

شبیه‌سازی CFD هیدرودینامیک یک راکتور صوتی جهت بالاترین شدت کاویتاسیون (کاواک‌زایی) صوتی

شهرام نیازی، سید حسن هاشم آبادی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پيام نگار: Hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی تولیدی در اثر متلاشی شدن میکرو حباب‌های کاواک‌زایی صوتی^۱، در فرایندهای شیمیایی از جمله ارتقای کیفیت نفت خام بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای دستیابی به بیشترین بازدهی باید اثر پارامترهای مختلف فیزیکی سیستم راکتور صوتی بر میزان میکرو حباب‌های کاواک‌زایی و متلاشی شدن آنها مشخص گردد. در این مطالعه با شبیه‌سازی CFD انتشار امواج فراصوت^۲ در توده سیال پیش‌بینی مناسبی از مکان‌های فعال برای ایجاد حباب کاواک‌زایی و تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر بازدهی سیستم راکتور صوتی و کاواک‌زایی صوتی ارائه شده است. برای مولد موج صوتی با قطر ۱۳ mm در عمق‌های مختلفی از سیال شبیه‌سازی‌ها تکرار و تأثیر عمق مولد صوت در سیال روی توزیع فشار در راکتور صوتی بررسی گردید. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان می‌دهد. لذا با استفاده از شبیه‌سازی CFD راکتورهای صوتی، شرایط بهینه سیستم برای بالاترین کاواک‌زایی صوتی و بیشترین انرژی تولیدی مشخص می‌گردد.

کلمات کلیدی: راکتورهای صوتی، شبیه‌سازی CFD، کاواک‌زایی صوتی، ارتقای کیفیت نفت خام

۱- مقدمه

استخراجی در سراسر جهان صورت گرفته است. به‌طور کلی این فرایندهای جدید را فرایندهای کراکینگ سرد^۳ می‌نامند که با توجه به فرایند و نوع منبع انرژی لازم برای شکست پیوندهای مولکولی به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- تغییرات شیمیایی به کمک موج صوتی^۴
- تابش
- فرایندهای زیست‌شناختی
- صافی‌های دو فلزی^۵
- پلاسمای سرد
- کاواک‌زایی

فرایندهایی که امروزه در جهان به منظور ارتقای کیفیت نفت خام انجام می‌گیرند شامل فرایندهای کراکینگ گرمایی، کراکینگ کاتالیزوری و روش‌های فیزیکی جداسازی (برای جداسازی مواد عمدتاً آسفالتنی نفت) هستند. کاهش کیفیت منابع نفتی استخراجی، قانون‌ها و محدودیت‌های زیست محیطی شدیدتر، تقاضای جهانی بیشتر برای محصولات نفتی سبک و پاک و هزینه‌های زیاد پالایش نفت خام با این روش‌ها، نیاز به فرایندهای جدید پُر بازده و ارزان را بیشتر و بیشتر می‌کند. از اینرو امروزه تلاش‌های گسترده‌ای برای طراحی فرایندهای جدید و استفاده از منابع انرژی مناسبتر و ارزان‌تر برای بهبود کیفیت نفت خام

3. Cold Cracking
4. Chemical Assisted Ultrasound
5. Intermetallic Filters

1. Acoustic Cavitation
2. Ultrasonic

اطرافش خواهد شد. مانند شستشو توسط امواج فراصوتی که آلودگی‌های روی سطوح را با جت‌های کاواک‌زایی و خوردگی حذف می‌کند. برای دستیابی به بیشترین بازدهی و بالاترین شدت کاواک‌زایی، باید اثر پارامترهای مختلف فیزیکی سیستم راکتور صوتی بر هیدرودینامیک راکتور صوتی و توزیع فشار در راکتور و در نهایت دینامیک میکرو حباب‌های کاواک‌زایی و متلاشی شدن آنها مشخص گردد. در این راستا در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی انتشار امواج صوتی در توده مایع و پیش‌بینی توزیع فشار در راکتور بمنظور اعمال بالاترین شدت کاواک‌زایی صوتی صورت گرفته است [۱۰-۳]. در این تحقیق برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی، نواحی فعال کاواک‌زایی (وجود حباب‌های ریز کاواک‌زایی) با نواحی دارای کمترین فشار (حاصل از شبیه‌سازی CFD) مقایسه شده است. در ادامه، مبانی امواج صوتی و اصول انتشار این امواج در توده مایع و چگونگی تغییرات فشار مایع بر اثر انتشار این امواج مورد بررسی قرار گرفته است.

