

# بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت بوسیله جریان‌های آکوستیک در یک محفظه بسته استوانه‌ای شکل

بهناز تاجیک<sup>۱</sup>؛ عباس عباسی<sup>۲\*</sup>؛ مجید صفاراول<sup>۳</sup>؛ امیر عبدالله<sup>۴</sup>؛ محمد کاظمی<sup>۵</sup>؛ حسین بابایی<sup>۶</sup>

چکیده

در این مقاله اثر جریان آکوستیک بر افزایش انتقال حرارت از یک گرمکن تخت افقی و رو به پایین در یک محفظه بسته استوانه‌ای شکل پر از آب، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. امواج ایستا بین منبع حرارتی، به عنوان منعکس‌کننده و صفحه مرتعش پایینی ایجاد می‌شود. جریان آکوستیک، یک جریان پایدار چرخشی است که توسط این میدان امواج ایستا، القا می‌شود. صفحه بالایی با شار حرارتی ثابت گرم شده و دیواره‌های کناری در یک دمای ثابت نگاه داشته می‌شوند. بنابراین اثرات گرانش در این مقاله ناچیز است و افزایش انتقال حرارت، به دلیل ارتعاشات فراصوت است. برای یافتن بهترین محدوده قدرت آکوستیک، فشار آکوستیک اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش انتقال حرارت می‌تواند به کمک ارتعاشات فراصوت، نزدیک به ۴۰۰٪ افزایش یابد. افزایش در توان ترانسیدوسر و کاهش در ارتفاع گرمکن، موجب افزایش ضریب انتقال حرارتی در محفظه می‌شود. همچنین افزایش کاویتاسیون به شدت موجب تضعیف افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

کلمات کلیدی: افزایش انتقال حرارت، جریان‌های آکوستیک، امواج ایستا، محفظه استوانه‌ای، فراصوت، کاویتاسیون

## *Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement by Acoustic Streaming in a Closed Cylindrical Enclosure*

B. Tajik, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, A. Abdullah, M. Kazemi and H. Babae

### ABSTRACT

In this study, the effect of acoustic streaming on heat transfer enhancement of a down-ward-facing horizontal heating surface in a closed cylindrical enclosure filled with water was investigated experimentally. Standing waves were generated between the heating source as a reflector and vibrating lower plate. Acoustic streaming is a steady circular flow induced by this standing waves field. The upper plate was heated with a constant heat flux and side-walls were kept at the constant temperature. Therefore, the gravitational effects were negligible and the heat transfer enhancement was due to ultrasonic vibrations. In order to find out the best range of ultrasonic power, the acoustic pressure was measured. The results show that the enhancement of the heat transfer can be up to 400% by the ultrasonic vibrations. The increase in the transducer power and the decrease in the height of the heater cause the higher heat transfer coefficient in the enclosure. In addition, the increase in cavitation phenomenon severely weakens the increase in heat transfer coefficient.

**KEYWORDS** : heat transfer enhancement, acoustic streaming, standing wave, cylindrical enclosure, ultrasonic, cavitation

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۲۳

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۳

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [behtajik@aut.ac.ir](mailto:behtajik@aut.ac.ir)

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول و استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [abbassi@aut.ac.ir](mailto:abbassi@aut.ac.ir)

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [mavval@aut.ac.ir](mailto:mavval@aut.ac.ir)

<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [amirah@aut.ac.ir](mailto:amirah@aut.ac.ir)

<sup>۵</sup> کارشناس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [m\\_kazemi\\_110@yahoo.com](mailto:m_kazemi_110@yahoo.com)

<sup>۶</sup> کارشناس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ [babae.hs@gmail.com](mailto:babae.hs@gmail.com)

این حال، بوجود آمدن حباب‌های کاویتاسیون نیازمند ارتعاشات فراصوت با توان بسیار بالا است [۴] و این پدیده می‌تواند باعث خوردگی و تخریب سطوح حساس شود.

اثر جریان آکوستیک در فرایندهای انتقال حرارت در چند کار تحقیقاتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است، [۳] تا [۱۵]. رویکردهای تجربی در این زمینه را می‌توان به ۳ گروه دسته‌بندی نمود: مطالعه انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محیط‌های گازی [۵] تا [۸] یا مایعات [۳]، [۴]، [۱۰] تا [۱۲]. اثر ارتعاشات مافوق صوت بر روی انتقال حرارت هنگام تغییر فاز [۳]، [۱۴] و همچنین اثر آن در جابجایی اجباری [۳]، [۱۵]. در این موارد، پارامترهای مؤثر تجربی مانند توان امواج فراصوت (توان ورودی ترانسدیوسر)، فرکانس و فاصله بین منبع حرارتی و منبع مرتعش مورد بررسی قرار گرفته است. همه پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهند که باوجود جریان‌های آکوستیک، بدون در نظر گرفتن نوع انتقال حرارت (جابجایی طبیعی، انتقال حرارت در تغییر فازها و ...)، فرایند انتقال حرارت، می‌تواند به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. در رابطه با جریان‌های آکوستیک تولید شده توسط میدان امواج ایستا، افت دما در منبع حرارتی به سبب ارتعاشات فراصوت، وابستگی شدیدی به فاصله بین سطح مرتعش و سطح ثابت (منبع حرارتی) دارد و هنگامی که این فاصله برابر مضربی از نصف طول موج می‌شود، این افت دما به مقدار بیشینه خود می‌رسد [۸].

اشاره به این نکته لازم است که القای امواج با شدت بالا و در فضاهای با ابعاد کوچک، در صورتی که منجر به شکل‌گیری میدان امواج ایستا نشود، به دلیل آزادی حرکت نقاط مختلف سیال و سرعت بالای نوسانات می‌تواند منجر به ایجاد جریان مغشوش در سیال شود. اما همان‌طور که گفته شد، جریان آکوستیکی که تحت اثر میدان امواج ایستا در سیال شکل می‌گیرد، جریانی منظم و آرام است. به بیان دیگر، در امواج ایستا با وجود نوسانات بسیار سریع، همه نقاط میدان تحت اثر میدان امواج ایستا قرار دارند و تغییرات منظم و پیوسته‌ای دارند. این بدان معناست که هیچ نقطه‌ای امکان حرکت اتفاقی و آزادانه که منجر به اغتشاش شود را ندارد و جریان‌های ایجاد شده در سیال اثر گرفته از میدان فشار ایستا هستند. در نتیجه شکل جریان‌های چرخشی ایجاد شده در سامانه، تابع نواحی تشکیل‌گره و شکم در میدان امواج ایستا و نیز مرزهای جامد سامانه است. البته گفتنی است که در محیط مایع، اگر دامنه نوسان بیش از حد افزایش یابد، نوسانات فشار در نقاط شکم نیز افزایش می‌یابد که در این صورت پدیده کاویتاسیون در

