بررسي تجربي افزايش انتقال حرارت بوسيله جريان‌هاي آکوستيک در يک محفظه بسته استوانه‌اي شکل

بهناز تاجيک[i]؛ عباس عباسي[ii] *؛ مجيد صفاراول[iii]؛ امير عبدا [iv]؛ محمد کاظمي[v]؛ حسين بابايي[vi]

چکيده

در اين مقاله اثر جريان آکوستيک بر افزايش انتقال حرارت از يک گرمکن تخت افقي و رو به پايين در يک محفظه بسته استوانه‌اي شکل پر از آب، به‌صورت تجربي مورد بررسي قرار گرفته است. امواج ايستا بين منبع حرارتي، به‌عنوان منعکس‌کننده و صفحه مرتعش پاييني ايجاد مي‌شود. جريان آکوستيک، يک جريان پايدار چرخشي است که توسط اين ميدان امواج ايستا، القا مي‌شود. صفحه بالايي با شار حرارتي ثابت گرم شده و ديواره‌هاي کناري در يک دماي ثابت نگاه داشته مي‌شوند. بنابراين اثرات گرانش در اين مقاله ناچيز است و افزايش انتقال حرارت، به‌دليل ارتعاشات فراصوت است. براي يافتن بهترين محدوده قدرت آکوستيک، فشار آکوستيک اندازه‌گيري شده است. نتايج نشان مي‌دهند که افزايش انتقال حرارت مي‌تواند به‌کمک ارتعاشات فراصوت، نزديک به ۴۰۰٪ افزايش يابد. افزايش در توان ترانسديوسر و کاهش در ارتفاع گرمکن، موجب افزايش ضريب انتقال حرارتي در محفظه مي‌شود. همچنين افزايش کاويتاسيون به شدت موجب تضعيف افزايش ضريب انتقال حرارت مي‌شود.

کلمات کليدي : افزايش انتقال حرارت، جريان‌هاي آکوستيک، امواج ايستا، محفظه استوانه‌اي، فراصوت، کاويتاسيون

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. Babaee

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.

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۹۰/۳/۲۳

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۳

[i] دانشجوي دکترا، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ behtajik@aut.ac.ir.

[ii] * نويسنده مسئول و استاد، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ abbassi@aut.ac.ir.

[iii] استاد، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ mavval@aut.ac.ir.

[iv] دانشيار، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ amirah@aut.ac.ir.

[v] کارشناس، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ m_kazemi_110@yahoo.com.

[vi] کارشناس، دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي امير کبير؛ babaee.hs@gmail.com.

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

۱- مقدمه

جريان‌هاي آکوستيک، جريان‌هاي چرخشي پايداري هستند که در نزديکي سطوح سخت و اجزاء مرتعش و هم‌چنين در نزديک ديواره‌هاي مرزي در يک ميدان صوتي با شدت بالا ايجاد مي‌شوند. به عبارت ديگر در يک ميدان امواج ايستا، اصطکاک بين سيال و جزء مرتعش مي‌تواند بعنوان القاکننده جريان آکوستيک عمل نمايد. در اينجا مهم نيست که منبع جابجايي نسبي، نوسانات آکوستيک در سيال است يا ارتعاشات موجود در سطوح سخت [۱]. به طور کلي دو نوع جريان آکوستيک وجود دارد: جريان اکارت[1] و جريان ريلي[2]. جريان ريلي، جرياني با مقياس بزرگ است که در اطراف سطوحي که در ميان امواج ايستا قرار دارند، تشکيل مي‌شود و اندازه اين نوع جريان‌ها به‌کمک طول موج آکوستيک تعيين مي‌شود. اين نوع جريان بوسيله نيروهاي چسبندگي ايجاد مي‌شوند. ولي جريان اکارت در پديده‌هايي با مقياس بزرگ و در ميدان‌هاي موجي غيرايستا بوجود مي‌آيد. اندازه الگوهاي جرياني در جريان اکارت توسط محدوده فيزيکي تعيين مي‌شود. گراديان فشار ناشي از جذب موج آکوستيک در حين انتشار، نيروي محرک اين جريان است. سرعت‌هاي جريان در فرکانس‌هاي بالاتر به دليل جذب بيش‌تر، بزرگ‌تر است و به‌سبب همين ويژگي، جريان اکارت را مي‌توان در فرکانس‌هاي بالا و در حد مگاهرتز ديد [۲]. گفتني است امواج با فرکانس بالا در حد مگاهرتز در مقايسه با فرکانس‌هاي محدوده کيلوهرتز، به‌طور عمومي دامنه نوسان بسيار کوچک‌تري دارند. بنابراين گراديان‌هاي فشار و در نتيجه سرعت جريان‌هاي آکوستيک نوع اکارت نيز در مقايسه با جريان‌هاي ريلي بسيار کوچک‌تر است.

هم‌چنين با اعمال ارتعاشات فراصوت به مايعات، نوسانات فشاري بوجود مي‌آيد و در نتيجه حباب‌هاي کاويتاسيون به‌دليل وجود اين ارتعاشات در گستره فرکانسي ۱۵ تا ۱۸ کيلوهرتز اتفاق مي‌افتد. هر دو عامل يعني جريان آکوستيک و کاويتاسيون به ميزان قابل توجهي باعث افزايش انتقال حرارت در مايعات مي‌شوند. انتقال حرارت توسط جريان آکوستيک را مي‌توان به‌کمک جابجايي اجباري و افزايش انتقال حرارت به کمک کاويتاسيون را توسط هدايت حرارتي مغشوش در ميکروجت‌ها توصيف نمود. جابجايي اجباري در مقياس بزرگ که توسط جريان‌هاي آکوستيک ايجاد مي‌شود، مي‌تواند در خنک کنندگي سطوح گرمايي وسيع بکار رود، در حالي‌که جابجايي در مقياس بسيار کوچک که توسط کاويتاسيون ايجاد مي‌شود، براي خنک‌کنندگي سطوح گرمايي کوچک کارايي بيش‌تري دارد [۳]. با اين حال، بوجود آمدن حباب‌هاي کاويتاسيون نيازمند ارتعاشات فراصوت با توان بسيار بالا است [۴] و اين پديده مي‌تواند باعث خوردگي و تخريب سطوح حساس شود.