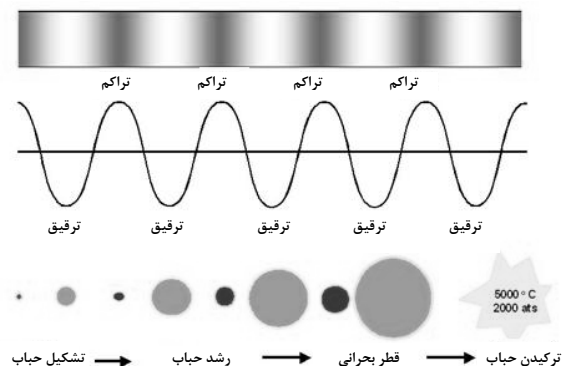
۲- مبانی امواج صوتی و معادله حاکم بر انتشار موج

امواج صوتی، امواج مکانیکی طولی (جابه‌جایی ذرات در امتداد پیشروی موج) هستند. این امواج می‌توانند در جامدات، مایعات و گازها منتشر شوند. ذرات مادی منتقل‌کننده این امواج، در راستای انتشار موج نوسان می‌کنند. امواج مکانیکی طولی در گستره وسیعی از بسامدها به وجود می‌آیند و در این میان بسامدهای امواج صوتی در محدوده‌ای قرار گرفته‌اند که می‌توانند گوش و مغز انسان را برای شنیدن تحریک کنند. این محدوده تقریباً ۲۰ Hz تا حدود ۲۰ kHz است و گستره شنیده شدن نامیده می‌شود. امواج مکانیکی طولی را که بسامدشان زیر گستره شنیده شدن باشد امواج فرو صوتی، و آنهایی که فرکانس آنها بالای این گستره باشد، امواج فراصوتی گویند.

برای به دست آوردن توزیع فشار ایجاد شده در توده سیال در اثر انتشار موج صوتی، باید معادله موج صوتی حل شود. در فیزیک حل معادله موج صوتی پیشروی موج را در سیال مشخص می‌کند. معادله موج صوتی به صورت معادله دیفرانسیل جزئی درجه دوم است. این معادله تابعیت فشار صوتی^۱ را با مکان و زمان توصیف می‌کند. در

یکی از روش‌های بسیار مؤثر و کارآمد در ارتقای کیفیت نفت خام سنگین استفاده از انرژی تولیدی توسط پدیده کاواک‌زایی صوتی برای شکستن پیوندهای مختلف بین مولکول‌های موجود در نفت خام می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان تأثیرات کاواک‌زایی صوتی را توسط رشد، نوسان و انفجار میکرو حباب‌ها در محیط مورد نظر خلاصه کرد. در این نوع کاواک‌زایی، تغییرات فشار در مایع بر اثر انتشار امواج صوتی معمولاً فرا صوت (۱۶ kHz - ۱۰۰ MHz) به وجود می‌آیند.



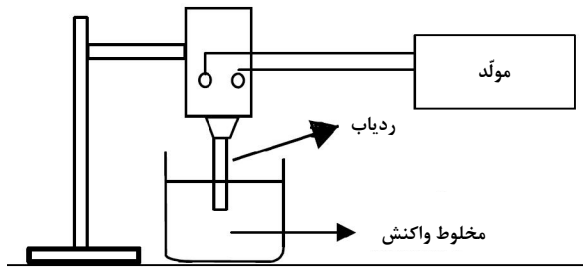
شکل ۱- انبساط، تراکم و متلاشی شدن حباب در اثر چرخه‌های فشاری موج صوتی [۲]

امواج صوتی با فرکانس‌های بالای فراصوتی به وسیله مبدل پیزوالکتریک تولید صدا ایجاد می‌شوند. این امواج، دامنه و فرکانس بالا و میدان فشاری متناوب ایجاد می‌کنند و در نتیجه قسمتی از مایع در معرض چرخه‌های فشار بالا و پایین قرار می‌گیرد که اگر دامنه شان به اندازه کافی بزرگ باشد ممکن است به کاواک‌زایی و انفجار حباب‌ها بینجامد.