جریان‌های آکوستیک، جریان‌های چرخشی پایداری هستند که در نزدیکی سطوح سخت و اجزاء مرتعش و همچنین در نزدیک دیواره‌های مرزی در یک میدان صوتی با شدت بالا ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر در یک میدان امواج ایستا، اصطکاک بین سیال و جزء مرتعش می‌تواند بعنوان القاکننده جریان آکوستیک عمل نماید. در اینجا مهم نیست که منبع جابجایی نسبی، نوسانات آکوستیک در سیال است یا ارتعاشات موجود در سطوح سخت [۱]. به طور کلی دو نوع جریان آکوستیک وجود دارد: جریان اکارت<sup>۱</sup> و جریان ریلی<sup>۲</sup>. جریان ریلی، جریانی با مقیاس بزرگ است که در اطراف سطوحی که در میان امواج ایستا قرار دارند، تشکیل می‌شود و اندازه این نوع جریان‌ها به کمک طول موج آکوستیک تعیین می‌شود. این نوع جریان بوسیله نیروهای چسبندگی ایجاد می‌شوند. ولی جریان اکارت در پدیده‌هایی با مقیاس بزرگ و در میدان‌های موجی غیرایستا بوجود می‌آید. اندازه الگوهای جریانی در جریان اکارت توسط محدوده فیزیکی تعیین می‌شود. گرادیان فشار ناشی از جذب موج آکوستیک در حین انتشار، نیروی محرک این جریان است. سرعت‌های جریان در فرکانس‌های بالاتر به دلیل جذب بیشتر، بزرگتر است و به سبب همین ویژگی، جریان اکارت را می‌توان در فرکانس‌های بالا و در حد مگاهرتز دید [۲]. گفتنی است امواج با فرکانس بالا در حد مگاهرتز در مقایسه با فرکانس‌های محدوده کیلوهرتز، به‌طور عمومی دامنه نوسان بسیار کوچک‌تری دارند. بنابراین گرادیان‌های فشار و در نتیجه سرعت جریان‌های آکوستیک نوع اکارت نیز در مقایسه با جریان‌های ریلی بسیار کوچک‌تر است. همچنین با اعمال ارتعاشات فراصوت به مایعات، نوسانات فشاری بوجود می‌آید و در نتیجه حباب‌های کاویتاسیون به دلیل وجود این ارتعاشات در گستره فرکانسی ۱۵ تا ۱۸ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد. هر دو عامل یعنی جریان آکوستیک و کاویتاسیون به میزان قابل توجهی باعث افزایش انتقال حرارت در مایعات می‌شوند. انتقال حرارت توسط جریان آکوستیک را می‌توان به کمک جابجایی اجباری و افزایش انتقال حرارت به کمک کاویتاسیون را توسط هدایت حرارتی مغشوش در میکروجت‌ها توصیف نمود. جابجایی اجباری در مقیاس بزرگ که توسط جریان‌های آکوستیک ایجاد می‌شود، می‌تواند در خنک‌کنندگی سطوح گرمایی وسیع بکار رود، در حالی که جابجایی در مقیاس بسیار کوچک که توسط کاویتاسیون ایجاد می‌شود، برای خنک‌کنندگی سطوح گرمایی کوچک کارایی بیشتری دارد [۳]. با

این نواحی و اغتشاشات ناشی از آن مطرح خواهد شد.

تاکنون تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی این جریان توسط محققان انجام شده است. همچنین تصاویر این جریان‌ها و اندازه‌گیری سرعت‌ها، به‌خصوص برای محیط گازی، توسط افراد مختلف انجام شده است که بر آرام و منظم بودن این جریان‌ها دلالت دارد. به‌عنوان مثال در مراجع [۵] تا [۷] علاوه بر ارائه شبیه‌سازی، تصاویری از این جریان‌ها در محیط گازی نشان داده شده است. تشریح فیزیک و روابط حاکم بر این جریان‌ها نیز در فصل کاملی از کتاب مرجع [۱۶] بیان شده است.

بسیاری از مطالعات در ارتباط با جابجایی طبیعی، توجه خود را بر روی انتقال حرارت از یک سطح گرمایی بسیار کوچک (مثل یک سیم داغ) و یا در فاصله‌ای بسیار کوچک، [۳] تا [۱۰]، متمرکز نموده‌اند. همچنین سیال مورد آزمایش در بسیاری از تحقیقات، یک گاز ایده‌آل مانند هوا است [۵] تا [۸]. هدف این تحقیق مقایسه انتقال حرارت از یک منبع حرارتی افقی (گرمکن تخت) با وجود جریان آکوستیک و نیز عدم وجود آن، در یک محفظه استوانه‌ای شکل بسته است که از آب پر شده است. از منظری دیگر در مطالعات قبلی، منبع حرارتی درون آب و داخل یک میدان موج ایستا قرار داده شده بود که این میدان بین یک صفحه مرتعش و یک صفحه ثابت دیگر ایجاد شده [۳]، [۴]، [۱۰] تا [۱۵]. اما در سامانه آزمایش این تحقیق، منبع حرارتی، صفحه‌ای ثابت است و موج ایستا در بین منبع حرارتی بعنوان یک منعکس‌کننده امواج و منبع مرتعش بوجود می‌آید. در نتیجه می‌توان فرض نمود که جریان آکوستیک تولید شده یک جریان خالص است و بوسیله تلاطم ناشی از اجزاء دیگری مانند منبع حرارتی که در درون میدان جریان قرار دارد، اثر نمی‌پذیرد. در مراحل مختلف آزمایش، ارتفاع گرمکن برابر با مضربی از نصف طول موج تنظیم شد تا جریان آکوستیک قدرت‌مندی ایجاد شود. در این تحقیق، اثر پارامترهای مؤثری مانند ارتفاع گرمکن، توان ورودی ارتعاشات فراصوت و توان ورودی گرمکن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین با اندازه‌گیری فشار آکوستیک در صفحه بالایی، بروز پدیده کاویتاسیون در توان‌های آکوستیک مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- روش اجرای آزمایش