اثر جريان آکوستيک در فرايندهاي انتقال حرارت در چند کار تحقيقاتي نيز مورد بررسي قرار گرفته است، [۳] تا [۱۵]. رويکردهاي تجربي در اين زمينه را مي‌توان به ۳ گروه دسته‌بندي نمود: مطالعه انتقال حرارت جابجايي طبيعي در محيط‌هاي گازي [۵] تا [۸] يا مايعات [۳]، [۴]، [۱۰] تا [۱۲]، اثر ارتعاشات مافوق صوت بر روي انتقال حرارت هنگام تغيير فاز [۳]، [۱۴] و هم‌چنين اثر آن در جابجايي اجباري [۳]، [۱۵]. در اين موارد، پارامترهاي مؤثر تجربي مانند توان امواج فراصوت (توان ورودي ترانسديوسر)، فرکانس و فاصله بين منبع حرارتي و منبع مرتعش مورد بررسي قرار گرفته است. همه پژوهش‌هاي قبلي نشان مي‌دهند که باوجود جريان‌هاي آکوستيک، بدون در نظر گرفتن نوع انتقال حرارت (جابجايي طبيعي، انتقال حرارت در تغيير فازها و ...)، فرايند انتقال حرارت، مي‌تواند به مقدار قابل توجهي افزايش يابد. در رابطه با جريان‌هاي آکوستيک توليد شده توسط ميدان امواج ايستا، افت دما در منبع حرارتي به‌سبب ارتعاشات فراصوت، وابستگي شديدي به فاصله بين سطح مرتعش و سطح ثابت (منبع حرارتي) دارد و هنگامي که اين فاصله برابر مضربي از نصف طول موج مي‌شود، اين افت دما به مقدار بيشينه خود مي‌رسد [۸].

اشاره به اين نکته لازم است که القاي امواج با شدت بالا و در فضاهاي با ابعاد کوچک، در صورتي که منجر به شکل‌گيري ميدان امواج ايستا نشود، به‌دليل آزادي حرکت نقاط مختلف سيال و سرعت بالاي نوسانات مي‌تواند منجر به ايجاد جريان مغشوش در سيال شود. اما همان‌طور که گفته شد، جريان آکوستيکي که تحت اثر ميدان امواج ايستا در سيال شکل مي‌گيرد، جرياني منظم و آرام است. به بيان ديگر، در امواج ايستا با وجود نوسانات بسيار سريع، همه نقاط ميدان تحت اثر ميدان امواج ايستا قرار دارند و تغييرات منظم و پيوسته‌اي دارند. اين بدان معناست که هيچ نقطه‌اي امکان حرکت اتفاقي و

آزادانه که منجر به اغتشاش شود را ندارد و جريان‌هاي ايجاد شده در سيال اثرگرفته از ميدان فشار ايستا هستند. در نتيجه شکل جريان‌هاي چرخشي ايجاد شده در سامانه، تابع نواحي تشکيل گره و شکم در ميدان امواج ايستا و نيز مرزهاي جامد سامانه است. البته گفتني است که در محيط مايع، اگر دامنه نوسان بيش از حد افزايش يابد، نوسانات فشار در نقاط شکم نيز افزايش مي‌يابد که در اين صورت پديده کاويتاسيون در اين نواحي و اغتشاشات ناشي از آن مطرح خواهد شد.

تاکنون تلاش‌هاي زيادي براي شبيه‌سازي اين جريان توسط محققان انجام شده است. هم‌چنين تصاوير اين جريان‌ها و اندازه‌گيري سرعت‌ها، به‌خصوص براي محيط گازي، توسط افراد مختلف انجام شده است که بر آرام و منظم بودن اين جريان‌ها دلالت دارد. به‌عنوان مثال در مراجع [۵] تا [۷] علاوه بر ارائه شبيه‌سازي، تصاويري از اين جريان‌ها در محيط گازي نشان داده شده است. تشريح فيزيک و روابط حاکم بر اين جريان‌ها نيز در فصل کاملي از کتاب مرجع [۱۶] بيان شده است.

بسياري از مطالعات در ارتباط با جابجايي طبيعي، توجه خود را بر روي انتقال حرارت از يک سطح گرمايي بسيار کوچک (مثل يک سيم داغ) و يا در فاصله‌اي بسيار کوچک، [۳] تا [۱۰]، متمرکز نموده‌اند. هم‌چنين سيال مورد آزمايش در بسياري از تحقيقات، يک گاز ايده‌آل مانند هوا است [۵] تا [۸]. هدف اين تحقيق مقايسه انتقال حرارت از يک منبع حرارتي افقي (گرمکن تخت) با وجود جريان آکوستيک و نيز عدم وجود آن، در يک محفظه استوانه‌اي شکل بسته است که از آب پر شده است. از منظري ديگر در مطالعات قبلي، منبع حرارتي درون آب و داخل يک ميدان موج ايستا قرار داده شده بود که اين ميدان بين يک صفحه مرتعش و يک صفحه ثابت ديگر ايجاد شده [۳]، [۴]، [۱۰] تا [۱۵]. اما در سامانه آزمايش اين تحقيق، منبع حرارتي، صفحه‌اي ثابت است و موج ايستا در بين منبع حرارتي بعنوان يک منعکس‌کننده امواج و منبع مرتعش بوجود مي‌آيد. در نتيجه مي‌توان فرض نمود که جريان آکوستيک توليد شده يک جريان خالص است و بوسيله تلاطم ناشي از اجزاء ديگري مانند منبع حرارتي که در درون ميدان جريان قرار دارد، اثر نمي‌پذيرد. در مراحل مختلف آزمايش، ارتفاع گرمکن برابر با مضربي از نصف طول موج تنظيم شد تا جريان آکوستيک قدرت‌مندي ايجاد شود. در اين تحقيق، اثر پارامترهاي مؤثري مانند ارتفاع گرمکن، توان ورودي ارتعاشات فراصوت و توان ورودي گرمکن مورد بررسي قرار گرفته‌اند. همچنين با اندازه گيري فشار آکوستيک در صفحه بالايي، بروز پديده کاويتاسيون در توان‌هاي آکوستيک مختلف مورد بررسي قرار گرفت.

