 10^7$	$5/19 \times 10^7$	$5/20 \times 10^8$	$2/26 \times 10^9$



شکل ۲۰: چگالی انرژی آکوستیکی در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز (پاسکال)

Fig. 20. Acoustic energy density at 300 kHz (Pa)



شکل ۱۹: چگالی انرژی آکوستیکی در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز (پاسکال)

Fig. 19. Acoustic energy density at 200 kHz (Pa)

له موجب افزایش چگالی انرژی آکوستیکی می‌شود.

۲- نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی بر اثر افزایش شعاع لبه، در تمامی چیدمان‌ها به‌طور تقریبی یکسان است.

۳- نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی بر اثر افزایش شعاع لبه، در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز کمتر از بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز است.

در شکل ۲۰ چگالی انرژی آکوستیکی چیدمان‌های چهار گانه با شعاع‌های لبه متفاوت مربوط به بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز را می‌توان مشاهده نمود. با توجه به این شکل:

۱- همانند بسامدهای ۲۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز، افزایش تعداد پیزوها و نیز افزایش شعاع لبه موجب افزایش چگالی انرژی آکوستیکی می‌شود.

۲- همانند بسامدهای ۲۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز، نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی بر اثر افزایش شعاع لبه، در تمامی چیدمان‌ها به‌طور تقریبی یکسان است.

۳- نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی بر اثر افزایش شعاع لبه، در بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز کمتر از بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز است.

به بیان دیگر در سه بسامد مورد ارزیابی، افزایش شعاع لبه موجب افزایش چگالی انرژی آکوستیکی می‌شود. همچنین با توجه به تأثیر طول موج، مشاهده می‌شود که هرچه بسامد تحریک کمتر یا طول موج بلندتر باشد (۲۰ کیلوهرتز نسبت به ۲۰۰ کیلوهرتز و ۲۰۰ کیلوهرتز نسبت به ۳۰۰ کیلوهرتز)، افزایش شعاع لبه، تأثیر بیشتری بر افزایش چگالی انرژی آکوستیکی دارد، به نحوی که بیشترین رشد چگالی انرژی آکوستیکی مربوط به چیدمان چهارم در بسامد ۲۰ کیلوهرتز است.

انرژی آکوستیکی شده است.

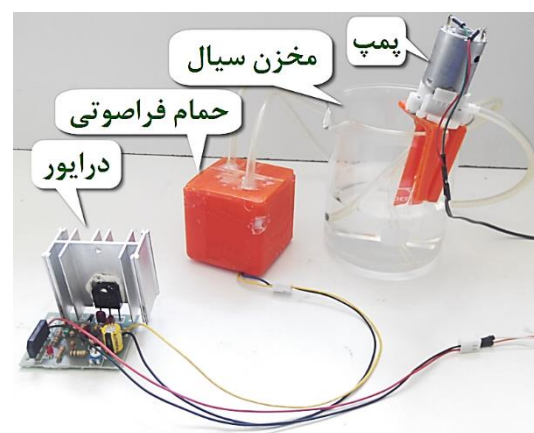
۱- افزایش شعاع لبه تأثیر مثبتی بر افزایش چگالی انرژی آکوستیکی در تمامی چیدمان‌ها داشته است.

۲- افزایش شعاع لبه، در چیدمان‌های دارای پیزوهای بیشتر، موثرتر است.

۳- تأثیر شعاع لبه ۵ میلی‌متر نسبت به ۲/۵ میلی‌متر، بسیار بیشتر از شعاع لبه ۲/۵ میلی‌متر نسبت به صفر میلی‌متر است.

شکل ۱۹ تأثیر شعاع لبه بر چگالی انرژی آکوستیکی در چیدمان‌های مختلف در بسامد ۲۰۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود:

۱- همانند بسامد ۲۰ کیلوهرتز، افزایش تعداد پیزوها و نیز افزایش شعاع



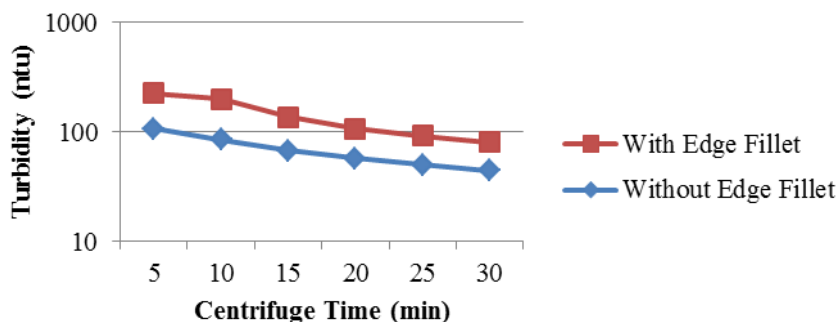
شکل ۲۱: تجهیزات آزمایش تجربی

Fig. 21. Experimental test bench

Table 6. Turbidity of prepared nanoemulsions in ultrasonic bath in two states (ntu)