شکل (۱) مراحل انبساط و تراکم حباب و در نهایت انفجار آن را در اثر سیکل‌های فشاری موج صوتی نشان می‌دهد. یک حباب می‌تواند در نیم چرخه‌های ایجاد شده توسط میدان صوتی رشد کند. از طریق نفوذ یک طرفه، بخار و گاز به درون حباب منتقل می‌شود تا اندازه حباب به مقدار بحرانی اش برسد و حباب متلاشی شود. محتویات درون حباب به دلیل شرایط شدید محلی به سرعت فشرده می‌شوند. در محل انفجار، دما به بیشتر از ۵۰۰۰ °C و فشار به چند صد اتمسفر می‌رسد و منجر به تأثیرات فیزیکی و شیمیایی در سیال

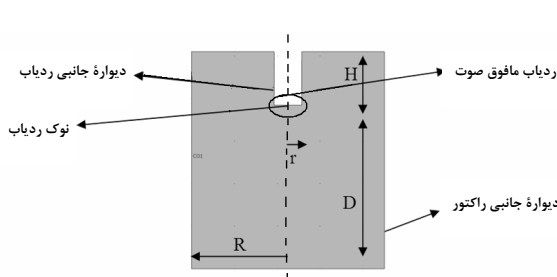
1. Acoustic Pressure

یک پروب (ردیاب) مافوق صوت^۳ به منظور تولید موج صوتی با فرکانس و توان مشخص در عمق مشخصی از آب قرار می‌گیرد. شکل (۲) راکتور صوتی^۴ مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سیستم راکتور صوتی

با تنظیم کردن توان و فرکانس مولد موج صوتی، امواج در راکتور پیشروی کرده و چرخه‌های تراکم و ترقیق را در سیال به وجود می‌آورند. همانطور که قبلاً اشاره شد توزیع فشار صوتی ایجاد شده در سیال با حل معادله موج (معادله (۴)) و استفاده از شرایط مرزی مناسب مشخص خواهد شد.



شکل ۳- دامنه محاسباتی ایجاد شده در نرم افزار

به همین منظور دامنه محاسباتی متناسب با راکتور صوتی مورد نظر ایجاد شده است. شکل (۳) دامنه محاسباتی ایجاد شده را نشان می‌دهد.

چگالی آب (kg/m³) ۱۰۰۰ و سرعت صوت در آب، (m/s) ۱۵۰۰ قرار داده شده است. گام بعدی انتخاب شرایط مرزی مناسب با فیزیک سیستم مورد نظر است. بدین منظور تمامی دیواره‌های راکتور را منعکس کننده کامل^۵ موج صوتی (یعنی شرط مرزی (p = 0)، دیواره‌های جانبی ردیاب با شرط (∂p/∂n) = 0 و نوک آن به صورت

مختصات سه بعدی معادله موج به شکل زیر تعریف می‌شود [۳-۱۰]:

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

با فرض ثابت بودن چگالی:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

با در نظر گرفتن تابعیت فشار صوتی با زمان به صورت هارمونیک داریم:

$$P(r,t) = p(r)e^{i\omega t} \quad (3)$$

در نتیجه تابعیت فشار صوتی ایجاد شده با مکان، با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} p = 0 \quad (4)$$

معادله (۴) به معادله هلمهولتز^۱ مشهور است. با حل این معادله همگن، توزیع فشار در دامنه محاسباتی مورد نظر به دست می‌آید. برای حل معادله هلمهولتز از روش عددی المان محدود و نرم افزار FEMLAB 2.3 استفاده شده است.