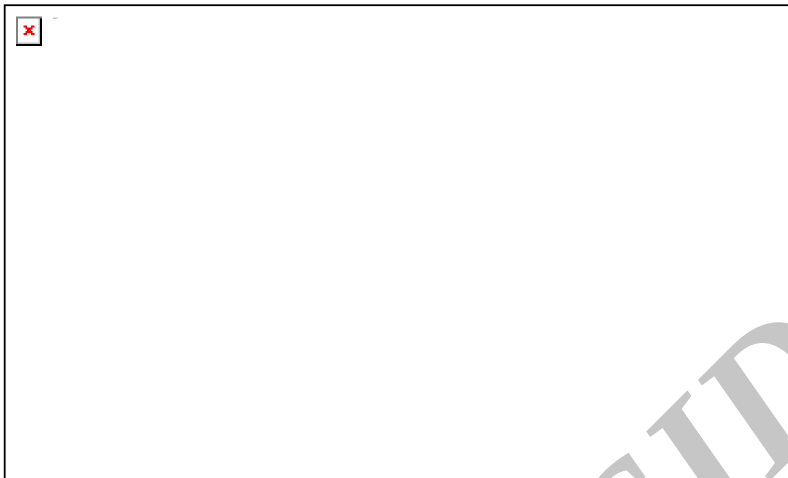
۲- روش اجراي آزمايش

سامانه آزمايشگاهي در شکل (۱) نمايش داده شده است. آزمايش‌ها درون يک حمام فراصوت دست‌ساز که از دو استوانه هم‌محور تشکيل شده است، انجام مي‌شود. قطر داخلي و ارتفاع استوانه داخلي به‌ترتيب برابر با ۲۵ و ۳۰ سانتي‌متر است. ديواره‌هاي کناري و بخش زيرين استوانه داخلي از فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با ضخامت ۰/۸ ميلي‌متر ساخته شده است. اين استوانه در واقع بخش اصلي در آزمايش انتقال حرارت محسوب مي‌شود. اين بخش توسط آب مقطر پر مي‌شود که اين آب به مدت ۲۰ دقيقه پيش از انجام آزمايش جوشانده شده است تا گازهاي محلول در آن به حداقل برسد و احتمال پديده کاويتاسيون کاهش يابد. منبع ارتعاشات فراصوت، يک ترانسديوسر فراصوت پيزوالکتريک با فرکانس ارتعاش ۱۸ کيلوهرتز است که قطر کلگي آن برابر با ۶۰ ميلي‌متر است و به‌طور دقيق در مرکز صفحه فولادي و در کف مخزن چسبانده شده است. امواج فراصوت توسط سطح بالايي اين صفحه فولادي و رو به بالا در درون آب منتشر مي‌شود. توان ورودي ترانسديوسر به‌عنوان توان آکوستيک ارتعاشات فراصوت، مورد اندازه‌گيري قرار مي‌گيرد.

ارتفاع آب، بر ايجاد حالت تشديد در حمام آب اثر زيادي دارد [۱۰]. به‌همين دليل، براي حفظ شرايط مشابه در آزمايش‌ها، محفظه درون مخزن تا ارتفاع ۲۳ سانتي‌متر از آب پر مي‌شود. اين ارتفاع براي پايدارسازي شرايط تشديد در فرکانس هارمونيک اصلي ترانسديوسر، انتخاب شده است. سطح آب توسط يک شير باز در بالاي مخزن اصلي با محيط در ارتباط است. دماي ديواره‌هاي کناري توسط آب خنک‌کننده ثابت نگاه داشته مي شود. آب خنک‌کننده خروجي درون يک مخزن ذخيره روباز پاشيده مي‌شود تا دوباره خنک شود. دو ترموکوپل نوع K براي اندازه‌گيري دماي آب خنک‌کننده ورودي و خروجي استفاده شده است. اختلاف بين اين دو دما در روند آزمايش‌ها کمتر از ۰/۵ درجه سلسيوس بود. با توجه به اين موضوع که دقت ترموکوپل‌ها $\pm 1/5\ C^{0}$ است، مي‌توان فرض نمود که دماي ديواره‌هاي کناري در روند آزمايش‌ها همواره ثابت باقي مانده است.

در اين سامانه از يک گرمکن تخت به شکل قرص نازکي از جنس ميکا با قطر ۱۰۰ميلي‌متر به‌عنوان يک منبع حرارتي استفاده مي‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) ديده مي‌شود،

گرمکن تخت بر روي يک صفحه دايره‌اي مسي با قطر ۱۱۸ ميلي‌متر و ضخامت ۵ ميلي‌متر پيچ شده است تا شار حرارتي ثابتي توليد نمايد. براي اينکه بتوان بهترين اتصال را ميان گرمکن تخت و صفحه مسي ايجاد نمود، از يک لايه نازک خمير سيليکون استفاده شد.



شکل (۱): وسيله آزمايش.

سطح پاييني صفحه مسي بعنوان منبع حرارتي با آب در تماس است و سطح بالايي آن توسط مواد عايق پوشانده شده تا از اتلاف گرما جلوگيري شود. براي قراردادن گرمکن در ارتفاعات مختلف و انجام آزمايش در هر يک از اين حالت‌ها، از يک صفحه ضخيم مدور از جنس پي‌تي‌اف‌اي[3] و با قطر ۱۲۴ ميلي‌متر استفاده شد تا بتواند گرمکن تخت و صفحه مسي را در داخل مخزن اصلي به سمت بالا و پايين جابجا نمايد.