جدول ۶: کدورت نانوامولسیون تهیه شده در حمام فراصوتی در دو حالت آزمایش (ntu)

حالت آزمایش	مدت سانتریفیوژ (دقیقه)					
	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵
با شعاع لبه	۸۰/۶۷	۹۲/۳۳	۱۰۶/۶۷	۱۳۶/۰۰	۲۰۱/۰۰	۲۲۵/۰۰
بدون شعاع لبه	۴۴/۳۵	۴۹/۷۳	۵۷/۳۳	۶۷/۶۷	۸۴/۶۷	۱۰۷/۶۷



شکل ۲۲: کدورت نانوامولسیون تهیه شده در حمام فراصوتی در دو حالت آزمایش (ntu)

Fig. 22. Turbidity of prepared nanoemulsions in ultrasonic bath in two states (ntu)

۵- صحت‌سنجی تجربی

جدا شده و فاز روغنی روی سطح آب پدیدار شود. اندازه‌گیری کدورت یکی از راه‌های بررسی میزان پایداری روغن در آب است و رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند. می‌توان با اندازه‌گیری کدورت در طی زمان، به میزان پایداری یک محلول پی برد. استفاده از سانتریفیوژ یکی از مناسب‌ترین راه‌های بررسی گذشت زمان به حساب می‌آید. بدین ترتیب در هر حالت از آزمایش پس از اتمام موج‌دهی، نمونه‌ای از نانوامولسیون برداشته شده و کدورت آن طی ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ با سرعت حدود ۴۴۰۰ دور بر دقیقه، اندازه‌گیری شده است تا میزان پایداری نانو قطره‌های روغن در آب در دو حالت مشخص شود. جدول ۶ و شکل ۲۲ نتایج حاصل از اندازه‌گیری کدورت نانوامولسیون طی ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ در دو حالت را بر حسب ntu نشان می‌دهند.

همانگونه که از شکل ۲۲ قابل مشاهده است، میزان کدورت نانوامولسیون‌های تهیه شده (که نشان‌دهنده میزان پایداری روغن در آب است) در حمام فراصوتی دارای شعاع لبه، به وضوح از نمونه‌های حاصل از حمام فراصوتی بدون شعاع لبه بیشتر است. بدین ترتیب نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تأیید کرده و نشان می‌دهد استفاده از شعاع لبه تأثیر مثبتی بر افزایش پایداری روغن در آب دارد.

جهت بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، به تهیه نانوامولسیون روغن در آب با غلظت ۵٪ در دو حالت حمام فراصوتی بدون شعاع لبه و با شعاع لبه، پرداخته شده است. شکل ۲۱ تجهیزات استفاده شده برای آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد که در آن، درایور سرامیک پیزو الکتریک و حمام فراصوتی مکعبی مشخص شده است. حمام فراصوتی پس از طراحی، به وسیله چاپگر سه بعدی ساخته شده است. جهت چرخش سیال در حمام و نیز سهولت نمونه‌برداری‌ها، یک بشر به عنوان مخزن سیال در نظر گرفته شده است که با قرار گرفتن یک پمپ، سیال از آن به درون حمام و بالعکس جریان پیدا می‌کند. راه‌اندازی درایور و پمپ بوسیله منبع تغذیه‌هایی جداگانه صورت گرفته است. حجم کل محلول ۳۰۰ میلی‌لیتر بوده و بدون هیچگونه پایدارکننده‌ای، در آن فقط از آب مقطر و روغن زیتون تصفیه شده استفاده شده است. در هر یک از دو حالت بدون شعاع لبه و با شعاع لبه، پیش تهیه نانوامولسیون طی ۱۰ دقیقه همزن با سرعت ۱۳۰۰ دور بر دقیقه انجام شده و موج‌دهی در حمام فراصوتی با یک پیزو در کف حمام فراصوتی به مدت ۳۰ دقیقه اعمال شده است.

