بررسی میزان یکنواختی شدت موج در حمام فراآوایی و راکتور کروی

اباذر حاج نوروزی[1]، رضا افضل‌زاده*[1]، فائزه قناتی[2]

۱. گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. گروه زیست گیاهی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مطالعه نرخ تغییر شدت امواج صدا در نقاط مختلف یک حمام فراآوایی بررسی شده است. تغییر مُد بازآوایش (تشدید) حمام فراآوایی، دلیل فقدان یک‌نوایی شدت امواج است که نتیجتاً به عدم تکرارپذیری آزمایش انجامیده است. لذا جهت کاستن این نقیصه استفاده از راکتور کروی فراآوایی توصیه می‌شود. راکتور کروی شامل بالن کروی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌لیتر است که دو تراگذار (مبدل) فراآوا درست رو به روی یکدیگر به طرفین آن متصل شده‌اند. برای بررسی ویژگی‌های شدت امواج در راکتور کروی، توان و اثر موج ایستاده حاصل از تابش فراآوایی هر دو تراگذار با استفاده از آزادسازی هیدروکسید رادیکال در راکتور توسط لیانسانی (نوردهی) شیمیایی تصویربرداری شده است. در حمام فراآوایی، متناسب با ارتفاع بشر از کف حمام، میزان بازده از ۰٫۱۳۳ تا ۰٫۴۰۷ نانو مولار بر ژول برای فواصل ۱ تا ۳۰ میلی‌متری از کف حمام متغیر است. بازده در ارتفاع ثابت اما در طرفین ظرف نسبت به مرکز ظرف به شدت متفاوت است. بازده در سمت راست در ارتفاع ۳۰ میلی‌متری از کف حمام برابر با ۰٫۰۳۲ نانومولار بر ژول است در حالی‌که در مرکز حمام با همان ارتفاع، ۰٫۴۰۷ نانو مولار بر ژول اندازه‌گیری با اختلاف ۱۳ برابر را نشان می‌دهد. در راکتور کروی، امواج فراصدا از تابع بسل تبعیت می‌کند و از آن‌جایی که قطر ظرف برابر با مقدار ثابت ۶٫۳ سانتی‌متر است، مطابق معادله بسل گره و شکم همواره در نقاط ثابت و مشخصی از بالن مشاهده می‌شوند. هم‌چنین از مقایسه بازده در شرایط فقط یک تراگذار روشن با دو تراگذار به طور هم‌زمان می‌توان به تشکیل مُدهای ایستاده پی‌برد. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند بازده برای راکتور کروی ۴٫۶۲۵ نانومولار بر ژول است، در حالی‌که برای حمام فراآوایی، در بهترین حالت برابر ۰٫۴۰۷ نانو مولار بر ژول می باشد، که اختلاف ۱۰ برابری را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: حمام فراآوایی، دزیمتری یدید پتاسیم، راکتور کروی فراآوایی، آواشیمی (سونوشیمی)، آوالیانسانی (سونولومینسانس).

۱. مقدمه

برای تولید امواج فراآوایی (اولتراسونیک)[1] اغلب از دو دسته تراگذار استفاده می‌شود. دسته نخست حمام فراآوایی است که وابسته به حجم حمام، از یک تا چند تراگذار فراآوا تشکیل شده که به انتهای محفظه (حمام) متصل می‌شوند و دسته دیگر پروب‌های فراآوا است که امواج مکانیکی فراآوا را از تراگذارهای (مبدل‌های)[2] پیزوالکتریک به نوک پروب تیتانیومی انتقال می‌دهد. طول میدان نزدیک (اِن‌اِف)[3] در نیم‌رخ (پروفیل)[4] تابش حمام فراآوا با توان دوم قطر بلور(کریستال)، بسامد و عکس سرعت انتشار صدا در محیط متناسب است.

در انتهای میدان نزدیک، میدان فراآوایی متمرکز شده و قطر آن به نصف قطر بلور می‌رسد. در حمام فراآوا با توجه به اینکه بلور معمولاً به ظرف فولاد (استیل) متصل شده است، سطح مقطع کاملاً مشخصی را نمی‌توان در نظر گرفت. هم‌چنین نکته مهم دیگر این است که به‌رغم تصور، میدان یکنواختی در سراسر حمام وجود ندارد و نیم‌رخ انرژی در نقاط مختلف حمام به دلیل تشکیل مُدهای مختلف، متفاوت است.

در برخی از مقالاتی که از حمام فراآوایی برای انجام فرآیندهای آواشیمی (سونوشیمی)[5] استفاده نموده‌اند، بدون توجه به موقعیت ظرف واکنش، آن را درون حمام قرار داده و اثر امواج را بررسی نموده‌اند [۱]. در

* نویسنده پاسخگو: afzalzadeh@kntu.ac.ir

[1] Ultrasonic
[2] Transducer
[3] NF; Near Field
[4] Profile
[5] Sonochemistry

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]

صورتی‌که مقالاتی وجود دارند که به طور نظری (تئوری) به شبیه‌سازی امواج صوتی در راکتورهای مختلف پرداخته‌اند. کسوکا و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی نظری به مطالعه راکتورهای فراآوا پرداخته‌اند [۲]. سوتکار نیز با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس[1] شبیه‌سازی راکتورهای فراآوا را انجام دادند [۳]. این محققان نشان داده‌اند که شدت فراآوا در نقاط مختلف درون حمام متفاوت است. هم‌چنین این پژوهشگران نیم‌رخ تابش فراآوا را در راکتور مورد مطالعه اعم از پروب و حمام، بررسی نموده‌اند.