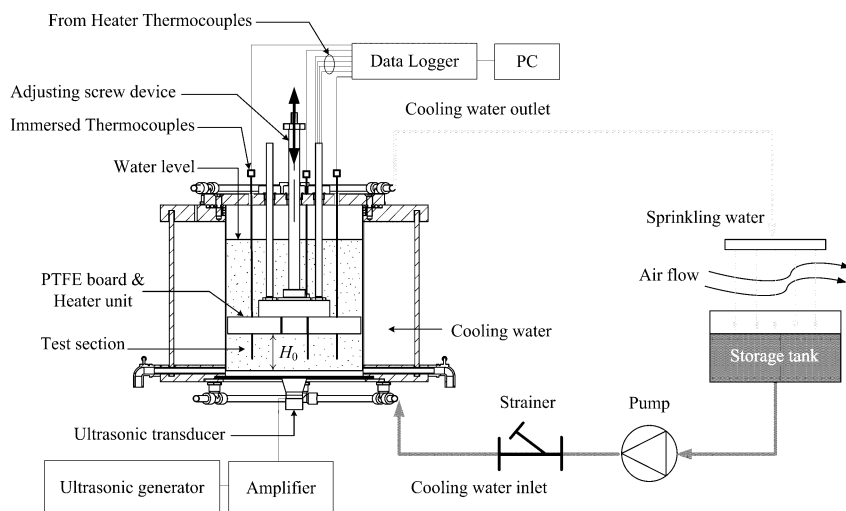
سامانه آزمایشگاهی در شکل (۱) نمایش داده شده است. آزمایش‌ها درون یک حمام فراصوت دست‌ساز که از دو استوانه هم‌محور تشکیل شده است، انجام می‌شود. قطر داخلی

و ارتفاع استوانه داخلی به‌ترتیب برابر با ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر است. دیواره‌های کناری و بخش زیرین استوانه داخلی از فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر ساخته شده است. این استوانه در واقع بخش اصلی در آزمایش انتقال حرارت محسوب می‌شود. این بخش توسط آب مقطر پر می‌شود که این آب به مدت ۲۰ دقیقه پیش از انجام آزمایش جوشانده شده است تا گازهای محلول در آن به حداقل برسد و احتمال پدیده کاویتاسیون کاهش یابد. منبع ارتعاشات فراصوت، یک ترانسدویسر فراصوت پیزوالکتریک با فرکانس ارتعاش ۱۸ کیلوهرتز است که قطر کلگی آن برابر با ۶۰ میلی‌متر است و به‌طور دقیق در مرکز صفحه فولادی و در کف مخزن چسبانده شده است. امواج فراصوت توسط سطح بالایی این صفحه فولادی و رو به بالا در درون آب منتشر می‌شود. توان ورودی ترانسدویسر به‌عنوان توان آکوستیک ارتعاشات فراصوت، مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

ارتفاع آب، بر ایجاد حالت تشدید در حمام آب اثر زیادی دارد [۱۰]. به‌همین دلیل، برای حفظ شرایط مشابه در آزمایش‌ها، محفظه درون مخزن تا ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر از آب پر می‌شود. این ارتفاع برای پایدارسازی شرایط تشدید در فرکانس هارمونیک اصلی ترانسدویسر، انتخاب شده است. سطح آب توسط یک شیر باز در بالای مخزن اصلی با محیط در ارتباط است. دمای دیواره‌های کناری توسط آب خنک‌کننده ثابت نگاه داشته می‌شود. آب خنک‌کننده خروجی درون یک مخزن ذخیره روباز پاشیده می‌شود تا دوباره خنک شود. دو ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای آب خنک‌کننده ورودی و خروجی استفاده شده است. اختلاف بین این دو دما در روند آزمایش‌ها کمتر از ۰/۵ درجه سلسیوس بود. با توجه به این موضوع که دقت ترموکوپل‌ها  $1/5 \pm$  °C است، می‌توان فرض نمود که دمای دیواره‌های کناری در روند آزمایش‌ها همواره ثابت باقی مانده است.

در این سامانه از یک گرمکن تخت به شکل قرص نازکی از جنس میکا با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به‌عنوان یک منبع حرارتی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، گرمکن تخت بر روی یک صفحه دایره‌ای مسی با قطر ۱۱۸ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر پیچ شده است تا شار حرارتی ثابتی تولید نماید. برای اینکه بتوان بهترین اتصال را میان گرمکن تخت و صفحه مسی ایجاد نمود، از یک لایه نازک خمیر سیلیکون استفاده شد.





شکل (۱): وسیله آزمایش.

بالای صفحه مرتعش در آب شناورند، اندازه‌گیری می‌شود. از آنجاییکه این ترموکوپل‌های سیمی شکل قطر بسیار نازکی دارند، به‌طور تقریب هیچ تلاطم ناخواسته‌ای را در محفظه ایجاد نمی‌نمایند. مقدار متوسط این سه دما بعنوان دمای حجمی متوسط در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. در روند آزمایش، بیشترین تفاوت دمای بین این ترموکوپل‌های حجمی  $2^{\circ}\text{C}$  بود. در مجموع از ۱۰ ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما استفاده شد و مقادیر متناظر با زمان واقعی، توسط ذخیره‌کننده داده (شرکت تستو، واحد کنترل ۴۵۴) که به رایانه وصل شده بود ثبت می‌گردید. همه ترموکوپل‌های مورد استفاده مدل K هستند و دقتی برابر  $1/5^{\circ}\text{C} \pm$  (شرکت تستو، کلاس ۱) دارند. دماهای اندازه گرفته شده عبارتند از:

- دمای چهار نقطه مختلف از گرمکن تخت.
- دمای حجمی در سه نقطه مختلف از حجم آبی که بین صفحه مرتعش و گرمکن تخت قرار دارد.
- دمای آب خنک‌کننده ورودی.
- دمای آب خنک‌کننده خروجی.
- دمای محیط.

برای تعیین طول موج ارتعاشات فراصوت دانستن سرعت دقیق صوت لازم است. از این رو برای اطمینان بیشتر، سرعت صوت برای دماهای مختلف و در شرایط آزمایشگاهی به‌کمک دو حسگر<sup>۱</sup> فراصوت اندازه‌گیری شد. از آنجا که شار حرارتی توسط منبع گرمایش در راستای رو به پایین هدایت می‌شود، تغییرات دما در دمای حجمی و در راستای عمودی ناچیز است؛ به‌همین دلیل برای محاسبه طول موج ارتعاشات از دمای حجمی استفاده شد.