در حل این معادله دقت روش عددی به طور قابل ملاحظه‌ای وابسته به عدد موج (k=ω/c) می‌باشد. در عددهای موج بزرگ، حل، نوسانی خواهد بود، بنابراین باید اندازه گام منفصل سازی^۲ (h) به اندازه کافی ریز انتخاب گردد به طوری که حاصلضرب عدد موج (k) و فاصله مکانی گره‌های محاسباتی (h) برابر مقدار ثابتی باشد. به این ترتیب برای اعداد موج بالاتر، مش بندی را به اندازه کافی ریز می‌کنیم [۳-۷].

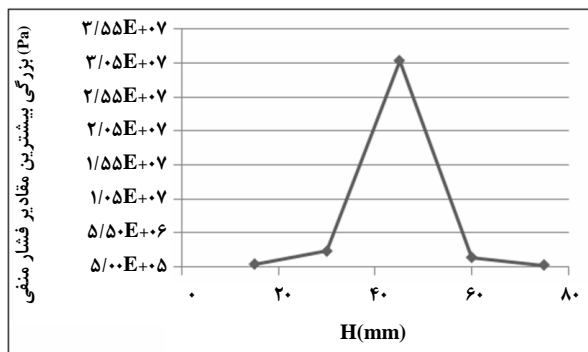
۳- شبیه سازی CFD یک راکتور صوتی

سیستم مورد بررسی، یک راکتور استوانه‌ای ناپیوسته پر از آب است.

1. Helmholtz Equation
2. Discretisation Step Size

3. Ultrasonic Probe
4. Sono-reactor
5. Sound Soft Boundary
6. Tip

می‌گردد. به همین منظور برای به‌دست آوردن نسبت بهینه ابعاد راکتور شبیه‌سازی‌هایی به ترتیب زیر انجام شد. راکتوری به ارتفاع ۸۵mm و قطر ۸۰mm با مولد موج صوتی به توان ۵۰ وات و فرکانسی برابر با ۲۰kHz در نظر گرفته شد. یکی از پارامترهای مهم در توزیع فشار و شدت فراصوت در راکتور میزان فرو رفتگی ردیاب در سیال یا مقدار H است. برای ردیابی با قطر ۱۳mm در مقادیر مختلف H شبیه‌سازی‌ها تکرار و تأثیر عمق ردیاب در سیال بر روی توزیع فشار در راکتور بررسی گردید. در شکل (۴) تغییرات مقادیر بزرگی فشار منفی ایجاد شده در راکتور نسبت به عمق ردیاب در توده آب نشان داده شده است.



شکل ۴- بزرگترین مقدار فشار منفی در راکتور با توان ۵۰ W فرکانس ۲۰ kHz در عمق‌های مختلف ردیاب

با توجه به نتایج شبیه‌سازی و مقایسه شدت‌های فراصوت ایجاد شده در عمق‌های مختلف ردیاب در سیال (شکل (۴))، در می‌یابیم که با قرار دادن ردیاب در عمق ۴۵mm سیال، بیشترین مقدار شدت فراصوت را در بیشترین حجم راکتور خواهیم داشت. شکل (۵) توزیع فشار صوتی در راکتور با ابعاد هندسی بهینه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در مکان‌هایی که فشار منفی است، بیشترین امکان وقوع کاواک‌زایی و تشکیل حباب‌های ریز وجود دارد. هر چه این نواحی بزرگتر و فشار کمتر باشد، کاواک‌زایی و تشکیل حباب شدت بیشتری خواهد داشت و در نتیجه متلاشی شدن این حباب‌ها شدیدتر بوده و بازدهی راکتور صوتی بالاتر می‌رود. با استفاده از این توزیع فشار و با توجه به معادله (۶) می‌توان توزیع شدت فراصوت ایجاد شده در راکتور را به‌دست آورد. شکل (۶) توزیع شدت فراصوت در راکتور در توان ۵۰ W، فرکانس ۲۰ kHz و $H=45\text{mm}$ را نشان می‌دهد.