آب و روغن دو سیال نامحلول بوده و گذشت زمان موجب می‌شود از هم

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر شعاع لبه‌های یک ریزمحفظه فراصوتی مکعبی طی چهار چیدمان از سرامیک‌های پیزوالکتریک بر توزیع فشار و چگالی انرژی آکوستیکی بررسی شده است. بدین منظور شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود کامسول در ۳۶ حالت، در سه بسامد ۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوهرتز، با شعاع لبه صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر و با چهار چیدمان انجام شده است. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و استخراج توزیع فشار و چگالی انرژی آکوستیکی، تأثیر افزایش شعاع لبه و چیدمان‌های مختلف در مناسب‌ترین بسامدها بررسی و تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزودن شعاع لبه، در تمامی چیدمان‌ها و بسامدهای تحریک، از سویی موجب افزایش چگالی انرژی آکوستیکی و از سویی دیگر، باعث یکنواخت شدن فشار آکوستیکی در ریزمحفظه می‌شود. نرخ افزایش چگالی انرژی آکوستیکی در اثر افزایش شعاع لبه، با بسامد تحریک پیروها رابطه عکس داشته و همچنین، بیشترین تأثیر شعاع لبه در بسامدهای کمتر و چیدمان‌های دارای پیروهای بیشتر رخ داده است. صحت‌سنجی‌های تجربی با تهیه نانومولسیون در حمام فراصوتی در دو حالت بدون شعاع لبه و با شعاع لبه انجام شده است. نتایج تجربی نیز نشان می‌دهند استفاده از حمام فراصوتی با شعاع لبه، قابلیت پایداری نانومولسیون را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۷- فهرست علائم

- منابع**
- [1] T.J. Mason, Sonochemistry and sonoprocessing: The link, the trends and (probably) the future, *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(4-5) (2003) 175-179.
- [2] S. Amini, Study the fatigue behavior of AISI 1045 steel using ultrasonic fatigue test machine, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2016), (in Persian).
- [3] M. Rafiei, K. Naderan tahan, Analysis of side ratio effect on propagation of ultrasonic guided waves in a bar with rectangular section, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(2) (2016) 187-196, (in Persian).
- [4] R. Goldaran, M.A. Lofollahi-Yaghin, M.H. Aminfar, A. Turer, Investigation of attenuation and acoustic wave propagation path caused by corrosion for reliability assessment of prestressed pipe monitoring using Acoustic Emission technique, *Modares Mechanical Engineering*, 17(2) (2017) 306-314, (in Persian).
- [5] B. Tajik, A.a. Abbasi, Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement by Acoustic Streaming in a Closed Cylindrical Enclosure, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 44(1) (2012) 11-20, (in Persian).
- [6] M. KamalGharibi, S.A. Zamzamian, F. Hormozi, Experimental Study of the Stability of Deionized Water Based Copper Oxide Nanofluid and Achievement to the Optimal Stability Conditions, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(1) (2016) 17-30, (in Persian).
- [7] A. alireza, S. Amini, G.A. Sheikhzadeh, Investigation of wear of rolling mill rolls in ultrasonic peening technology, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(3) (2017) 529-540, (in Persian).
- [8] A. Rezaei, S. Amini, Design and manufacturing of Ultrasonic transducer and tool set of vibrational

علائم انگلیسی	
c	سرعت انتشار موج در سیال، ms^{-1}
dx	اندازه مش‌بندی، m
n	مؤلفه عمود بر سطح
P	فشار آکوستیکی، $kgm^{-1}s^{-2}$
t	زمان، s
U	ولتاژ تحریک (نیروی الکتروپدینامیکی)، V
V	حجم سیال، m^3
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kgm^{-3}
μ	لزجت دینامیکی یا برشی، $kgm^{-1}s^{-1}$
σ	ضریب کشش سطحی، Nm^{-1}
κ	شاخص پلی‌تروپیک
ω	بسامد تحریک، s^{-1}
زیرنویس‌ها	
0	شرایط استاتیکی، حالت تعادل یا اولیه
c	حفره‌زایی
D	شرایط دینامیکی
in	سطح تماس پیرو با سیال
max	مقدار بیشینه