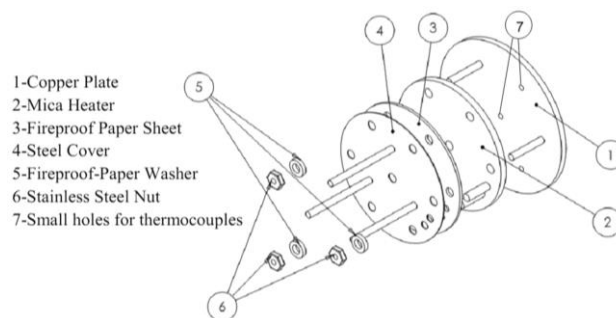
سطح پایینی صفحه مسی بعنوان منبع حرارتی با آب در تماس است و سطح بالایی آن توسط مواد عایق پوشانده شده تا از اتلاف گرما جلوگیری شود. برای قراردادن گرمکن در ارتفاعات مختلف و انجام آزمایش در هر یک از این حالت‌ها، از یک صفحه ضخیم مدور از جنس پی‌تی‌اف‌ای<sup>۲</sup> و با قطر ۱۲۴ میلی‌متر استفاده شد تا بتواند گرمکن تخت و صفحه مسی را در داخل مخزن اصلی به سمت بالا و پایین جابجا نماید.

برای آنکه هنگام جابجایی عمودی گرمکن امکان عبور آب از یک طرف مجموعه گرمکن به سمت دیگر آن فراهم شود، در لبه های صفحه پی‌تی‌اف‌ای چهار مجرا تعبیه شد. گرمکن به یک دسته پیچی قابل تنظیم که در بالای مخزن اصلی نصب شده است، متصل شد تا بتوان برای انجام آزمایش در ارتفاع‌های مختلف، گرمکن تخت را به‌صورت عمودی جابجا نمود. ارتفاع بخش گرمکن تخت توسط یک کولیس دیجیتال که به‌صورت ثابت بر روی محفظه اصلی قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود. چهار ترموکوپل نوع K (ساخت شرکت تستو، مدل ۱۵) بر روی چهار سوراخ کوچک که روی صفحه مسی تعبیه شده بودند، نصب شدند (بین صفحه مسی و گرمکن تخت). مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این ترموکوپل‌ها با خطای کمتر از  $0.1^{\circ}\text{C}$ ، بعنوان دمای سطح صفحه مسی در نظر گرفته می‌شود. همچنین میانگین مقادیر این چهار دما بعنوان دمای متوسط منبع حرارتی در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. شار حرارتی از تقسیم توان ورودی اندازه‌گیری شده گرمکن تخت ( $Q$ ) بر مساحت صفحه مسی ( $A$ ) بدست می‌آید ( $q_n = Q/A$ ).

دمای حجمی<sup>۳</sup> آب توسط سه ترموکوپل نوع K (ساخت شرکت تستو، مدل ۵۷۹۲ ۰۶۰۲) که در ارتفاع  $1/5$  سانتی‌متری

بماند. پس از رسیدن به تعادل دمایی اولیه در محفظه داخلی، از یک ولتاژ کنترل شده، برای تولید شار حرارتی ثابت توسط گرمکن استفاده می‌شود.

در کل سه مقدار توان ورودی (۴۰، ۶۰ و ۸۰ وات) به منبع حرارتی اعمال می‌شود تا اثر شار حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. در این مقادیر از شار حرارتی، انتقال حرارت در گستره جابجایی طبیعی قرار می‌گیرد که تبدیل فاز نیز در آن وجود ندارد. دمای گرمکن پس از اعمال شار حرارتی ثابت، پس از ۱۱ دقیقه به تعادل می‌رسد و تغییری در مقادیر دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها دیده نمی‌شود.



شکل (۲): جزئیات بخش گرمکن.

این امر سبب افزایش انتقال حرارت به روش جابجایی و نیز افت دما در منبع حرارتی می‌شود. پس از ایجاد یک میدان جریان آکوستیک در آب، حلقه‌های چرخشی در سیال شکل می‌گیرد. جریان‌های آکوستیک موجب رسیدن سیال گرم به نواحی دورتر در سیال و بالارفتن دمای حجمی می‌شوند و بدین ترتیب دمای حجمی به تدریج چند درجه‌ای افزایش می‌یابد؛ اما اختلاف بین دمای منبع گرمایی و دمای حجمی پس از رسیدن به شرایط حالت پایدار تغییر چندانی نمی‌نماید.

برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای تعین ضریب انتقال حرارت چهار دمای مربوط به منبع حرارتی و سه دمای حجمی، استفاده می‌شود. در نتیجه  $\bar{h}$  را می‌توان از راه میانگین دمای منبع حرارتی  $T_H$  و میانگین دمای حجمی  $T_\infty$  محاسبه نمود:

$$\bar{h} = q_n / (T_H - T_\infty) \quad (1)$$

به عنوان نمونه شکل (۴)، نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی را بر حسب زمان قبل و پس از اعمال امواج فراصوت، در حالتی که گرمکن در ارتفاع ۲/۲ قرار دارد نشان می‌دهد. برای آنکه امکان مقایسه بهتری بین هریک از حالت‌ها بر روی

فشار آکوستیک توسط یک هیدروفون کوچک (شرکت بی‌اندکی، مدل ۸۱۰۳) که به یک سیلوسکوپ متصل است اندازه‌گیری می‌شود. این هیدروفون رو به پایین و در کنار صفحه مسی گرمکن نصب شده است.

### ۳- روش آزمایش

برای بررسی اثر ارتفاع گرمکن تخت بر افزایش انتقال حرارت، ارتفاع گرمکن در مرحله اول برابر با  $\lambda$  (طول موج) تنظیم می‌شود و سپس به  $2\lambda/2$  و  $2\lambda$  افزایش می‌یابد. بخش خارجی مخزن اصلی در تماس با آب خنک‌کننده قرار دارد تا دمای دیواره‌های کناری در روند آزمایش همواره ثابت باقی

پس از رسیدن به این تعادل ثانویه، ارتعاشات فراصوت به سیال اعمال می‌شود. پس از آن، دمای منبع حرارتی ناگهان و به شدت شروع به پایین آمدن می‌نماید. بیش‌ترین افت دما که  $28^\circ\text{C}$  بود، در مدت زمانی کمتر از ۱ دقیقه ثبت شد. پس از این افت ناگهانی، دمای منبع گرم پس از گذشت ۳ الی ۵ دقیقه مجدد به تعادل می‌رسد که تا رسیدن به این تعادل همه دماها ثبت می‌شوند.