شرط فشار ثابت ($p = p_0$) در نظر گرفته شده است. فشار p_0 فشاری است که مولد موج صوتی با توجه به مقدار توانش در نوک ردیاب ایجاد می‌کند و از طریق سطح نوک ردیاب این فشار صوتی در توده سیال اعمال می‌شود. رابطه بین p_0 و توان مولد موج به‌صورت زیر است:

$$I_{US} = (P_{US}/A) = (p_0^2/2\rho c) \quad (5)$$

که در آن A مساحت نوک پروب، P_{US} توان موج فراصوت، ρ چگالی سیال و C سرعت صوت در سیال است. I_{US} شدت فراصوت^۱ نام دارد و واحد آن، وات بر متر مربع می‌باشد. با استفاده از معادله (۵) می‌توان با توجه به توان مولد (P_{US}) مقدار فشار صوتی p_0 را در شرط مرزی نوک ردیاب محاسبه و تنظیم کرد.

گام بعدی در مدل‌سازی راکتور صوتی مش بندی دامنه محاسباتی است (به گونه‌ای که حاصلضرب عدد موج k، در فاصله گره‌های محاسباتی h، مقدار ثابتی باشد). پس از مش بندی مناسب، معادلات با در نظر گرفتن تابعیت هارمونیک فشار صوتی با زمان حل می‌شوند. پس از حل، توزیع فشار صوتی اعمال شده توسط مولد در دامنه محاسباتی مشخص خواهد شد. بنابراین در هر نقطه از دامنه محاسباتی با توجه به فشارش، شدت فراصوت با استفاده از معادله (۶) تعیین می‌شود.

$$I(r) = p(r)^2/2\rho c \quad (6)$$

هر چه شدت فرا صوت ایجاد شده بیشتر و در حجم بیشتری از دامنه محاسباتی اعمال شود، بازدهی فرایند در راکتور صوتی بالاتر خواهد بود زیرا حجم فعال و تعداد مکان‌های با فشار منفی بزرگ در سیال بیشتر شده و در نتیجه امکان وقوع کاواک‌زایی و انرژی تولیدی بالاتر می‌رود.

۴- بحث و تجزیه و تحلیل نتایج

آنچه از شبیه‌سازی راکتور صوتی مشخص شد این است که توزیع فشار صوتی اعمال شده در سیال شدیداً به هندسه راکتور وابسته است. در نتیجه به ازای نسبت معینی از ابعاد راکتور (D، H و R) در شکل (۳)، بالاترین شدت در حجم بزرگتری از راکتور ایجاد

1. Ultrasound Intensity

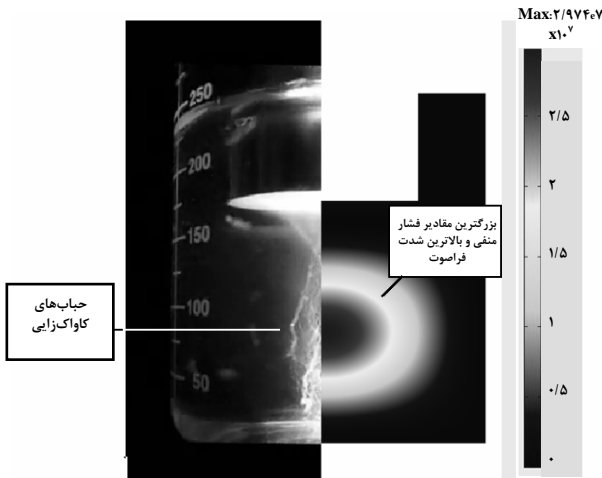
۴-۱ اعتبار سنجی نتایج

در ادامه برای حصول اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی عددی، دو سیستم مختلف از راکتورهای صوتی شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده [۱۳] و [۱۴] مقایسه شده‌اند.