در این پژوهش با روش کالریمتری [۴]، توان صوتی برای حمام تک بلوری با ظرفیت ۲۵۰۰ میلی‌لیتری اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روش دزیمتری شیمیایی یدید پتاسیم [۵ و ۶]، میزان جذب یون ید در حجم‌ها و نقاط مختلف محاسبه شد. با یک راکتور کروی و استفاده از آواشیمی نوری و دزیمتری شیمیایی، بازده و نرخ آزادسازی یون ید مورد بررسی قرار گرفت.

در این مقاله سعی شده است تا به صورت تجربی، ابتدا با استفاده از روش کالریمتری و سپس با استفاده از دزیمتری یدید پتاسیم مقادیر بازده برای مجموعه وسیعی از نقاط درون حمام با توجه به ارتفاع از کف ظرف (موقعیت تراگذار فراآوا) در طرفین و مرکز حمام بدست آیند. هم‌چنین برای بررسی اثر چگالی توان درون حمام، حجم‌های مختلف ۵ تا ۳۰ میلی‌لیتر از مایع درون بشر که در ارتفاع ۲۵ میلی‌متری از کف ظرف قرارداشتند، مورد بررسی قرار گرفتند.

۲. مواد و روش‌ها

برای استخراج فعالیت حفره‌سازی ناشی از تابش امواج فراآوایی (اولتراسونیک) و بررسی یکنواختی تابش، از حمام فراآوایی "دیجیتال اولتراسونیک کلینر - سی‌دی - ۴۸۲۰"[2] با ابعاد ۸۰×۱۵۰×۲۵۰ میلی‌مترمکعب، توان مصرفی ۱۷۰ وات و ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت استفاده شد. برای کالریمتری، دماسنج رقومی (دیجیتال)[3] (نوع اوتونیکز تی‌ضِد۴اِس‌تی)[4] با ترموکوپل نوع پی‌تی۱۰۰[5] مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری میزان جذب یون ید حاصل از دزیمتر شیمیایی از دستگاه اسپکتروفوتومتر (پرکین اِلمر نوع لمبدا ۲۵)[6] استفاده شد. کلیه مواد شیمیایی مصرفی تولیدات شرکت مرک آلمان[7] تهیه گردید.

۲-۱. کالریمتری حمام فراآوا (اولتراسونیک)

برای انجام کالریمتری، ۲۵۰۰ میلی‌لیتر آب درون حمام فراآوا (اولتراسونیک) ریخته شد. همان‌گونه که می‌دانیم مهم‌ترین نقش امواج فراآوا حباب‌سازی است، لذا برای کاهش میزان خطا قبل از شروع آزمایش‌ها به مدت چند دقیقه حمام روشن نگه داشته شد، تا هوای محلول در آب خارج گردد و حباب‌های تشکیل شده در آزمایش صرفاً به جهت فشار منفی ناشی از امواج فراآوایی موجود باشند. با توجه به مشخص نبودن ظرفیت گرمایی حمام (A)، برای بدست آوردن توان صوتی ($\bar{P}_{US}$)، در ابتدا با استفاده از گرم‌کن ۴۴۰ وات، افزایش دما در ۱۰ آزمایش به طور میانگین ۲٫۵ درجه سلسیوس در ۱۹٫۵ ثانیه بدست آمد. همچنین در حمام فراآوا در میانگین زمانی ۵٫۱ ثانیه، ۰٫۲ درجه سلسیوس افزایش دما اندازه‌گیری شد. لذا با استفاده از روابط ۱ و ۲ توان فراآوا ۱۳۵٫۵ وات بدست آمد:

$$(mc + A)(\Delta\theta) = \bar{P}_H \bar{t}_H$$
$$(mc + A)(\Delta\theta) = \bar{P}_{US} \bar{t}_{US} \qquad ۱$$

$$\bar{P}_{US} = \bar{P}_H \bar{t}_H \frac{\Delta\theta_{us}}{\Delta\theta_{us} \bar{t}_{us}} \qquad ۲$$

که M جرم آب درون حمام، c ظرفیت گرمایی، A ظرفیت گرمایی کالریمتر و $\Delta\theta$ میانگین میزان تغییرات دمایی می‌باشند. P_{us} توان تولیدی توسط منبع فراآوا و P_H توان تولیدی توسط گرم‌کن برقی (الکتریکی) هستند.