- carotid artery, *Modares Mechanical Engineering*, 17(7) (2017) 421-430, (in Persian).
- [17] N. Anton, T.F. Vandamme, F.I. Cedex, The universality of low-energy nano-emulsification, *International Journal of Pharmaceutics*, 377(1-2) (2009) 142-147.
- [18] T.V. Atamanenko, D.G. Eskin, L. Zhang, L. Katgerman, Criteria of grain refinement induced by ultrasonic melt treatment of aluminum alloys containing ZR and Ti, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 41(8) (2010) 2056-2066.
- [19] W. Zhai, Z.Y. Hong, X.L. Wen, D.L. Geng, B. Wei, Microstructural characteristics and mechanical properties of peritectic Cu-Sn alloy solidified within ultrasonic field, *Materials & Design*, 72 (2015) 43-50.
- [20] G. Cravotto, P. Cintas, Power ultrasound in organic synthesis: moving cavitation chemistry from academia to innovative and large-scale applications, *Chemical Society Reviews*, 35(2) (2006) 180-196.
- [21] K. Bouchemal, S. Brianon, E. Perrier, H. Fessi, Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: Solvent, oil and surfactant optimisation, *International Journal of Pharmaceutics*, 280(1-2) (2004) 241-251.
- [22] T. Tadros, P. Izquierdo, J. Esquena, C. Solans, Formation and stability of nano-emulsions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 108-109 (2004) 303-318.
- [23] M. Kaci, S. Meziani, E. Arab-Tehrany, G. Gillet, I. Desjardins-lavisse, S. Desobry, Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: Formation and stability of emulsifier free emulsion, *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3) (2014) 1010-1017.
- [24] D. Kobayashi, R. Hiwatashi, Y. Asakura, H. Matsumoto, Y. Shimada, K. Otake, A. Shono, Effects of operational friction stir welding, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(3) (2017) 601-618, (in Persian).
- [9] M.R. Razfar, M. Khajehzadeh, Experimental Investigation and Finite difference modeling of cutting tool temperature distribution during ultrasonically assisted turning, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(3) (2017) 657-670, (in Persian).
- [10] T.J. Mason, Ultrasonics Sonochemistry Ultrasonic cleaning: An historical perspective, *Ultrasonics Sonochemistry*, 29 (2016) 519-523.
- [11] B. Mohammad khani haji khaje-lou, P. Parghou, J. Babaei, B. Tofigh-nia, Textile ultrasonic cleaning mechanism (ultrasonic bath mechanism), 1st conference on modern advances in the energy sector, 1 (1394) 1-9, (in Persian).
- [12] K.A.E. Öner, I. Başer, Use of ultrasonic energy in reactive dyeing of cellulosic fabrics, *Coloration Technology*, 111(9) (1995) 279-281.
- [13] K.S.V. Mohammadi, A.A.A. Jeddi, H. Rahim Zadeh, The influence of intensity Acoustic in Dynamic ultrasonic Washing on the Dimensional properties cotton plain Knitted Fabric, 6th Iranian national conference on textile engineering, 1 (1386) 1-6, (in Persian).
- [14] A. Bera, A. Mandal, Microemulsions: a novel approach to enhanced oil recovery: a review, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 5 (2015) 255-268.
- [15] R. Aayani, A. Shahidian, M. Ghassemi, Parametric study of acoustic streaming in non-Newtonian bio-fluid, *Modares Mechanical Engineering*, 16(7) (2016) 335-342, (in Persian).
- [16] E.a. Soleimani, A finite element viscoelastic model based on consecutive transverse ultrasound images of