الف) شبیه‌سازی راکتور صوتی شرکت

Industrial Sonomechanics, LLC (ISM)

در این راکتور ۲۵۰ سی سی از مولد صوت با توان ۲ kW و با فرکانس ۲۲ kHz با ردیاب از نوع Barbell Horn با قطر ۳۵ mm برای ایجاد کاواک‌زایی در آب، استفاده شده است. شکل (۷) مقایسه‌ای از توزیع شدت صوتی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی CFD (با ۲۹۸۲۴ مش و درجه آزادی ۶۰۱۹۳) و توزیع مکان‌های فعال کاواک‌زایی حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد.



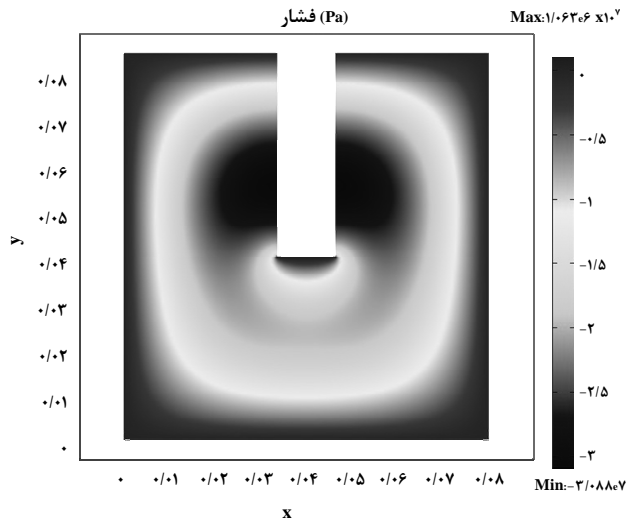
شکل ۷- توزیع شدت فراصوت در راکتور در توان ۲۰۰w و فرکانس ۲۲kHz و مقایسه با راکتوری با همان اندازه [۱۳]

همانطور که از شکل (۷) مشخص است نتایج شبیه‌سازی توانسته است به خوبی محل ایجاد کاواک‌زایی در را در تصویر نشان داده شده از کار آزمایشگاهی (نیمه سمت چپ) پیش‌بینی کند.

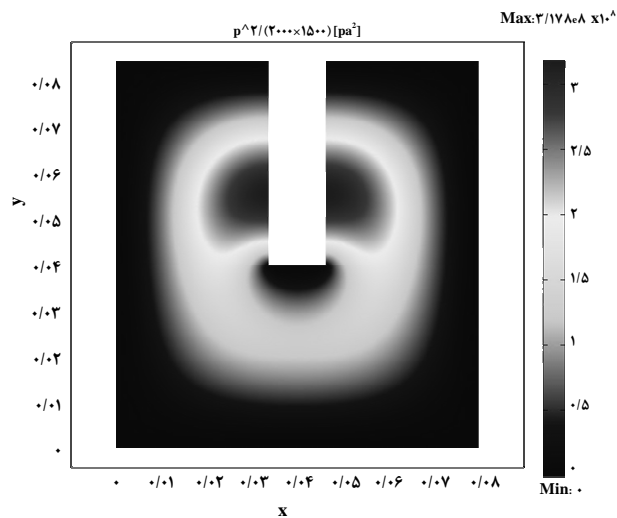
ب) شبیه‌سازی راکتور صوتی شرکت

Hielscher - Ultrasound Technology

راکتور صوتی مورد استفاده، استوانه‌ای از جنس شیشه با قطر ۱۵۰ mm و ارتفاع ۴۳۵ mm پر از آب است. مولد صوت، ردیاب فرا صوت از نوع UIP2000 به قطر ۸۵ mm (و قطر نوک ۲۰ mm)، توان ۲ kW و فرکانس ۲۰ kHz می‌باشد که در حدود ۲۵۰ mm در آب



شکل ۵- توزیع فشار ناشی از موج فراصوت در راکتور در توان ۵۰W، فرکانس ۲۰kHz و H=۴۵mm