[1] Comsol Multiphysics
[2] Digital Ultrasonic Cleaner-CD-4820
[3] Digital
[4] Autonics Tz4st
[5] Pt100
[6] Perkin Elmer - Lambeda 25
[7] Merk Co. Germany

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]

۲-۲. دزیمتری یدید پتاسیم درون حمام

مهم‌ترین اثر امواج فراآوا (اولتراسونیک)، فروریزش حباب‌های تشکیل شده از این امواج می‌باشد. این فروریزش می‌تواند به طور مؤثری رادیکال آزاد هیدروکسید تولید کند که در اکسیداسیون یون ید نقش مؤثری دارد و منجر به تشکیل یون ید (I_3^-) می‌گردد. یدید پتاسیم ۰/۱ مولار به میزان ۱۰ میلی‌لیتر درون یک بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر با سطح مقطع ۵ سانتی‌متر ریخته شد. کف بشر تخت بود، لذا امواج به راحتی به درون محتوی یدید پتاسیم انتقال داده می‌شوند. یدید پتاسیم در بازه‌های زمانی ۹۰ ثانیه و طول مدت ۳۶۰ ثانیه تحت تابش فراآوایی در حمام آب قرار گرفت و سپس توسط سامانه اسپکتروفوتومتر، جذب یون I_3^- در ۳۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

با توجه به احتمال تولید مُدهای بازآوایش (تشدید) مختلف در درون حمام، برای انجام آزمایش فقط بشر مورد نظر درون حمام قرار گرفت، زیرا اعمال کوچک‌ترین تغییر در سراسر آزمایش در درون حمام منجر به بهم ریختن مُدهای بازآوایش (تشدید) و در نتیجه تغییر در جواب آزمایش می‌شد. در ابتدا برای بررسی مُد انتشاری و یا مُد ایستا، از جاذب صدا بر روی محلول درون بشر استفاده شد. با قرار دادن جاذب در بالای سطح محلول، این امواج جذب می‌شود تا مجدداً امواج به درون محفظه انعکاس پیدا نکنند. این آزمایش در فاصله ۲۵ میلی‌متری از کف حمام فراآوا و در دو حالت با جاذب و بدون جاذب فراآوایی انجام گرفت.

در آزمایش بعدی برای تعیین بازده تولید حباب، بشر محتوی محلول دزیمتر در ارتفاع‌های ۱، ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۵۵ میلی‌متری از کف محفظه و درست مقابل بلور (کریستال) و سپس در سمت چپ و راست بلور به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از مرکز و در ارتفاع‌های فوق از کف حمام فراآوا قرار داده شد. این آزمایش میزان نرخ افزایش غلظت یون ید را تقریباً در سراسر حمام فراآوا نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر چگالی توان در بشر مذکور؛ ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌لیتر محلول یدید پتاسیم ۰/۱ مولار درون بشر ریخته شد. بازده تابش فراآوایی براساس تولید حباب‌های صوتی توسط دزیمتر یدید پتاسیم از تقسیم نرخ افزایش غلظت I_3^- به وات برقی (الکتریکی) مصرفی توسط دستگاه بر حسب نانومولار بر ژول بدست آمد.



شکل ۱ سامانه تابش‌دهی فراآوایی به محلول دزیمتر.

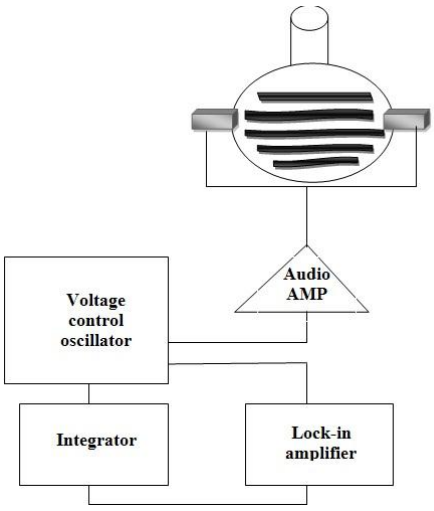
۲-۳. راکتور کروی فراآوا (اولتراسونیک) و بررسی تولید حفره

برای بررسی میزان تولید حفره از دو تراگذار فراآوا (مبدل اولتراسونیک) استفاده شده است. هر تراگذار از چهار بلور (کریستال) پیزوسرامیک که به طور سری به هم پیچ شده‌اند، ساخته می‌شود. بلورها به شکل استوانه‌ای تو خالی است که ضخامت آن ۲ میلی‌متر و قطر آن ۱ سانتی‌متر می‌باشد که درون آن سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر وجود دارد. سرامیک‌های مورد استفاده ساخت شرکت "صاایران" می‌باشند. برای انتقال مناسب نوسانات مکانیکی در قسمت جلویی چهار بلور، قطعه‌ای استوانه‌ای از فلز تیتانیوم و در قسمت انتهایی از فولاد (استیل) استفاده شده است. فلز تیتانیوم و فولاد (استیل)، به شکل استوانه تو خالی شبیه بلورهای پیزوالکتریک و با قطر و ارتفاع ۱سانتی‌متر می‌باشند که به کمک پیچ، بلورها، تیتانیوم و فولاد را به یکدیگر محکم می‌کند. دو تراگذار به بالن کروی ۱۰۰ میلی‌لیتری که قطر داخلی آن ۶/۳ سانتی‌متر و قطر خارجی آن ۶/۵ سانتی‌متر می‌باشد، چسبانده شده است. پیزوسرامیک‌ها دارای ظرفیت خازنی در حد نانوفاراد می‌باشند که مدار راه‌انداز آن‌ها یک نوسان‌ساز

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]

است. بسامد کار بلورهای پیزو به شرایط نصب و نحوه چسباندن آن به بالن مورد نظر ۱۰۰ میلی‌لیتری، تا حدودی متفاوت می‌باشد.