براي آنکه هنگام جابجايي عمودي گرمکن امکان عبور آب از يک طرف مجموعه گرمکن به سمت ديگر آن فراهم شود، در لبه هاي صفحه پي‌تي‌اف‌اي چهار مجرا تعبيه شد. گرمکن به يک دسته پيچي قابل تنظيم که در بالاي مخزن اصلي نصب شده است، متصل شد تا بتوان براي انجام آزمايش در ارتفاع‌هاي مختلف، گرمکن تخت را به‌صورت عمودي جابجا نمود. ارتفاع بخش گرمکن تخت توسط يک کوليس ديجيتال که به‌صورت ثابت بر روي محفظه اصلي قرار دارد، اندازه‌گيري مي‌شود. چهار ترموکوپل نوع K (ساخت شرکت تستو[4]، مدل ۱۵) بر روي چهار سوراخ کوچک که روي صفحه مسي تعبيه شده بودند، نصب شدند (بين صفحه مسي و گرمکن تخت). مقادير اندازه گيري شده توسط اين ترموکوپل‌ها با خطاي کمتر از ^oC ۰/۱، بعنوان دماي سطح صفحه مسي در نظر گرفته مي‌شود. هم‌چنين ميانگين مقادير اين چهار دما بعنوان دماي متوسط منبع حرارتي در محاسبات در نظر گرفته مي‌شود. شار حرارتي از تقسيم توان ورودي اندازه‌گيري شده گرمکن تخت (Q) بر مساحت صفحه مسي (A) بدست مي‌آيد ($q_n=Q/A$).

دماي حجمي[5] آب توسط سه ترموکوپل نوع K (ساخت شرکت تستو، مدل ۵۷۹۲ ۰۶۰۲) که در ارتفاع ۱/۵ سانتي‌متري بالاي صفحه مرتعش در آب شناورند، اندازه‌گيري مي‌شود. از آنجاييکه اين ترموکوپل‌هاي سيمي شکل قطر بسيار نازکي دارند، به‌طور تقريب هيچ تلاطم ناخواسته‌اي را در محفظه ايجاد نمي‌نمايند. مقدار متوسط اين سه دما بعنوان دماي حجمي متوسط در محاسبات در نظر گرفته مي‌شود. در روند آزمايش، بيشترين تفاوت دماي بين اين ترموکوپل‌هاي حجمي ^oC ۲ بود.

در مجموع از ۱۰ ترموکوپل براي اندازه‌گيري دما استفاده شد و مقادير متناظر با زمان واقعي، توسط ذخيره‌کننده داده (شرکت تستو، واحد کنترل ۴۵۴) که به رايانه وصل شده بود ثبت مي‌گرديد. همه ترموکوپل‌هاي مورد استفاده مدل K هستند و دقتي برابر ^oC ۱/۵ ± (شرکت تستو، کلاس ۱) دارند. دماهاي اندازه گرفته شده عبارتند از:

- دماي چهار نقطه مختلف از گرمکن تخت.
- دماي حجمي در سه نقطه مختلف از حجم آبي که بين صفحه مرتعش و گرمکن تخت قرار دارد.
- دماي آب خنک‌کننده ورودي.
- دماي آب خنک‌کننده خروجي.
- دماي محيط.

براي تعيين طول موج ارتعاشات فراصوت دانستن سرعت دقيق صوت لازم است. از اين رو براي اطمينان بيش‌تر، سرعت

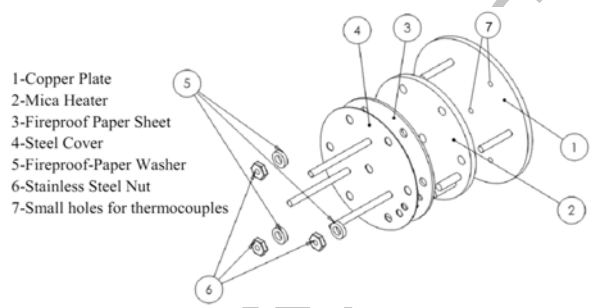
صوت براي دماهاي مختلف و در شرايط آزمايشگاهي به‌کمک دو حسگر[6] فراصوت اندازه‌گيري شد. از آنجا که شار حرارتي توسط منبع گرمايش در راستاي رو به پايين هدايت مي‌شود، تغييرات دما در دماي حجمي و در راستاي عمودي ناچيز است؛ به‌همين دليل براي محاسبه طول موج ارتعاشات از دماي حجمي استفاده شد.

فشار آکوستيک توسط يک هيدروفون کوچک (شرکت بي‌اَندکي[7]، مدل ۸۱۰۳) که به يک سيلوسکوپ متصل است اندازه‌گيري مي‌شود. اين هيدروفون رو به پايين و در کنار صفحه مسي گرمکن نصب شده است.

۳- روش آزمايش

براي بررسي اثر ارتفاع گرمکن تخت بر افزايش انتقال حرارت، ارتفاع گرمکن در مرحله اول برابر با λ (طول موج) تنظيم مي‌شود و سپس به $3\lambda/2$ و 2λ افزايش مي‌يابد. بخش خارجي مخزن اصلي در تماس با آب خنک‌کننده قرار دارد تا دماي ديواره‌هاي کناري در روند آزمايش همواره ثابت باقي بماند. پس از رسيدن به تعادل دمايي اوليه در محفظه داخلي، از يک ولتاژ کنترل شده، براي توليد شار حرارتي ثابت توسط گرمکن استفاده مي‌شود.

در کل سه مقدار توان ورودي (۴۰، ۶۰ و ۸۰ وات) به منبع حرارتي اعمال مي‌شود تا اثر شار حرارتي مورد بررسي قرار گيرد. در اين مقادير از شار حرارتي، انتقال حرارت در گستره جابجايي طبيعي قرار مي‌گيرد که تبديل فاز نيز در آن وجود ندارد. دماي گرمکن پس از اعمال شار حرارتي ثابت، پس از ۱۱ دقيقه به تعادل مي‌رسد و تغييري در مقادير دماي اندازه‌گيري شده توسط ترموکوپل‌ها ديده نمي‌شود.



شکل (۲): جزئيات بخش گرمکن.

پس از رسيدن به اين تعادل ثانويه، ارتعاشات فراصوت به سيال اعمال مي‌شود. پس از آن، دماي منبع حرارتي ناگهان و به‌شدت شروع به پايين آمدن مي‌نمايد. بيش‌ترين افت دما که ۲۸ ^{o}C بود، در مدت زماني کمتر از ۱ دقيقه ثبت شد. پس از اين افت ناگهاني، دماي منبع گرم پس از گذشت ۳ الي ۵ دقيقه مجدد به تعادل مي‌رسد که تا رسيدن به اين تعادل همه دماها ثبت مي‌شوند.