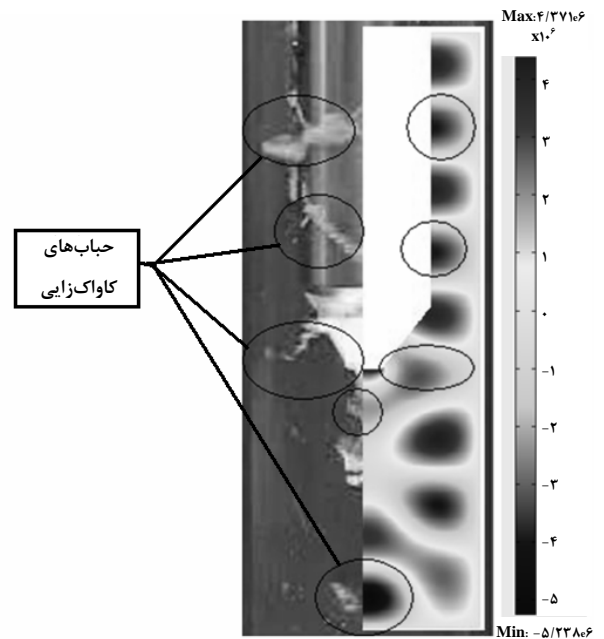


شکل ۶- توزیع شدت فراصوت در راکتور در توان ۵۰W، فرکانس ۲۰kHz و H=۴۵mm

با توجه به شکل (۶) در نقاطی که بیشترین شدت فراصوت اعمال شده است، بیشترین احتمال وقوع پدیده کاواک‌زایی وجود خواهد داشت. بنابراین ابعادی از هندسه راکتور مطلوب است که بیشترین شدت فراصوت را در بیشترین حجم راکتور ایجاد کند. در نتیجه، بیشترین تعداد انفجار حباب‌های کاواک‌زایی و بالاترین مقدار تولید انرژی به صورت نقطه‌ای در توده سیال را خواهیم داشت. البته لازم به ذکر است که برای ایجاد حباب باید فشار به حد کافی (با توجه به خصوصیات فیزیکی سیال) پایین باشد.

این فرایندها در صنعت پالایش نفت می‌تواند بسیار کارگشا و مفید باشد. در فرایندهای کاواک‌زایی صوتی انرژی مورد نیاز برای شکست پیوندهای بین مولکول‌های نفت خام، از انفجار حباب‌های ریز ناشی از کاواک‌زایی تأمین می‌شود. بازدهی راکتورهای صوتی شدیداً به هندسه راکتور، مشخصات هندسی و محل قرارگیری پروب در راکتور و خصوصیات ترموفیزیکی سیال وابسته است. بنابراین، ابعادی از هندسه راکتور مطلوب است که بیشترین شدت فراصوت را در بیشترین حجم از راکتور ایجاد کند. در این تحقیق با شبیه‌سازی CFD انتشار موج در توده سیال، توزیع فشار و شدت فراصوت در راکتور پیش‌بینی شد و می‌توان با مقایسه نتایج، اثر پارامترهای مختلف فیزیکی سیستم را در بازدهی روش کاواک‌زایی پیش‌بینی کرد و در نهایت سیستمی را طراحی کرد که بالاترین حجم فعال کاواک‌زایی و در نتیجه بیشترین انرژی تولیدی در اثر متلاشی شدن میکروحباب‌ها را داشته باشد. انرژی تولیدی بیشتر توسط کاواک‌زایی صوتی به شکستن بیشتر پیوندهای بین مولکول‌های نفت خام و در نتیجه ارتقای کیفیت بیشتر آن می‌انجامد.