در راکتور ساخته شده [۷] از مدار راه‌انداز از نوع وی‌سی‌اُ[1] طراحی شرکت "جویا الکترونیک" استفاده شده است. شکل ۲ به صورت طرح‌وار مدار دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۲ طرح‌واره مدار دستگاه مورد استفاده.

این مدار به گونه‌ای است که علامت (سیگنال) مولد (ژنراتور) می‌تواند با تغییر مقاومت، میزان بسامد ورودی را تغییر دهد. این دستگاه می‌تواند دامنه بسامدهای مختلف را تقویت و به تراگذار فراآوایی ارسال نماید و سپس، با مقایسه اختلاف فاز جریان و ولتاژ، بسامد بازآوایش (تشدید) را تشخیص داده و در آن بسامد قفل می‌کند [۷]. در این دستگاه بسامد بازآوایش، بسامدی است که کم‌ترین میزان اتلاف در مدار نوسان‌ساز وجود داشته باشد.

برای اندازه‌گیری میزان آزادسازی I_3^-، محلول دزیمتر درون راکتور ریخته شد و در بازه‌های زمانی مختلف برای هر تراگذار فراآوا به صورت تکی و یا هر دو تراگذار به صورت هم‌زمان آزمایش گردید. با مقایسه شدت یک پروب با دو پروب روشن، می‌توان به مُد امواج فراآوایی از نوع ایستاده یا انتشاری درون راکتور کروی پی‌برد.

[1] VCO; Voltage Control Oscillator

۲-۳. آواشیمی (سونوشیمی) نوری

برای نشان دادن نیم‌رخ (پروفیل) حضور رادیکال آزاد هیدروکسیل در رآکتور فراآوا از ماده‌ای نورتاب استفاده شد. رادیکال آزاد هیدروکسیل با ماده آلی لومینال[2] ترکیب و خاصیت فلورسانس ایجاد می‌کند [۸ و ۹].

محلول آبی ۰/۰۵ مولار لومینال (Merck, p.a.) و ۰/۱ مولار Na_2CO_3 (Merck, p.a.) در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب ساخته و در رآکتور ریخته شد. عکس‌ها با دوربین کنون ای‌اُاِس[3] با لنز ۱۸-۱۳۵ میلی‌متر و فاصله کانونی ۱۰۰ میلی‌متر در اتاق تاریک ثبت گردید. دوربین در شرایط مدت زمان نوردهی ۱۸۰ ثانیه، اندازه دیافراگم ۵/۶ و حساسیت ۳۲۰۰ درجه تنظیم گردیده است.

۲-۴. تحلیل آماری

هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین و انحراف معیار بدست آمد. برای مقایسه میان دو گروه در تحلیل جاذب از آزمون تی- تست[4] استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

افزایش غلظت I_3^- نسبت به زمان به صورت چند جمله‌ای درجه دو است که یک بیشینه دارد [۵]. چون در اینجا صرفاً بررسی شدت‌ها مورد نظر است، فقط در زمان‌های کوتاه که منحنی به صورت خطی است و شیب مشخصی دارد، مسئله بررسی می‌گردد. میزان نرخ رشد غلظت I_3^- می‌تواند نشان‌دهنده توانایی تولید رادیکال آزاد هیدروکسید باشد. برای بررسی میزان و نوع نقش موج برگشتی از سطح محلول در تولید حباب از جاذب صوتی بر روی محلول درون بشر استفاده شد.

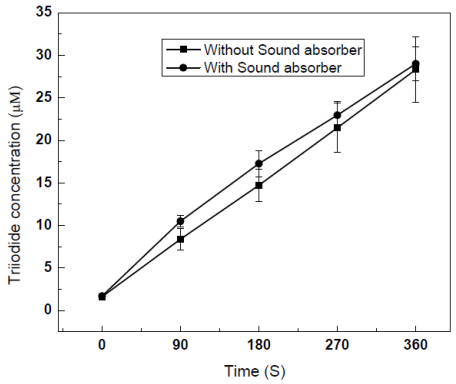
شکل ۳، دو حالت استفاده از جاذب و بدون استفاده از جاذب در فاصله ۲۵ میلی‌متری از کف ظرف برای بشر محتوی ۱۰ میلی‌لیتر یدید پتاسیم ۰/۱ مولار را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهند که با تراز

[2] Luminol
[3] Canon Eos
[4] T-Test

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

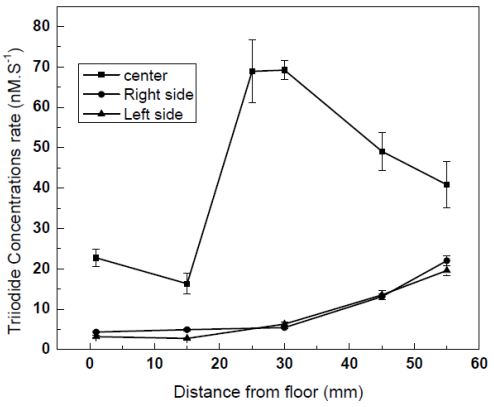
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]

اطمینان ۹۵ درصد، تمایز معناداری میان دو حالت متفاوت با وجود و عدم وجود جاذب وجود ندارد. لذا استفاده از بشر در این وضعیت نشان‌دهنده این موضوع است که موج فراآوایی (اولتراسونیک) فقط دارای مُد انتشاری است و بازتابش از سطح آن نمی‌تواند با موج منتشرشده هماهنگ شود و موج ایستاده را تشکیل دهد. در صورت تشکیل موج ایستاده، میزان آزادسازی I_3^- نسبت به حالت بدون جاذب تغییر چشمگیری می‌یابد.