### ۴- نتایج آزمایش

شکل (۳) تغییرات دمایی منبع گرمایش و دمای حجمی آب، زمانی که ارتفاع گرمکن تخت برابر  $2\lambda/2$  است را نشان می‌دهد. در این شکل، توان ورودی ترانسدیوسر و توان گرمکن به ترتیب  $100/8$  و  $80$  وات می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، کاهش ناگهانی در دمای منبع حرارتی ( $27\sim 28^\circ\text{C}$ ) بلافاصله پس از اعمال توان فراصوت در زمان  $800$  ثانیه، رخ می‌دهد و دمای منبع حرارتی در یک فاصله زمانی کوتاه و به‌طور تقریبی در کمتر از ۱ دقیقه پایین می‌آید. علت آن است که وقتی صفحه پایینی شروع به لرزش می‌نماید، جریان‌های آکوستیک میان صفحه مرتعش و منبع حرارتی ایجاد می‌شود و

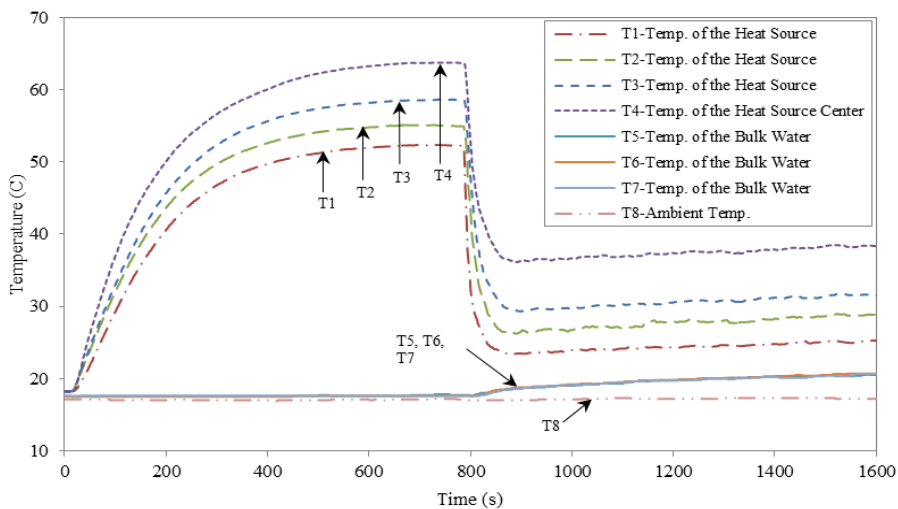
از آنجا که  $\bar{h} = q_n / (\Delta \bar{T})$ ، مقدار  $\Delta \bar{T} = \bar{T}_H - \bar{T}_\infty$  به عنوان متغیر وابسته مجهول در عدد ناسلت پدیدار می گردد. به همین سبب برای جلوگیری از روش تکرار، باید  $\Delta \bar{T}$  از عدد ریلی حذف شود که می توان این کار را با معرفی عدد ریلی اصلاح شده  $Ra_D^*$  که به صورت رابطه (۳) تعریف می شود، انجام داد [۱۷]:

$$Ra_D^* = Ra_D \overline{Nu}_D = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha} \frac{q_n D}{K_f \Delta T} = \frac{g \beta q_n D^4}{K_f \nu \alpha} \quad (3)$$

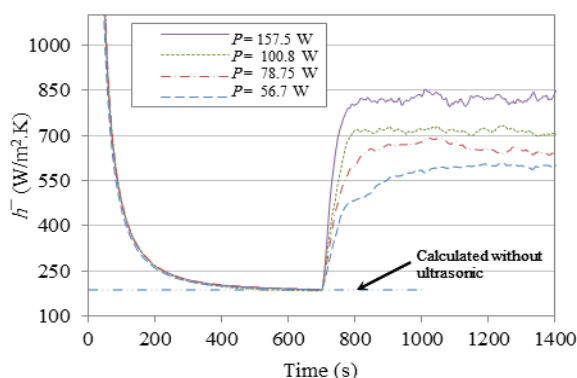
همه خواص سیال به ازای دمای  $\bar{T}_\infty$  جاگذاری می شود. در رابطه (۲)،  $Ra_D$  با  $Ra_D^* / \overline{Nu}_D$  جایگزین شده است، در نتیجه  $\Delta \bar{T}$ ، از رابطه (۲) و (۳) بدست می آید.

نمودار ایجاد شود، زمان آغاز ارتعاشات برای همه آزمایشها برابر با ۷۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، افزایش توان ورودی فراصوت منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت در همه ارتفاعها می شود و یک افزایش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت در اثر جریان آکوستیک به هنگام آغاز ارتعاش ترانسدیوسر فراصوت دیده می شود. ضریب انتقال حرارت متوسط در حالت سکون و بدون القای امواج را می توان از روابط آزمایشگاهی و تجربی محاسبه نمود [۱۶]. از این رو با توجه به داده های کادامی<sup>۱</sup> و درک<sup>۲</sup> برای صفحات دایره ای شکل با قطر D و در حالت افقی و پایدار، می توان رابطه (۲) را مورد استفاده قرار داد:

$$\overline{Nu}_D = 0.82 Ra_D^{1/5} Pr^{0.034} \quad (2)$$



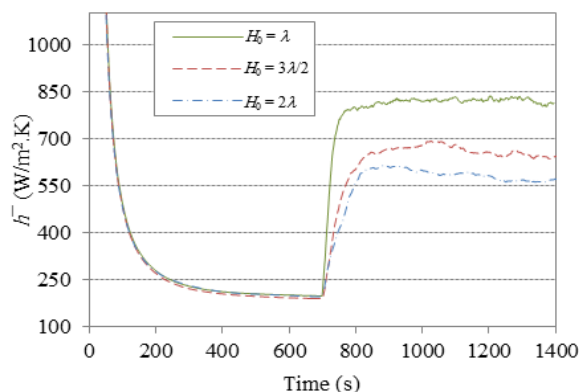
شکل (۲): دمای منبع گرمایش و دمای حجمی آب بر حسب زمان با و بدون وجود امواج ایستا ( $H_0 = 3\lambda/2, P = 100/8 \text{ W}, Q = 80 \text{ W}$ ).



شکل (۴): ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب زمان با و بدون وجود امواج ایستا، به ازای توان های فراصوت مختلف ( $Q = 80 \text{ W}$ ،  $H_0 = 3\lambda/2$ ).