موجود در راکتور فرو رفته است. شکل (۸) مقایسه‌ای از توزیع فشار صوتی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی (با ۲۲۳۳۶ مش و درجه آزادی ۴۵۲۲۵) و توزیع مکان‌های فعال کاواک‌زایی حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- توزیع فشار صوتی حاصل از شبیه‌سازی در راکتور در توان ۲kW و فرکانس ۲۰kHz و مقایسه با راکتوری به همان اندازه در مرجع [۱۴]

شکل (۸) بخوبی نشان می‌دهد که در مکان‌هایی که شبیه‌سازی عددی کمترین فشارها را پیش‌بینی کرده است، حباب‌های کاواک‌زایی نیز تشکیل شده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

روش‌های معمول مورد استفاده در ارتقای کیفیت نفت خام، فرایندهایی کم بازده با شرایط عملیاتی دشوار هستند که هزینه‌های جاری و ثابت بالایی دارند و مشکلات زیست محیطی فراوانی ایجاد می‌کنند. فرایندهای کاواک‌زایی به دلیل تولید انرژی زیاد به صورت نقطه‌ای در توده سیال و در عین حال کم هزینه‌گی و نیز به دلیل انعطاف پذیری زیاد در طراحی فرایندها بر این مبنا بسیار مطلوب بوده و از لحاظ زیست محیطی کمترین مضرات را دارند. به کارگیری

۶- فهرست علائم و نشانه‌ها

A	مساحت نوک پروب (m ²)
C	سرعت صوت در آب (m/s)
D	فاصله نوک پروب از کف راکتور صوتی (m)
h	اندازه گام منفصل‌سازی
H	عمق پروب در آب (m)
I _{US}	شدت فرا صوت (w/m ²)
k	عدد موج
P	فشار صوتی
P _{US}	توان مولد صوت (w)
r	شعاع پروب (m)
R	شعاع راکتور (m)
ρ	چگالی آب (kg/m ³)
ω	فرکانس زاویه‌ای موج صوتی

- [1] Gogate P. R., Tayal R. K., Pandit A. B., "Cavitation: A technology on the horizon", *Current Science*, 91, 35-46, (2006).
- [2] Mason T. J., Lorimer J. P., "Applied Sonochemistry", Wiley-VCH, 12-34, Germany (2002).
- [3] Klima J., Ferrer A. F., Garcia J. G., Ludvik J., Saez V., Iniesta J., "Optimization of 20 kHz sonoreactor geometry on the basis of numerical simulation of local ultrasonic intensity and qualitative comparison with experimental results", *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, 19-28, (2007).
- [4] Saez V., Fras-Ferrer A., Iniesta J., Gonzalez-Garca J., Aldaz A., Riera E., "Characterization of a 20 kHz sonoreactor. part I: analysis of mechanical effects by classical and numerical methods", *Ultrasonics sonochemistry*, 11, 59-65, (2005).
- [5] Sutkar V. S., Gogate P. R., "Mapping of cavitation activity in high frequency sonochemical reactor", *Chemical Engineering Journal*, 158, 296-304, (2010).
- [6] Kim H. J., Chi M. H., Hong I. K., "Effect of ultrasound irradiation on solvent extraction process", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 919-928, (2009).
- [7] Raman V., Abbas A., Joshi S. C., "Mapping Local Cavitation Events in High Intensity Ultrasound Fields", Conference Bangalore, (2006).
- [8] Sutkar V. S., Gogate P.R., "Mapping of cavitation activity in high frequency sonochemical reactor", *Chemical Engineering Journal*, 158, 296-304, (2010). [9] Moholkar V. S., Sable S. P., Pandit A. B., "Mapping the Cavitation Intensity in an Ultrasonic Bath Using The Acoustic Emission", *AIChE Journal*, 46, 4, 684-694, (2000).
- [10] Sutkar V. S., Gogate P. R., Csoka L., "Theoretical prediction of cavitation activity distribution in sonochemical reactors", *Chemical Engineering Journal*, 158, 2, 290-295, (2010).
- [11] Austin D. P., "Method to Upgrade Hydrocarbon mixture", United States Patent, 10/174303, (2003).
- [12] Son Y., Lim M., Khim J., "Investigation of acoustic cavitation energy in a large-scale sonoreactor", *Ultrasonics Sonochemistry*, 16, 552-556, (2009).
- [13] Industrial Sonomechanics, LLC (ISM), www.Sonomechanics.com.
- [14] Hielscher-Ultrasound Technology, www.Hielscher.com.
- [15] FEMLAB 2.3 User's Guide.