شکل ۳ غلظت I_3^- بر حسب زمان برای حمام فراآوا در حضور و عدم حضور جاذب فراآوا.

بازده از نسبت نرخ غلظت I_3^- به مقدار وات برقی (الکتریکی) مصرفی دستگاه حاصل می‌شود. میزان بازده شرایط مختلف در جدول‌های ۱ تا ۴ ارائه شده است.



شکل ۴ نرخ افزایش غلظت I_3^- در نقاط مختلف حمام فراآوا. بیش‌ترین نرخ در مرکز و در فاصله ۲۵ و ۳۰ میلی‌متری مشاهده می‌شود. خط برای تعقیب شکل می‌باشد.

جدول ۱ بازده آزادسازی I_3^- برای مرکز حمام در فواصل مختلف از کف حمام فراآوا.

فاصله از کف حمام (mm)	بازده ($nM.J^{-1}$)	انحراف معیار
۱	۰٫۱۳۳	۰٫۰۱۲
۱۵	۰٫۰۹۶	۰٫۰۱۵
۲۵	۰٫۴۰۵	۰٫۰۴۶
۳۰	۰٫۴۰۷	۰٫۰۱۳
۴۵	۰٫۲۸۸	۰٫۰۲۷
۵۵	۰٫۲۴۰	۰٫۰۳۳

جدول ۲ بازده آزادسازی I_3^- برای سمت چپ و راست حمام در ارتفاع مختلف از کف حمام فراآوا.

فاصله از کف حمام (mm)	بازده سمت راست ($nM.J^{-1}$)	انحراف معیار	بازده سمت چپ ($nM.J^{-1}$)	انحراف معیار
۱	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۱	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۲
۱۵	۰٫۰۲۹	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۱
۳۰	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۳۷	۰٫۰۰۳
۴۵	۰٫۰۷۷	۰٫۰۰۴	۰٫۰۷۹	۰٫۰۰۶
۵۵	۰٫۱۲۹	۰٫۰۰۷	۰٫۱۷۹	۰٫۰۰۷

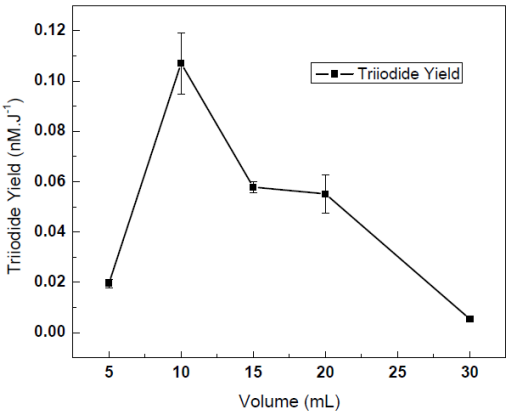
شکل۴، نرخ افزایش غلظت I_3^-، جدول ۱ و جدول ۲، بازده را در نقاط مختلف در طرفین و مرکز حمام برحسب نانو مولار بر ثانیه نشان می‌دهند. منحنی‌های مربوط به افزایش غلظت I_3^- مربوط به طرفین (چپ و راست) و مرکز حمام هستند که متناسب با ارتفاع از کف ظرف (محل قرار گرفتن تراگذار فراآوا)، رسم شده‌اند.

با توجه به رابطه ۱ و مشخصات حمام فراآوا، میدان نزدیک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در فاصله ۲۵ میلی‌متری از کف قرار دارد، که شکل ۴ و جدول ۱، به وضوح این امر را نشان می‌دهند. هم‌چنین به علت اینکه بلور پیزوالکتریکی که به کف ظرف فولادی (استیل) چسبیده است، سطح مقطع مشخصی ندارد. بیشینه توان در فواصل ۲۵ تا ۳۰ میلی‌متر حاصل شد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. هم‌چنین شدت میدان در سمت چپ و شدت میدان از سمت راست بلور کاهش چشمگیری نسبت به مرکز دارند و تقریباً

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]

مشابه یکدیگر هستند و با افزایش فاصله از بلـور، تـوان اندازه‌گیری‌شده، افزایش می‌یابند.



شکل ۵ نرخ افزایش غلظت در حمام فراآوا در فاصله ۲۵ میلی‌متر از کف حمام برای حجم‌های مختلف محلول (خط برای تعقیب شکل می‌باشد).