شکل (۵) ضریب انتقال حرارت متوسط را در توان های مختلف گرمکن و در ارتفاع  $3\lambda/2$  نشان می دهد. در این شکل

حال باید به محاسبات باز گردیم و تمام خواص، بجز  $\beta$  را در دمای  $T_f = \bar{T}_\infty + (\Delta \bar{T} / 2)$  بدست آوریم. بنابراین  $\Delta \bar{T}$  و  $\bar{h}$  تصحیح شده برای همه حالتها تخمین زده می شود. وقتی که دمای حجمی برابر با  $20^\circ \text{C}$  است، برای توان های ورودی گرمکن ۸۰، ۶۰ و ۴۰ وات، ضریب انتقال حرارت متوسط به ترتیب برابر ۱۸۷، ۱۷۵ و ۱۶۰ ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) است. این بدان معناست که اگر توان گرمکن از ۴۰ وات به ۶۰ وات افزایش یابد، ضریب انتقال حرارت به طور تقریبی به اندازه ۹/۳٪ افزایش می یابد. مقدار محاسبه شده در حالت سکون برای توان ۸۰ وات در شکل (۴) نشان داده شده است تا بتوان آن را با نتایج تجربی مقایسه نمود.



شکل (۶): ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط بر حسب زمان در  $H_0$  های مختلف ( $P=78/75$  W,  $Q=80$  W).

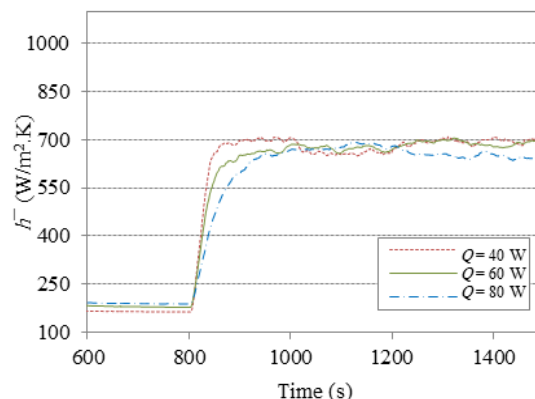
برای اینکه بتوان اثر امواج ایستا را بصورت یک کمیت بیان نمود، ضریب افزایش  $EF$  به عنوان نسبتی از  $\bar{h}$  با وجود امواج فراصوت به مقدار  $\bar{h}$  بدون وجود امواج فراصوت تعریف می شود:

$$EF = \frac{\bar{h} \text{ with ultrasonic}}{\bar{h} \text{ without ultrasonic}} \quad (4)$$

مقادیر ضریب افزایش  $EF$  برای حالت های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده، ضریب افزایش از مقدار  $1/62$  در  $H_0=2\lambda$  و در توان فراصوت  $56/7$  وات تا مقدار  $3/94$  در  $H_0=\lambda$  و در توان فراصوت  $157/5$  وات تغییر می نماید. بدین معنی که با یک توان فراصوت کوچک (کمتر از  $160$  وات) و داخل حجم کوچکی از آب، ضریب انتقال حرارت بدون هیچ پمپی نزدیک به  $40\%$  افزایش می یابد.

نکته مهمی که در القای امواج آکوستیک باید در نظر داشت، این است که ارتعاشات فراصوت به طور طبیعی، به دلیل نوسانات سریعی که در سیال ایجاد می نماید، موجب تشکیل حباب های بسیار ریزی در سیال می شود. این حباب های میکروسکوپی که به طور عموم با چشم دیده نمی شوند، در قدرت های بالای آکوستیک، به بصورت کائیتاسیون به شدت افزایش می یابد. همان گونه که در قبل اشاره شد، کائیتاسیون علاوه بر اثرات فرسایشی، در زمینه افزایش انتقال حرارت از سطوح گرمایی با مقیاس بزرگ چندان مؤثر نخواهد بود. از سوی دیگر افزایش تشکیل حباب موجب افت امواج القایی در فواصل دورتر و نیز موجب اغتشاشات نامنظم در جریان های آکوستیک و تضعیف این جریان ها و در نتیجه کاهش اثرات مطلوب آن ها در انتقال حرارت می شود.

ارتعاشات فراصوت پس از  $800$  ثانیه از روشن شدن گرمکن اعمال می شود.



شکل (۵): ضریب انتقال حرارت متوسط در توان های مختلف گرمکن، بر حسب زمان ( $H_0=2\lambda/2$ ,  $P=78/75$  W).

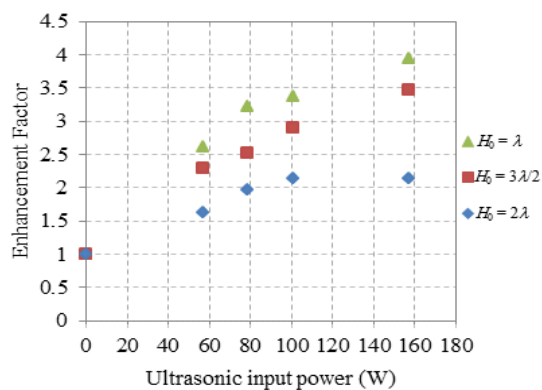
همان طور که دیده می شود، در حالت پایدار آغازی و در نبود ارتعاشات فراصوت،  $\bar{h}$  با توان گرمکن متناسب است که این مسأله مشابه مقادیر محاسبه شده است. در شروع زمان ارتعاشات نیز چنین شرایطی حاکم است اما پس از ایجاد جریان آکوستیک، برخی نوسانات رخ می دهد و همان طور که دیده می شود، در ضرایب انتقال حرارت به ازای توان های مختلف گرمکن، تفاوت زیادی دیده نمی شود. به عبارت دیگر تغییرات ضریب انتقال حرارت در اثر تغییر توان گرمکن در مقایسه با افزایش آن در اثر جریان آکوستیک بسیار کوچک و قابل چشم پوشی است.

شکل (۶) نیز تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب زمان را در بود و نبود جریان آکوستیک، در ارتفاع های مختلف گرمکن نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود،  $\bar{h}$  با افزایش  $H_0$  کاهش می یابد. زیرا با فرض ثابت بودن توان ترانسدیوسر، در ارتفاع های بیشتر، انرژی امواج به حجم بزرگتری از سیال منتقل می شود و در نتیجه انرژی لازم برای شکل گیری جریان آکوستیک کاهش می یابد. این مسئله در توان های فراصوت مختلف دیده شد.