۴- نتايج آزمايش

شکل (۳) تغييرات دمايي منبع گرمايش و دماي حجمي آب، زماني که ارتفاع گرمکن تخت برابر $3\lambda/2$ است را نشان مي‌دهد. در اين شکل، توان ورودي ترانسديوسر و توان گرمکن به‌ترتيب ۱۰۰/۸ و ۸۰ وات مي‌باشند. همان‌طور که در شکل (۳) ديده مي‌شود، کاهش ناگهاني در دماي منبع حرارتي (۲۷~۲۸^{o} C) بلافاصله پس از اعمال توان فراصوت در زمان ۸۰۰ ثانيه، رخ مي‌دهد و دماي منبع حرارتي در يک فاصله زماني کوتاه و به‌طور تقريب در کمتر از ۱ دقيقه پايين مي‌آيد. علت آن است که وقتي صفحه پاييني شروع به لرزش مي‌نمايد، جريان‌هاي آکوستيک ميان صفحه مرتعش و منبع حرارتي ايجاد مي‌شود و اين امر سبب افزايش انتقال حرارت به روش جابجايي و نيز افت دما در منبع حرارتي مي‌شود. پس از ايجاد يک ميدان جريان آکوستيک در آب، حلقه‌هاي چرخشي در سيال شکل مي‌گيرد. جريان‌هاي آکوستيک موجب رسيدن سيال گرم به نواحي دورتر در سيال و بالارفتن دماي حجمي مي‌شوند و بدين ترتيب دماي حجمي به‌تدريج چند درجه‌اي افزايش مي‌يابد؛ اما اختلاف بين دماي منبع گرمايي و دماي حجمي پس از رسيدن به شرايط حالت پايدار تغيير چنداني نمي‌نمايد.

براي تعيين ضريب انتقال حرارت جابجايي متوسط $\bar{h} = q_n / \left(\overline{T_H} - \overline{T_\infty}\right)$، ميانگين چهار دماي مربوط به منبع حرارتي و سه دماي حجمي، استفاده مي‌شود. در نتيجه $\bar{h}$ را مي‌توان از راه ميانگين دماي منبع حرارتي $\overline{T_H}$ و ميانگين دماي حجمي $\overline{T_\infty}$ محاسبه نمود:

$$\overline{h} = q_n / \left(\overline{T_H} - \overline{T_\infty}\right) \qquad (۱)$$

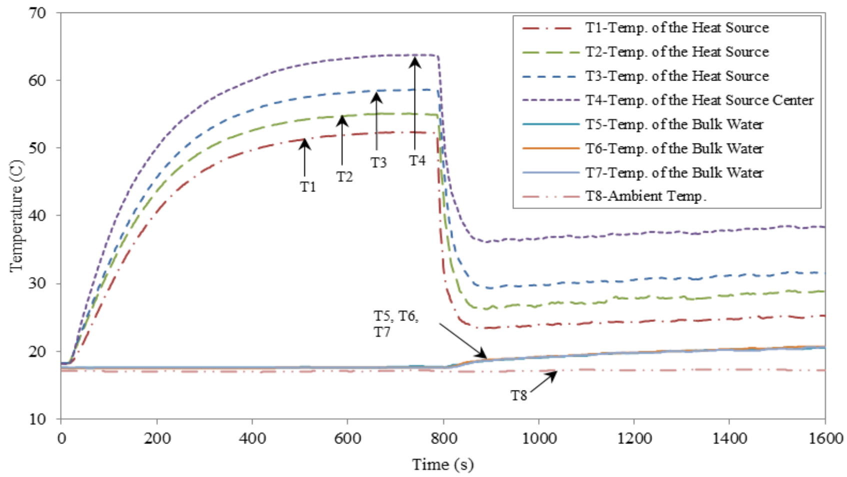
به عنوان نمونه شكل (۴)، نمودار ضريب انتقال حرارت جابجايي را بر حسب زمان قبل و پس از اعمال امواج فراصوت، در حالتي كه گرمكن در ارتفاع ۳λ/۲ قرار دارد نشان مي‌دهد. براي آنكه امكان مقايسه بهتري بين هريک از حالت‌ها بر روي نمودار ايجاد شود، زمان آغاز ارتعاشات براي همه آزمايش‌ها برابر با ۷۰۰ ثانيه در نظر گرفته شده است. همان‌طور كه در شكل ديده مي‌شود، افزايش توان ورودي فراصوت منجر به افزايش ضريب انتقال حرارت در همه ارتفاع‌ها مي‌شود و يک افزايش ناگهاني در ضريب انتقال حرارت در اثر جريان آكوستيک به هنگام آغاز ارتعاش ترانسديوسر فراصوت ديده مي‌شود. ضريب انتقال حرارت متوسط در حالت سكون و بدون القاي امواج را مي‌توان از روابط آزمايشگاهي و تجربي محاسبه نمود [۱۶]. از اين رو با توجه به داده‌هاي كادامبي[۸] و درک[۹] براي صفحات دايره‌اي شكل با قطر D و در حالت افقي و پايدار، مي‌توان رابطه (۲) را مورد استفاده قرار داد:

$$\overline{Nu_D} = 0.82 Ra_D^{1/5} \Pr^{0.034} \qquad (۲)$$

از آنجا كه $\overline{h} = q_n / \left(\Delta \overline{T}\right)$، مقدار $\Delta\overline{T} = \overline{T}_H - \overline{T}_\infty$ به‌عنوان متغير وابسته مجهول در عدد ناسلت پديدار مي گردد. به‌همين سبب براي جلوگيري از روش تكرار، بايد $\Delta\overline{T}$ از عدد ريلي حذف شود كه مي‌توان اين كار را با معرفي عدد ريلي اصلاح شده Ra_D^* كه به‌صورت رابطه (۳) تعريف مي‌شود، انجام داد [۱۷]:

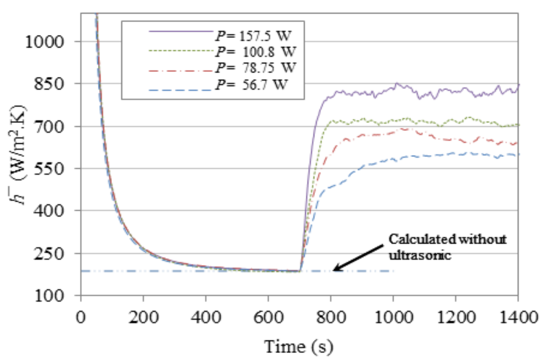
$$Ra_D^* = Ra_D \overline{Nu_D} = \frac{g\beta \Delta T D^3}{\nu\alpha} \frac{q_n D}{K_f \Delta T} = \frac{g\beta q_n D^4}{K_f \nu\alpha} \qquad (۳)$$

همه خواص سيال به ازاي دماي $\overline{T}_\infty$ جاگذاري مي‌شود. در رابطه (۲)، Ra_D با $Ra_D^* / \overline{Nu_D}$ جايگزين شده است، در نتيجه $\Delta\overline{T}$، از رابطه (۲) و (۳) بدست مي‌آيد.