شکل ۵ و جدول ۳ نرخ افزایش غلظت بر حسب زمـان و بازده را برای حجم‌های مختلـف نمـایش مـی‌دهنـد. نتایج نشان‌دهنده این واقعیـت هسـتند کـه در حمـام فراآوا، بـرای انتقـال حـداکثر تـوان، حجـم بهینـه ۱۰ میلی‌لیتر است. با افزایش این مقدار به تدریج از میزان بازده کاسته می‌شود. این موضوع را نیز می‌توان مربوط به میدان نزدیک دانست، حجم ۱۰ میلی‌لیتـر ارتفـاعی در حدود ۶ میلی‌متر دارد، لذا وقتی‌که بشر در ارتفـاع ۲۵ میلی‌متری قرار دارد، مرکز جرم محلول در ارتفـاع معادل ۲۸ میلی‌متر قرار می‌گیرد که با توجه به شـکل ۴ و جدول ۱ بیشینه بازده رخ می‌دهـد، زیـرا بیشـینه آزادسازی I_3^- در ارتفـاع ۲۵ تـا ۳۰ میلـی‌متـر از کـف مشاهده می‌شود. ولی برای حجم‌های بیش‌تر، به طبع، دور شدن مرکز جرم محلول از چشمه فراآوا منجـر بـه کاهش بازده می‌گردد. نکته مهـم دیگـر بحـث چگـالی توان است. این مهم است که توان بـه چـه حجمـی از محلول انتقال می‌یابد. اما این موضوع مؤید این مطلـب نیست که وجود حجم کم‌تر منجـر بـه بـازده بـیش‌تـر می‌شود [۱۰].

نتایج فوق به وضوح نشان می‌دهنـد کـه حمـام فـراآوا گزینـه مناسـبی بـرای اسـتفاده در راکتـور آواشـیمی نمی‌باشد، زیرا با جابـه‌جـایی ظـرف واکـنش در درون حمام و نیز تغییر اندازه ظرف و مایع درون آن بازده به شدت تغییر می‌کنـد. بـدین منظـور راکتـوری کـروی طراحی و ساخته شد. در این مطالعه با تکـرار آزمـایش در راکتور محتـوی ۱۰۰ میلـی‌لیتـر از محلـول تحـت تابش فراآوا، همواره نتایج ثابتی بدسـت آمدنـد. نتـایج مربوط بـه دزیمتـر شـیمیایی یدیـد پتاسـیم، افـزایش غلظت محلول دزیمتر نسبت به زمان برای هـر پـروب راکتور به تنهایی و برای دو پروب هم‌زمان کـه توسـط یک مدار تغذیه می‌شود در شکل ۶ ارائه شده‌اند. نـرخ رشد و بازده در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۳ بازده آزادسازی I_3^- برای مرکز حمام در فاصله ۲۵ میلی‌متری از کف در حجم‌های گوناگون.

حجم (mL)	بازده ($nM.J^{-1}$)	انحراف معیار
۵	۰/۰۷۴	۰/۰۶۷
۱۰	۰/۴۰۵	۰/۰۴۶
۱۵	۰/۲۲۲	۰/۰۰۴
۲۰	۰/۲۱۱	۰/۰۲۵
۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۱

جدول ۴ مقایسه نرخ رشد و بازده در شرایط تک پروب و دو پروب روشن در سمت راست و در سمت چپ راکتور.

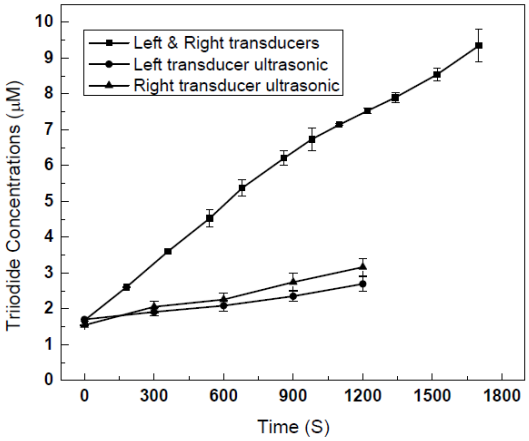
تراگذار فراآوا	نرخ افزایش غلظت I_3^- ($nM.S^{-1}$)	انحراف معیار	بازده ($nM.J^{-1}$)	انحراف معیار
سمت راست	۱/۲۷۰	۰/۱۲۷	۰/۳۸۸	۰۳/۰۸
سمت چپ	۰/۹۱۳	۰/۰۴۵	۰/۲۷۹	۰/۰۱۳
سمت راست و چپ	۴/۶۲۵	۰/۴۳۲	۱/۴۱۴	۰/۱۳۲

نتایج شکل ۶ و جدول ۴ نشان می‌دهند که اولاً بـازده دو تراگذار وقتی به طور تکی روشن هستند، تقریبـاً در یک مرتبه است. با توان مدار نوسان‌ساز ثابت، وقتی دو تراگذار با هم روشن می‌شـوند، در حـدود چهـار برابـر بازده بیش از تک پروب است.