پدیده کاویتاسیون به دلیل کاهش فشار آکوستیک و اثرات میراکندگی که در امواج ایجاد می‌نماید، سیر صعودی افزایش انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر در توان‌های بیش از ۱۰۰/۸ وات شیب ضریب افزایش در همه ارتفاع‌ها کاهش یافته است. این امر بخصوص با افزایش ارتفاع شدت می‌یابد تا آنجا که در ارتفاع  $2\lambda$  به‌ازای افزایش توان آکوستیک از ۱۰۰/۸ به ۱۵۷/۵ وات،  $EF$  تغییر چندانی نمی‌نماید. این بدان معنی است که افزایش توان آکوستیک بیش از این مقدار مقرون به صرفه نیست و فقط موجب افزایش کاویتاسیون و خوردگی بیشتر اجزا خواهد شد.

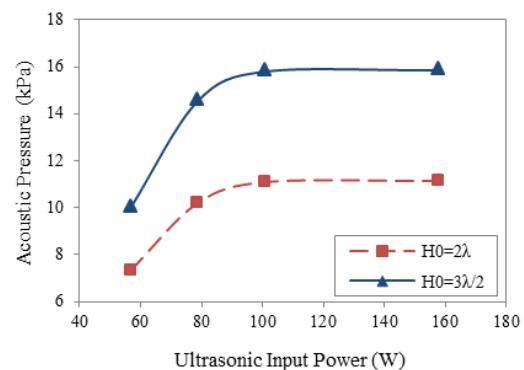
## ۵- نتیجه‌گیری

افزایش انتقال حرارت از منبع حرارتی افقی (تخت) رو به پایین توسط جریان آکوستیک، در داخل یک محفظه استوانه‌ای شکل بصورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته است. منبع حرارتی دارای شار حرارتی ثابت است و کف مخزن در راستای قائم توسط یک ترانسدیوسر فراصوت نوسان می‌نماید. جریان آکوستیک بر اثر امواج ایستا بین منبع حرارتی و صفحه مرتعش تولید می‌شود. ضریب انتقال حرارت به‌ازای ارتفاع‌های مختلف قرارگیری گرمکن نسبت به صفحه مرتعش و نیز به‌ازای توان‌های ورودی متفاوت برای ترانسدیوسر و گرمکن اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت می‌تواند به کمک ارتعاشات فراصوت در حالت بیشینه نزدیک به ۴۰٪ افزایش یابد. با توجه به جهش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت پس از روشن شدن ترانسدیوسر و نیز تعادل سریعی که پس از آن دیده می‌شود به نظر می‌رسد القای امواج فراصوت می‌تواند به‌عنوان یک روش سریع و آبی برای خنک‌کاری سطوح گرم به‌کار رود. از سوی دیگر انتقال حرارت با کاهش ارتفاع گرمکن یا به‌عبارت دیگر با نزدیک شدن گرمکن به صفحه مرتعش افزایش چشم‌گیری می‌یابد. این بدان معناست که با حجم کم‌تری از سیال خنک‌کننده می‌توان اثرات خنک‌کنندگی بهتری را دید که این امر به‌معنای سبک‌تر شدن سامانه خنک‌کاری است. به‌جز حجم کمی از سیال که برای خنک‌کاری مورد نیاز است، برق مصرفی ترانسدیوسر نیز در مقایسه با برق مصرفی پمپ‌های رایج بسیار کم است. نکته دیگر این که برای افزایش ضریب انتقال حرارت هیچ‌گونه تغییری مانند اضافه نمودن پره یا کوئل در منبع حرارتی انجام نشده است. به‌عبارت دیگر اگر منبع گرمایش در تماس با یک سیال انتقال حرارتی قرار داشته باشد، با القای امواج فراصوت در فاصله‌ای مناسب در سیال و ایجاد امواج ایستا می‌توان سطح



شکل (۷): اثر توان ورودی ترانسدیوسر بر ضریب افزایش

یکی از روش‌هایی که می‌توان بوسیله آن پدیده کاویتاسیون و شدت و ضعف تشکیل حباب را در میدان جریان مورد بررسی قرار داد، اندازه‌گیری فشار آکوستیک توسط هیدروفون است. هرچه امواج دریافت شده توسط هیدروفون منظم‌تر، قوی‌تر و بدون اغتشاش باشد نشانگر ضعیف‌تر بودن پدیده کاویتاسیون است. نتایج مربوط به اندازه‌گیری فشار صوت در صفحه بالایی برحسب قدرت آکوستیک در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات فشار آکوستیک در صفحه بالایی و در کنار گرمکن بر حسب توان ورودی ترانسدیوسر

همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش توان آکوستیک از ۷۸/۷۵ به ۱۰۰/۸ وات، از شیب فشار آکوستیک کاسته می‌شود، تا آنجا که پس از آن شیب نمودار به‌طور تقریبی به صفر می‌رسد. به‌عبارت دیگر با افزایش توان آکوستیک، امواج فشاری که به هیدروفون می‌رسد افزایش چندانی نمی‌یابد. زیرا نوسانات شدیدتر موجب تشکیل حباب‌های بیشتر و در نتیجه افت بیشتر در فشار آکوستیک می‌شود. تشکیل و ترکیدن این حباب‌ها امواج بسیار کوچکی ایجاد می‌نماید که اثرات آن را می‌توان به‌صورت اغتشاش و تداخل با امواج اصلی در اسیلوسکوپ دید. در واقع همین تداخل امواج است که موجب کاهش دامنه فشار آکوستیک در هیدروفون می‌شود. از مقایسه شکل (۷) و شکل (۸) می‌توان دریافت که افزایش



|                   |  |
|-------------------|--|
| $H_0$             | ارتفاع گرمکن از کف مخزن،   |
| $K_f$             | ضریب هدایت حرارتی،<br>$W m^{-1} K^{-1}$  |
| $\overline{Nu_D}$ | عدد ناسلت با استفاده از قطر<br>صفحه دایره ای $(\overline{hD} / K_f)$                         |
| $P$               | توان ورودی ترانسدیوسر، $W$   |
| $Pr$              | عدد پرائنتل $(D / \alpha)$   |
| $q_n$             | شار حرارتی، $W m^{-2}$   |
| $Q$               | توان گرمکن، $W$  |
| $Ra_D$            | عدد ریلی با استفاده از قطر<br>صفحه دایره ای<br>$(g \beta (T_H - T_\infty) D^3 / \nu \alpha)$ |
| $t$               | زمان، $s$  |
| $\overline{T}$    | دمای میانگین، $^\circ C$   |