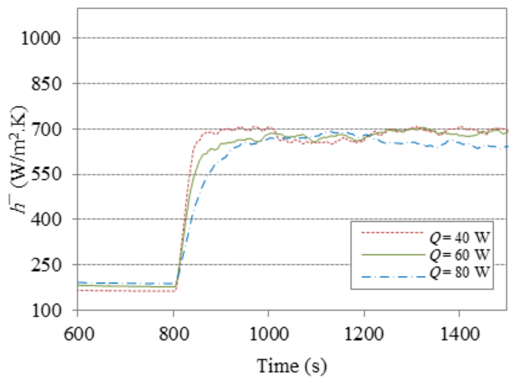
شكل (۳): دماي منبع گرمايش و دماي حجمي آب بر حسب زمان با و بدون وجود امواج ايستا (Q= ۸۰ W، P= ۱۰۰/۸ W، H₀= ۳λ/۲).

حال بايد به محاسبات باز گرديم و تمام خواص، بجز β را دردماي $T_f = \overline{T}_\infty + (\Delta\overline{T}/2)$ بدست آوريم. بنابراين $\Delta\overline{T}$ و $\overline{h}$ تصحيح شده براي همه حالت‌ها تخمين زده مي‌شود. وقتي كه دماي حجمي برابر با ۲۰ C است، براي توان‌هاي ورودي گرمكن ۸۰، ۶۰ و ۴۰ وات، ضريب انتقال حرارت متوسط به‌ترتيب برابر ۱۸۷، ۱۷۵ و ۱۶۰ (W/m2K) است. اين بدان معناست كه اگر توان گرمكن از ۴۰ وات به ۶۰ وات افزايش يابد، ضريب انتقال حرارت به‌طور تقريب به اندازه ۹/۳ % افزايش مي‌يابد. مقدار محاسبه شده در حالت سكون براي توان ۸۰ وات در شكل (۴) نشان داده شده است تا بتوان آن را با نتايج تجربي مقايسه نمود.



شكل (۴): ضريب انتقال حرارت متوسط بر حسب زمان با و بدون وجود امواج ايستا، به‌ازاي توان‌هاي فراصوت مختلف (Q= ۸۰ W، H₀= ۳λ/۲).

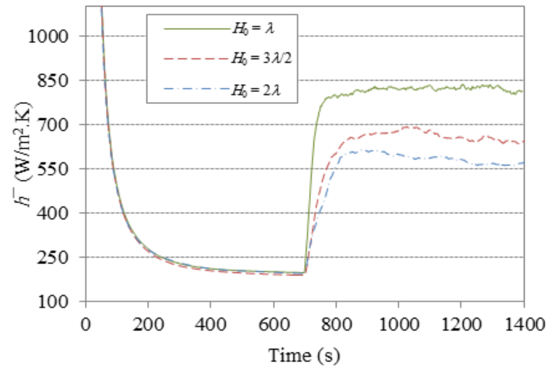
شکل (۵) ضريب انتقال حرارت متوسط را در توان‌هاي مختلف گرمکن و در ارتفاع $3\lambda/2$ نشان مي‌دهد. در اين شکل ارتعاشات فراصوت پس از ۸۰۰ ثانيه از روشن شدن گرمکن اعمال مي‌شود.



شکل (۵): ضريب انتقال حرارت متوسط در توان‌هاي مختلف گرمکن، بر حسب زمان (H_0= $3\lambda/2$ ،P= ۷۸/۷۵ W).

همان‌طور که ديده مي‌شود، در حالت پايدار آغازي و در نبود ارتعاشات فراصوت، $\bar{h}$ با توان گرمکن متناسب است که اين مسأله مشابه مقادير محاسبه شده است. در شروع زمان ارتعاشات نيز چنين شرايطي حاکم است اما پس از ايجاد جريان آکوستيک، برخي نوسانات رخ مي‌دهد و همان‌طور که ديده مي‌شود، در ضرايب انتقال حرارت به‌ازاي توان‌هاي مختلف گرمکن، تفاوت زيادي ديده نمي‌شود. به‌عبارت ديگر تغييرات ضريب انتقال حرارت در اثر تغيير توان گرمکن در مقايسه با افزايش آن در اثر جريان آکوستيک بسيار کوچک و قابل چشم‌پوشي است.

شکل (۶) نيز تغييرات ضريب انتقال حرارت بر حسب زمان را در بود و نبود جريان آکوستيک، در ارتفاع هاي مختلف گرمکن نشان مي‌دهد. همان‌طور که انتظار مي‌رود، $\bar{h}$ با افزايش H_0 کاهش مي‌يابد. زيرا با فرض ثابت بودن توان ترانسديوسر، در ارتفاع‌هاي بيش‌تر، انرژي امواج به حجم بزرگ‌تري از سيال منتقل مي‌شود و در نتيجه انرژي لازم براي شکل‌گيري جريان آکوستيک کاهش مي‌يابد. اين مسئله در توان‌هاي فراصوت مختلف ديده شد.