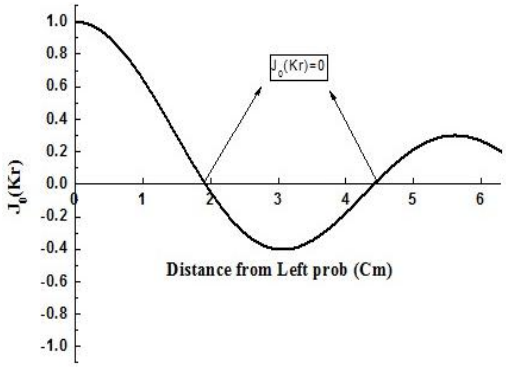
چشمه فراآوا به سطح کـروی بـالن شیشـه‌ای تـه‌گـرد ۱۰۰ میلی‌لیتری چسبانده شده است، لذا معادله مـوج

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]



شکل ۶ نتایج مربوط به دزیمتری راکتور کروی فراآوا.



شکل ۷ شکل تابع بسل که در آن صفرها نشان‌دهنده گره‌ها هستند.

به صورت بسل کروی $J_0(Kr)$ می‌باشد که $K = 2\pi/\lambda$ برابر عددموج و r فاصله از مرکز چشمه فراآوا می‌باشند [۱۰ و ۱۱]. به ازای مقادیر Kr برابر با ۲٫۴۰ و ۵٫۵۲، مقدار تابع بسل صفر است. بنابراین با دانستن بسامد دستگاه ۳۰ کیلوهرتز و سرعت صدا در درون آب در دمای ۳۰°C، گره‌ها در نقاط ۱٫۹۱ و ۴٫۳۹ سانتی‌متری تشکیل می‌شوند. قطر بالن ۶٫۳ سانتی‌متر و مجموع دو عدد ۱٫۹۱ و ۴٫۳۹ سانتی‌متر برابر با قطر کره است. از آن‌جا که هر دو پروب با هم روشن می‌شوند گره‌ها بر روی هم می‌افتند و موج ایستاده تشکیل می‌شود.

شکل ۷ موج بسل را برای یک تراگذار روشن در راکتور کروی مورد نظر را نمایش می‌دهد. از مولد دیگر موجی در جهت مخالف اما با همان مشخصات از نقطه ۶٫۳ سانتی‌متر که معادل قطر بالن است، منتشر می‌شود. وقتی دو تراگذار هم‌زمان روشن شوند، بازده حدوداً چهار برابر می‌شود که دو-برابری به خاطر استفاده از دو تراگذار و دو-برابر دیگر نیز به خاطر دو گره بوجود آمده در موج ایستا هستند. در گره، فشار منفی بیش‌تر و فروریزش حباب‌ها به مراتب بیش‌تر هستند.

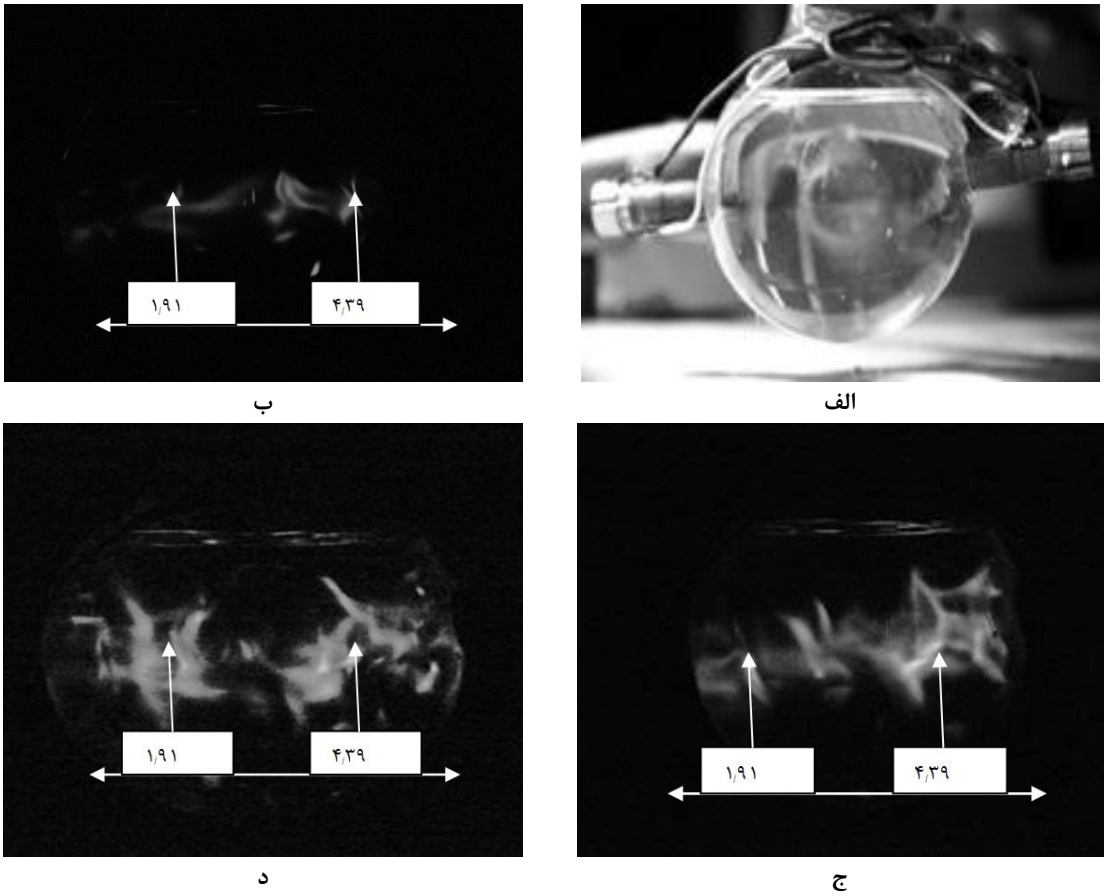
تصویر راکتور کروی و نیم‌رخ تابش امواج فراآوا که به طور آماری نرخ آزادسازی رادیکال آزاد هیدروکسیل را نمایش می‌دهد با استفاده از پدیده نورتابی شیمیایی بررسی و در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