### علائم یونانی

|                |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| $\alpha$       | ضریب انتشار حرارتی، $m^2 s^{-1}$     |
| $\beta$        | ضریب انبساط حجمی<br>گرمایی، $K^{-1}$ |
| $\lambda$      | طول موج امواج صوتی، $m$              |
| $\nu$          | ویسکوزیته سینماتیکی، $m^2 s^{-1}$    |
| $\rho$         | چگالی سیال $kg m^{-3}$               |
| <b>زیرنویس</b> |                                      |
| $H$            | مقادیر مربوط به منبع حرارتی          |
| $\infty$       | مقادیر حجمی (بالک)                   |

گرم را به سرعت خنک نمود. همچنین تغییر ضریب انتقال حرارت به دلیل توان‌های گرمکن متفاوت، در مقایسه با افزایشی که در اثر جریان آکوستیک می‌یابد، کوچک و قابل چشم‌پوشی است. علاوه بر این میزان افزایش انتقال حرارت، با افزایش توان فراسوت افزایش می‌یابد، ولی افزایش بیش از حد توان آکوستیک نیز مناسب نیست، زیرا موجب افزایش کاویتاسیون و تضعیف اثرات جریان‌های آکوستیک می‌شود و در نتیجه بر روی ضریب انتقال حرارت اثرات کاهنده خواهد داشت. به عبارت دیگر ضریب انتقال حرارت با وجود کاویتاسیون افزایش چندانی نخواهد یافت و افزایش توان آکوستیک بیش از یک حد معین مقرون به صرفه نخواهد بود.

### ۶- تقدیر و تشکر

تهیه‌کنندگان این مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (ریاست جمهوری) به-دلیل حمایت مالی اعلام می‌دارند.

### ۷- فهرست علائم

|                |   |
|----------------|---|
| $A$            | مساحت منبع حرارتی، $m^2$                                |
| $C_0$          | سرعت صوت، $m s^{-1}$                                    |
| $D$            | قطر صفحه گرمکن، $m$                                     |
| $EF$           | ضریب افزایش   |
| $f$            | فرکانس ارتعاشات، $kHz$                                  |
| $g$            | شتاب گرانش، $m s^{-2}$                                  |
| $\overline{h}$ | ضریب انتقال حرارت<br>جابجایی میانگین، $W m^{-2} K^{-1}$ |

### ۸- مراجع

- |   |   |
|---|---|
| Ro, P.I., Loh, B., "Feasibility of using ultrasonic flexural waves as a cooling mechanism", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48, No. 1, pp. 143-150, 2001. [5]  | Loh, B., Hyun, S., Ro, P.I., Kleinstreuer, C., "Acoustic streaming induced by ultrasonic flexural vibrations and associated enhanced of convective heat transfer", Journal of the Acoustical Society of America, 111, No. 2, pp. 875-883, 2002. [1] |
| Wu, T., Ro, P.I., "Heat Transfer Performance of a Cooling System using Vibration Piezoelectric Beams", Journal of Micromechanics and Microengineering, 15, pp. 213-220, 2005. [6]   | Aktas, M.K., "Thermoacoustically Induced and Acoustically Driven Flows and Heat Transfer in Enclosures", PhD thesis, Drexel University, May 2004. [2]   |
| Hyun, S., Lee, D., Loh, B., "Investigation of Convective Heat Transfer Augmentation using Acoustic Streaming Generated by Ultrasonic Vibrations", International journal of Heat and mass Transfer, 48, pp. 703-718, 2005. [7] | Nomura, S., Nakagawa, M., "Heat Transfer Enhancement by Ultrasonic Vibration", Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference 4, pp. 275-282, 1995. [3]  |
| Lee, D., Loh, B., "Smart Cooling Technology Utilizing Acoustic Streaming", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 30, No. 4, pp. 691-699, Dec 2007. [8]  | Nomura, S., Murakami, K., Aoyama, Y., Ochi, J., "Effects of Changes in Frequency of Ultrasonic Vibration on Heat Transfer", Heat Transfer-Asian Researches, 29, No. 5, pp. 358-372, 2000. [4]   |



- Zhou, D.W., Liu, D.Y., Hu, X.G., Ma, C.F., "Effect of Acoustic Cavitation on Boiling Heat Transfer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, pp. 931-938, 2002. [۱۳]
- Kim, H., Kim, Y.G., Kang, B.H., "Enhancement of Natural Convection and Pool Boiling Heat Transfer via Ultrasonic Vibration", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, pp. 2831-2840, 2004. [۱۴]
- Fairbanks, H.V., "Influence of Ultrasound Upon Heat Transfer Systems", *Ultrasonic Symposium*, pp. 384-387, 1979. [۱۵]
- Hamilton M.F., Blackstock D.T., "Nonlinear Acoustics", Academic Press, California, U.S.A., 1998. [۱۶]
- Lienhard IV, J.H., Lienhard V, J.H., "A Heat Transfer Textbook", Phlogiston Press, Third Edition, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2006. [۱۷]
- Iida, Y., Tsutsui, K., Ishii, R., Yamada, Y., "Natural-Convection Heat Transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 24, No. 6, pp. 794-796, 1991. [۹]
- Nomura, S., Yamamoto, A., Murakami, K., "Ultrasonic Heat Transfer Enhancement using a Horn-Type Transducer", *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 41, No. 5 B, pp. 3217-3222, May 2002. [۱۰]
- Yukawa, H., Hoshino, T., Saito, H., "The Effect of Ultrasonic Vibrations on Free Convective Heat Transfer from Heated Wire to Water", *Heat Transfer-Japanese Research*, 5, No. 1, pp. 37-49, 1976. [۱۱]
- Yukawa, H., Hoshino, T., Saito, H., "Effect of Ultrasonic Vibration on Free Convective Heat Transfer from an Inclined Plate in Water", *Heat Transfer-Japanese Research*, 5, No. 4, pp. 1-16, 1976. [۱۲]

## ۹- زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Eckart  
<sup>2</sup> Rayleigh  
<sup>3</sup> Polytetrafluoroethylene (PTFE)  
<sup>4</sup> Testo  
<sup>5</sup> Bulk  
<sup>6</sup> Probe  
<sup>7</sup> B&K  
<sup>8</sup> Kadambi  
<sup>9</sup> Drake