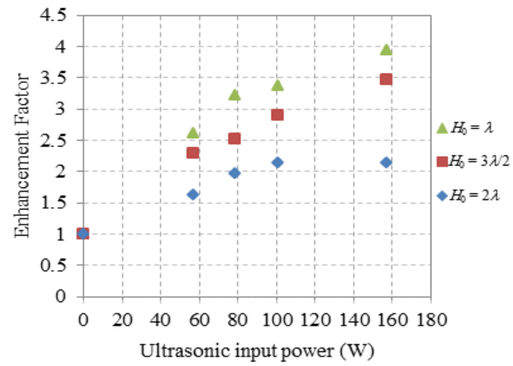
شکل (۶): ضريب انتقال حرارت جابجايي متوسط بر حسب زمان در H_0 هاي مختلف (P= ۷۸/۷۵ W ،Q= ۸۰ W).

براي اينکه بتوان اثر امواج ايستا را بصورت يک کميت بيان نمود، ضريب افزايش EF به‌عنوان نسبتي از $\bar{h}$ با وجود امواج فراصوت به مقدار $\bar{h}$ بدون وجود امواج فراصوت تعريف مي‌شود:

$$EF = \frac{\bar{h}\ \text{with ultrasonic}}{\bar{h}\ \text{without ultrasonic}} \qquad (۴)$$

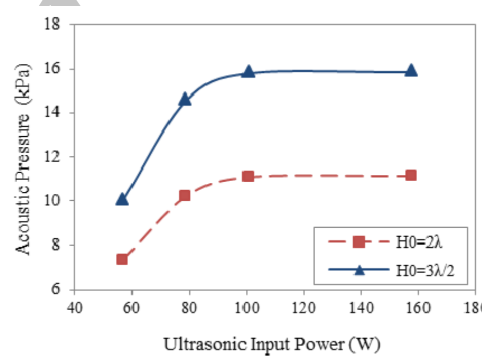
مقادير ضريب افزايش EF براي حالت‌هاي مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در اين شکل نشان داده شده، ضريب افزايش از مقدار ۱/۶۲ در H_0= 2λ و در توان فراصوت ۵۶/۷ وات تا مقدار ۳/۹۴ در H_0= λ و در توان فراصوت ۱۵۷/۵ وات تغيير مي‌نمايد. بدين معني که با يک توان فراصوت کوچک (کمتر از ۱۶۰ وات) و داخل حجم کوچکي از آب، ضريب انتقال حرارت بدون هيچ پمپي نزديک به ۴۰۰٪ افزايش مي‌يابد.

نکته مهمي که در القاي امواج آکوستيک بايد در نظر داشت، اين است که ارتعاشات فراصوت به‌طور طبيعي، به دليل نوسانات سريعي که در سيال ايجاد مي‌نمايد، موجب تشکيل حباب‌هاي بسيار ريزي در سيال مي‌شود. اين حباب‌هاي ميکروسکوپي که به‌طور عموم با چشم ديده نمي‌شوند، در قدرت‌هاي بالاي آکوستيک، به بصورت کاويتاسيون به شدت افزايش مي‌يابد. همان‌گونه که در قبل اشاره شد، کاويتاسيون علاوه بر اثرات فرسايشي، در زمينه افزايش انتقال حرارت از سطوح گرمايي با مقياس بزرگ چندان مؤثر نخواهد بود. از سوي ديگر افزايش تشکيل حباب موجب افت امواج القايي در فواصل دورتر و نيز موجب اغتشاشات نامنظم در جريان‌هاي آکوستيک و تضعيف اين جريان‌ها و در نتيجه کاهش اثرات مطلوب آن‌ها در انتقال حرارت مي‌شود.



شکل (۷): اثر توان ورودي ترانسديوسر بر ضريب افزايش

يکي از روش‌هايي که مي‌توان بوسيله آن پديده کاويتاسيون و شدت و ضعف تشکيل حباب را در ميدان جريان مورد بررسي قرار داد، اندازه‌گيري فشار آکوستيک توسط هيدروفون است. هرچه امواج دريافت شده توسط هيدروفون منظم‌تر، قوي‌تر و بدون اغتشاش باشد نشانگر ضعيف‌تر بودن پديده کاويتاسيون است. نتايج مربوط به اندازه‌گيري فشار صوت در صفحه بالايي برحسب قدرت آکوستيک در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغييرات فشار آکوستيک در صفحه بالايي و در کنار گرمکن بر حسب توان ورودي ترانسديوسر

همان‌گونه که ديده مي‌شود با افزايش توان آکوستيک از ۷۸/۷۵ به ۱۰۰/۸ وات، از شيب فشار آکوستيک کاسته مي‌شود، تا آنجا که پس از آن شيب نمودار به‌طور تقريب به صفر مي‌رسد. به‌عبارت ديگر با افزايش توان آکوستيک، امواج فشاري که به هيدروفون مي‌رسد افزايش چنداني نمي‌يابد. زيرا نوسانات شديدتر موجب تشکيل حباب‌هاي بيش‌تر و در نتيجه افت بيشتر در فشار آکوستيک مي شود. تشکيل و ترکيدن اين حباب‌ها امواج بسيار کوچکي ايجاد مي‌نمايد که اثرات آن را مي‌توان به‌صورت اغتشاش و تداخل با امواج اصلي در اسيلوسکوپ ديد. در واقع همين تداخل امواج است که موجب کاهش دامنه فشار آکوستيک در هيدروفون مي‌شود.

از مقايسه شکل (۷) و شکل (۸) مي‌توان دريافت که افزايش پديده کاويتاسيون به دليل کاهش فشار آکوستيک و اثرات ميراکنندگي که در امواج ايجاد مي‌نمايد، سير صعودي افزايش انتقال حرارت را کاهش مي‌دهد. به‌عبارت ديگر در توان‌هاي بيش از ۱۰۰/۸ وات شيب ضريب افزايش در همه ارتفاع‌ها کاهش يافته است. اين امر بخصوص با افزايش ارتفاع شدت مي‌يابد تا آنجا که در ارتفاع 2λ به‌ازاي افزايش توان آکوستيک از ۱۰۰/۸ به ۱۵۷/۵ وات، EF تغيير چنداني نمي‌نمايد. اين بدان معني است که افزايش توان آکوستيک بيش از اين مقدار مقرون به صرفه نيست و فقط موجب افزايش کاويتاسيون و خوردگي بيشتر اجزا خواهد شد.

