



# Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Ultrasonic Transducer Vibration Amplitude on Heat Transfer Augmentation from Spiral Heater Surface

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Abedini R.<sup>1</sup>,  
Najafi F.<sup>1</sup>,  
Passandide-Fard M.<sup>1\*</sup>,  
Abdolah A.<sup>2</sup>,  
Faezian A.<sup>3</sup>

### How to cite this article

Abedini R., Najafi F., Passandide-Fard M., Abdolah A., Faezian A. Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Ultrasonic Transducer Vibration Amplitude on Heat Transfer Augmentation from Spiral Heater Surface. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(08):497-510.

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

### \*Correspondence

Address: Ferdowsi University of Mashhad, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran.

mpfard@um.ac.ir

### Article History

Received: March 12, 2023

Accepted: September 10, 2023

ePublished: October 21, 2023

## ABSTRACT

In this article, the numerical and experimental investigation of the effect of ultrasonic waves on the heat transfer rate with an increase of the wave amplitude is discussed. Numerical modeling determines the possibility of the investigation of the ultrasonic wave's effects on fluid flow distribution and heat transfer. For this purpose, a cylindrical tank is considered inside which a spiral heater is placed at a fixed height in the water. In addition, ultrasonic transducers are considered as circular plates under the bottom of the tank. In order to simulate, the ANSYS Fluent software is used and the modeling is accomplished in two stages before and after ultrasonic excitation. To validate the numerical results, they are compared with those of the experiments. For this purpose, an experimental setup is prepared which consists two coaxial cylinders, a spiral heater kept at a certain height in the water, and five transducers attached to the bottom of the tank. Both experimental and numerical results show that the convection heat transfer coefficient increases with the use of ultrasonic waves with a discrepancy of nearly 4% between the results. By increasing the heat transfer coefficient, the heater surface temperature decreases. The discrepancy between the measured and calculated temperature is about 5%. The velocity and temperature distributions obtained from the numerical results show that using ultrasonic waves enhance the fluid flow mixing which in turn increases the convection heat transfer. The higher the amplitude of the ultrasonic wave, the higher the heat transfer coefficient will result.

**Keywords** Ultrasonic, Acoustic Cavitation, Acoustic Streaming, Heat Transfer Coefficient, Vibration Amplitude

## CITATION LINKS

[1-](#) R Enhancement of heat transfer by ... [2-](#) A review on convective heat transfer ... [3-](#) Heat transfer intensification by low ... [4-](#) Investigation of the effect of ... [5-](#) Investigation of convective heat transfer augmentation ... [6-](#) Numerical analysis of experimental observations ... [7-](#) Numerical simulation on enhancement of natural ... [8-](#) Numerical simulation of acoustic streaming ... [9-](#) Heat transfer enhancement by acoustic streaming ... [10-](#) CFD modeling of heat transfer by ... [11-](#) CFD modeling of convection heat ... [12-](#) Augmentation of natural convective heat transfer ... [13-](#) Local convective heat transfer from a horizontal ... [14-](#) Fundamentals of heat and mass transfer. [15-](#) ANSYS Fluent Tutorial Guide. [16-](#) Describing the uncertainties in experimental results.

## بررسی عددی و تجربی اثر دامنه‌ی ارتعاش ترانس‌دیوسر آلتراسونیک در انتقال حرارت جابه‌جایی از سطح گرمکن ماریچ

راضیه عابدینی<sup>۱</sup>، فائزه نجفی<sup>۲</sup>، محمد پسندیده فرد<sup>۳\*</sup>، امیر عبدالله<sup>۴</sup>، علی فائزبان<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۴</sup> دانشکده مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۵</sup> موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، پارک علم و فناوری خراسان، مشهد، ایران