تصاویر شکل ۸ در سه توان برقی (الکتریکی) ورودی۱٫۹۶، ۲٫۶۰ و ۳٫۲۷ وات گرفته شده‌اند که با افزایش توان صوتی، نورتابی بیش‌تر می‌شود. نقاط گره (صفرهای تابع بسل) در شکل ۸ مشخص شده‌اند. در نقاط گره بیشترین لیانسانی (نوردهی) دیده می‌شود که می‌تواند مؤید افزایش فشار صوتی در این نقاط باشد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند، در هر نقطه از حمام فراآوا مُد خاصی وجود دارد، لذا، آزمایش فقط در صورت قرار دادن نمونه بعدی در همان مکان و همان شرایط آزمایش مانند: حجم محلول، حجم آب موجود در حمام، میزان گاز محلول در آب حمام و تعداد عوامل پارازیتی موجود در حمام، تکرارپذیر خواهد بود. علت آن تغییر مقاومت صوتی (امپدانس) و تغییر مُد امواج فراآوایی است. در صورتی‌که در راکتور کروی معرفی شده در این مطالعه، تنها پارامتر مهم، حفظ حجم ثابتی از محلول است، بنابراین تکرارپذیری آزمایش‌ها با استفاده از راکتور کروی فراآوایی به مراتب از حمام فراآوا، بیش‌تر است. زیرا قطر بالن و مختصات نقاط گره و شکم همواره ثابت هستند و مختصات نقاط با تابع بسل قابل محاسبه می‌باشند.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]



شکل ۸ تصاویر مربوط به لیانسانی (نوردهی) شیمیایی موقعیت گره در موج ایستاده با توجه به صفرهای تابع بسل در ۱٫۹۱و ۴٫۳۹ سانتی‌متری، الف) تصویر راکتور و موقعیت دوربین، نورتابی شیمیایی برای توان‌های برقی ب) ۱٫۹۶ وات، ۲٫۶ وات، ج) ۲٫۶ وات، د: ۳٫۲۷ وات.

۵. فهرست منابع

[1] R.S. Yadav, P. Mishra, A.C. Pandey, "Growth mechanism and optical property of ZnO nanoparticles synthesized by sonochemical method," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 15, pp. 863-868, 2008.

[2] L. Csoka, S.N. Katekhaye, P.R. Gogate, "Comparison of cavitational activity in different configurations of sonochemical reactors using model reaction supported with theoretical simulations," Chemical Engineering Journal, vol. 178, pp. 384-390, 2011.

[3] V.S. Sutkar, P.R. Gogate, L. Csoka, "Theoretical prediction of cavitational activity distribution in sonochemical reactors," Chemical Engineering Journal, vol. 158, pp. 290-295, 2010.

[4] M. Toma, S. Fukutomi, Y. Asakura, S. Koda, "A calorimetric study of energy conversion efficiency of a sonochemical reactor, at 500 kHz for organic solvents," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 18, pp. 197-208, 2011.

[5] A. Ebrahiminia, M. Mokhtari-Dizaji, T. Toliyat, "Correlation between iodide dosimetry and terephthalic acid dosimetry to evaluate the reactive radical production due to the acoustic cavitation activity," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 20, pp. 366-372, 2013.

[6] P.R. Gogate, et al., "Cavitation reactors: Efficiency assessment using a model reaction," AIChE Journal, vol. 47, pp. 2526-2538, 2001.

[7] M. Safari, et al., "Maintenance of membrane integrity and increase of taxanes production in hazel (Corylus avellana L.) cells induced by low-intensity ultrasound," Ultrasound in Medicine and Biology (UMB), vol. 34, pp. 1137-1141, 2012.

[8] B.P. Bamber, S.J. Putterman, "Light scattering measurements of the repetitive supersonic implosion of a sonoluminescing bubble," Physical Review Letters (PRL), vol. 69, pp. 3839-3842, 1992.

[9] H.N. McMurray, B.P. Wilson, "Mechanistic and spatial study of ultrasonically induced luminol chemiluminescence," Journal of Physical Chemistry A, vol. 103, pp. 3955-3962, 1999.

[10] G.P. Shpenkov, "The nodal structure of standing spherical waves and the periodic law: What do they have in common?," Physics Essays, vol. 18, pp. 196-206, 2005.

[11] D. Krefting, R. Mettin, W. Lauterborn, "Two-frequency driven single-bubble sonoluminescence," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 112, pp. 1918-1927, 2002.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1393.2.1.5.8]