۵- نتيجه‌گيري

افزايش انتقال حرارت از منبع حرارتي افقي (تخت) رو به پايين توسط جريان آکوستيک، در داخل يک محفظه استوانه‌اي شکل بصورت تجربي مورد آزمايش قرار گرفته است. منبع حرارتي داراي شار حرارتي ثابت است و کف مخزن در راستاي قائم توسط يک ترانسديوسر فراصوت نوسان مي‌نمايد. جريان آکوستيک بر اثر امواج ايستا بين منبع حرارتي و صفحه مرتعش توليد مي‌شود. ضريب انتقال حرارت به‌ازاي ارتفاع‌هاي مختلف قرارگيري گرمکن نسبت به صفحه مرتعش و نيز به‌ازاي توان‌هاي ورودي متفاوت براي ترانسديوسر و گرمکن اندازه‌گيري شده است. نتايج نشان مي‌دهد که ضريب انتقال حرارت مي‌تواند به کمک ارتعاشات فراصوت در حالت بيشينه نزديک به ۴۰۰٪ افزايش يابد. با توجه به جهش ناگهاني در ضريب انتقال حرارت پس از روشن شدن ترانسديوسر و نيز تعادل سريعي که پس از آن ديده مي‌شود به نظر مي‌رسد القاي امواج فراصوت مي‌تواند به‌عنوان يک روش سريع و آني براي خنک‌کاري سطوح گرم به‌کار رود. از سوي ديگر انتقال حرارت با کاهش ارتفاع گرمکن يا به‌عبارت ديگر با نزديک شدن گرمکن به صفحه مرتعش افزايش چشم‌گيري مي‌يابد. اين بدان معناست که با حجم کم‌تري از سيال خنک‌کننده مي‌توان اثرات خنک‌کنندگي بهتري را ديد که اين امر به‌معناي سبک‌تر شدن سامانه خنک‌کاري است. به‌جز حجم کمي از سيال که براي خنک‌کاري مورد نياز است، برق مصرفي ترانسديوسر نيز در مقايسه با برق مصرفي پمپ‌هاي رايج بسيار کم است. نکته ديگر اين که براي افزايش ضريب انتقال حرارت هيچ‌گونه تغييري مانند اضافه نمودن پره يا کويل در منبع حرارتي انجام نشده است. به‌عبارت ديگر اگر منبع گرمايش در تماس با يک سيال انتقال حرارتي قرار داشته باشد، با القاي امواج فراصوت در فاصله‌اي مناسب در سيال و ايجاد امواج ايستا مي‌توان سطح

گرم را به‌سرعت خنک نمود. هم‌چنین تغییر ضریب انتقال حرارت به‌دلیل توان‌هاي گرمکن متفاوت، در مقایسه با افزایشي که در اثر جریان آکوستیک مي‌یابد،کوچک و قابل چشم‌پوشي است. علاوه بر این میزان افزایش انتقال حرارت، با افزایش توان فراصوت افزایش مي‌یابد، ولي افزایش بیش از حد توان آکوستیک نیز مناسب نیست، زیرا موجب افزایش کاویتاسیون و تضعیف اثرات جریان‌هاي آکوستیک مي‌شود و در نتیجه بر روي ضریب انتقال حرارت اثرات کاهنده خواهد داشت. به عبارت دیگر ضریب انتقال حرارت با وجود کاویتاسیون افزایش چنداني 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 جمهوري) به‌دلیل حمایت مالي اعلام مي‌دارند.

۷- فهرست علائم

A	مساحت منبع حرارتي، m^2
C_0	سرعت صوت، $m\ s^{-1}$
D	قطر صفحه گرمکن، m
EF	ضریب افزایش
f	فرکانس ارتعاشات، kHz
g	شتاب گرانش، $m\ s^{-2}$
$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت جابجایي میانگین، $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
H_0	ارتفاع گرمکن از کف مخزن، m
K_f	ضریب هدایت حرارتي، $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$\overline{Nu_D}$	عدد ناسلت با استفاده از قطر صفحه دایره اي $(\bar{h}D / K_f)$
P	توان ورودي ترانسدیوسر، W
Pr	عدد پرانتل (D / α)
q_n	شار حرارتي، $W\ m^{-2}$
Q	توان گرمکن، W
Ra_D	عدد ریلي با استفاده از قطر صفحه دایره اي $\left(g\beta(T_H - T_\infty)D^3 / \nu\alpha\right)$
t	زمان، s
$\bar{T}$	دماي میانگین، ºC

علائم یوناني

α	ضریب انتشار حرارتي، $m^2\ s^{-1}$
β	ضریب انبساط حجمي گرمایي، K^{-1}
λ	طول موج امواج صوتي، m
ν	ویسکوزیته سینماتیکي، $m^2\ s^{-1}$
ρ	چگالي سیال $kg\ m^{-3}$

زیرنویس

H	مقادیر مربوط به منبع حرارتي
∞	مقادیر حجمي (بالک)

۸- مراجع

[۱] 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.

[۲] Aktas, M.K., "Thermoacoustically Induced and Acoustically Driven Flows and Heat Transfer in Enclosures", PhD thesis, Drexel University, May 2004.

[۳] Nomura, S., Nakagawa, M., "Heat Transfer Enhancement by Ultrasonic Vibration", Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference 4, pp. 275-282, 1995.

[٤] 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.

[٥] 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.

[٦] 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.

[۷] 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.

[۸] 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.

[۹] 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.

[۱۰] 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.

[۱۱] 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.

[۱۲] 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.

[۱۳] 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.

[۱٤] 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.

[۱۵] Fairbanks, H.V., "Influence of Ultrasound Upon Heat Transfer Systems", Ultrasonic Symposium, pp. 384-387, 1979.

[۱٦] Hamilton M.F., Blackstock D.T., "Nonlinear Acoustics", Academic Press, California, U.S.A., 1998.

[۱۷] Lienhard IV, J.H., Lienhard V, J.H., "A Heat Transfer Textbook", Phlogiston Press, Third Edition, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2006.

۹- زیرنویس‌ها

[1] Eckart
[2] Rayleigh
[3] Polytetrafluoroethylene (PTFE)
[4] Testo
[5] Bulk
[6] Probe
[7] B&K
[8] Kadambi
[9] Drake