- 2015.
- [33] S.O.R. Moheimani, A.J. Fleming, *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, 2006.
- [34] D. Radziuk, M. Helmuth, H. Mhwal, Ultrasonically treated liquid interfaces for progress in cleaning and separation processes, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(1) (2016) 21-46.
- [35] J.P. Canselier, H. Delmas, A.M. Wilhelm, B. Abismal, Ultrasound Emulsification—An Overview, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 23(1-3) (2002) 333-349.
- [36] T.J. Mason, Ultrasound in synthetic organic chemistry, *Chemical Society Reviews*, 26(6) (1997) 443-451.
- [37] G. Harvey, A. Gachagan, T. Mutasa, Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61(3) (2014) 481-495.
- [38] J.J. Kwan, S. Graham, R. Myers, R. Carlisle, E. Stride, C.C. Coussios, Ultrasound-induced inertial cavitation from gas-stabilizing nanoparticles, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 92(2) (2015) 23019.
- [39] V.S. Moholkar, S. Rekveld, M.M.C.G. Warmoeskerken, Modeling of the acoustic pressure fields and the distribution of the cavitation phenomena in a dual frequency sonic processor, *Ultrasonics*, 38(1) (2000) 666-670.
- [40] R.E. Apfel, Acoustic cavitation prediction, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(6) (1981) 1624.
- [41] R. Pecha, B. Gompf, Microimplosions: Cavitation Collapse and Shock Wave Emission on a Nanosecond Time Scale, *Physical Review Letters*, 84(6) (2000) 1328-conditions on preparation of oil in water emulsion using ultrasound, 70(2011) (2015) 1043-1047.
- [25] Y. Hirai, M. Koshino, Y. Matsumura, M. Atobe, Synthesis of Spherical Polymer Nanoparticles Reflecting Size of Monomer Droplets Formed by Tandem Acoustic Emulsification, *Chemistry Letters*, 44(11) (2015) 1584-1585.
- [26] K. Nakabayashi, F. Amemiya, T. Fuchigami, K. Machida, S. Takeda, K. Tamamitsu, M. Atobe, Highly clear and transparent nanoemulsion preparation under surfactant-free conditions using tandem acoustic emulsification, *Chemical Communications*, 47(20) (2011) 5765-5767.
- [27] S.W. Dhnke, F.J. Keil, Modeling of linear pressure fields in sonochemical reactors considering an inhomogeneous density distribution of cavitation bubbles, *Chemical engineering science*, 54(13-14) (1999) 2865-2872.
- [28] V. Sez, A. Fras-Ferrer, J. Iniesta, J. Gonzalez-Garca, A. Aldaz, E. Riera, Characterization of a 20 kHz sonoreactor. Part I: Analysis of mechanical effects by classical and numerical methods, *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1-2 SPEC. ISS.) (2005) 59-65.
- [29] K. Yasui, T. Kozuka, T. Tuziuti, A. Towata, Y. Iida, J. King, P. Macey, FEM calculation of an acoustic field in a sonochemical reactor, *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5) (2007) 605-614.
- [30] W. Zhai, H.M. Liu, Z.Y. Hong, W.J. Xie, B. Wei, A numerical simulation of acoustic field within liquids subject to three orthogonal ultrasounds, *Ultrasonics Sonochemistry*, 34 (2017) 130-135.
- [31] D.G. Shchukin, D.A. Gorin, H. Mhwal, Ultrasonically induced opening of polyelectrolyte microcontainers, *Langmuir*, 22(17) (2006) 7400-7404.
- [32] COMSOL, COMSOL Multiphysics Modeling Guide,

- [47] K. Nakabayashi, H. Yanagi, M. Atobe, Preparation of W/O nanoemulsion using tandem acoustic emulsification and its novel utilization as a medium for phase-transfer catalytic reaction, *RSC Adv.*, 4(101) (2014) 57608-57610.
- [48] Y. Hirai, K. Nakabayashi, M. Kojima, M. Atobe, Size-controlled spherical polymer nanoparticles: Synthesis with tandem acoustic emulsification followed by soap-free emulsion polymerization and one-step fabrication of colloidal crystal films of various colors, *Langmuir*, 21(6) (2014) 1921-1927.
- [49] K. Kamogawa, G. Okudaira, M. Matsumoto, T. Sakai, H. Sakai, M. Abe, Preparation of Oleic Acid/Water Emulsions in Surfactant-Free Condition by Sequential Processing Using Midsonic-Megasonic Waves, *Langmuir*, 20(6) (2004) 2043-2047.
- [50] S.K. Bhangu, S. Gupta, M. Ashokkumar, Ultrasonic enhancement of lipase-catalysed transesterification for biodiesel synthesis, *Ultrasonics Sonochemistry*, 34 (2017) 305-309.
- [51] COMSOL, Acoustics Module Application Library, Absorptive Muffler, 2015.
- [52] COMSOL, Acoustics Module Application Library, Piezoelectric Tonpilz Transducer, 2015.
- [42] P.M. Kanthale, A. Brotchie, F. Grieser, M. Ashokkumar, Sonoluminescence quenching and cavitation bubble temperature measurements in an ionic liquid, *Ultrasonics sonochemistry*, 20(1) (2013) 47-51.
- [43] O. Kaltsa, C. Michon, S. Yanniotis, I. Mandala, Ultrasonic energy input influence on the production of sub-micron o/w emulsions containing whey protein and common stabilizers, *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(3) (2013) 881-891.
- [44] K. Nakabayashi, T. Fuchigami, M. Atobe, Tandem acoustic emulsion, an effective tool for the electrosynthesis of highly transparent and conductive polymer films, *Electrochimica Acta*, 110 (2013) 593-598.
- [45] K. Nakabayashi, T. Fuchigami, M. Atobe, Templated electrochemical synthesis of conducting polymer nanowires from corresponding monomer nanoemulsions prepared by tandem acoustic emulsification, *RSC Advances*, 4(44) (2014) 22938.
- [46] K. Nakabayashi, M. Kojima, S. Inagi, Y. Hirai, M. Atobe, Size-controlled synthesis of polymer nanoparticles with tandem acoustic emulsification followed by soap-free emulsion polymerization, *ACS Macro Letters*, 2(6) (2013) 482-484.