### چکیده

در این مقاله به بررسی عددی و تجربی اثر امواج آلتراسونیک روی نرخ انتقال حرارت با افزایش دامنه‌ی موج صوتی پرداخته می‌شود. مدلسازی عددی امکان بررسی تأثیر امواج آلتراسونیک را روی توزیع جریان سیال و انتقال حرارت مشخص می‌کند. برای این منظور، مخزن به صورت استوانه‌ای شبیه‌سازی می‌شود و گرمکن ماریچی در ارتفاع ثابت و در سیال قرار می‌گیرد. همچنین، ترانس‌دیوسرهای آلتراسونیک به صورت صفحات دایروی در کف مخزن در نظر گرفته می‌شوند. جهت شبیه‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی، از نرم افزار انسیس فلونت استفاده می‌شود و مدلسازی در دو مرحله شامل قبل و بعد از اعمال آلتراسونیک صورت می‌گیرد. جهت اعتبارسنجی، نتایج عددی برای یک دامنه‌ی مشخص با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. برای این منظور، در سامانه‌ی آزمایشگاهی که از دو استوانه‌ی هم محور تشکیل شده، گرمکن ماریچی در ارتفاع مشخص در سیال آب نگهداری و پنج ترانس‌دیوسر در کف مخزن چسبانده می‌شود. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با به کارگیری امواج آلتراسونیک افزایش می‌یابد و اختلاف نتایج تقریباً برابر با ۴ درصد است. با افزایش ضریب انتقال حرارت، دمای آزمایشگاهی و عددی سطح گرمکن با به کارگیری امواج آلتراسونیک کاهش می‌یابد و نتایج با اختلاف حدود ۵ درصد به هم نزدیک هستند. مقایسه‌ی توزیع سرعت و دما که از نتایج عددی حاصل شده، نشان می‌دهد که با به کارگیری امواج آلتراسونیک، اختلاط جریان سیال بهتر صورت گرفته و هر چه دامنه موج آلتراسونیک بیشتر باشد، افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای سطح گرمکن بیشتر خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** آلتراسونیک، کاپیتاسیون صوتی، موج صوتی، ضریب انتقال حرارت، دامنه‌ی ارتعاش

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

\*نویسنده مسئول: mpfard@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

اهمیت زیاد انتقال حرارت در بسیاری از کاربردهای صنعتی سبب شده است که پژوهشگران به دنبال روش‌هایی برای افزایش نرخ انتقال حرارت و بازده تجهیزات گرمایشی و سرمایشی باشند.

استفاده از امواج آلتراسونیک که به عنوان امواجی با فرکانسی بالاتر از محدوده شنوایی انسان (حدود ۲۰ کیلوهرتز) شناخته می‌شوند، یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در سیستم‌های همراه با انتقال حرارت مانند سیستم‌های سرمایشی و مبدل‌های حرارتی است [1-3]. استفاده از امواج آلتراسونیک، سبب افزایش سرعت انتقال حرارت و بهبود راندمان سیستم‌های انتقال حرارت به دلیل ایجاد جریان‌های توربولانسی و کاهش زمان انتقال حرارت به دلیل عملکرد سریع امواج آلتراسونیک در افزایش انتقال حرارت می‌شود. همچنین، قابل کنترل بودن این روش، کاهش تشکیل رسوب و افزایش راندمان حرارتی، سبب استفاده از این روش جهت افزایش انتقال حرارت در انواع مبدل حرارتی شده است [1,2]. یکی دیگر از مزایای این روش در سیستم‌های همراه با نانو سیال است. به کارگیری امواج آلتراسونیک و استفاده از ذرات نانو سیال سبب بهبود بیشتر انتقال حرارت می‌شود. علاوه بر آن، اعمال آلتراسونیک سبب پایداری ذرات نانو در سیال می‌شود [4]. از معایب استفاده از روش آلتراسونیک در سیستم‌های حرارتی، هزینه بالای تجهیزات اولیه است.

انتشار امواج آلتراسونیک در محیط سیال به صورت سیکل‌های متناوب انبساط و انقباض، سبب دو فرآیند کاپیتاسیون صوتی و موج صوتی می‌شود. کاپیتاسیون صوتی به فرآیند تشکیل حباب‌های بخار، بزرگ شدن و فروپاشی آن‌ها گفته می‌شود و هنگامی که فشار از فشار اشباع کمتر شود، این فرآیند اتفاق می‌افتد. موج صوتی نیز در اثر اختلاف مومنتوم به دلیل اتلاف انرژی اتفاق می‌افتد. فرآیندهای کاپیتاسیون و موج صوتی، فرآیندهای اساسی در افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی هستند [2-3, 5]. حدود ۶۰ درصد پژوهش‌های انجام شده از سال ۲۰۱۰ مربوط به اثر امواج آلتراسونیک بر انتقال حرارت جابه‌جایی است [2].

کیم و جونگ [6]، با استفاده از مدلسازی عددی به بررسی اثر آلتراسونیک بر افزایش انتقال حرارت در محفظه مکعبی با استفاده از نرم افزار فلونت ۶/۱ پرداختند. حل عددی آن‌ها بدون در نظر گرفتن اثر کاپیتاسیون صوتی بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که علت کاهش دمای سطح گرم، افزایش اختلاط سیال با به کارگیری امواج آلتراسونیک است. به عبارت دیگر، جریان تازه‌تر همواره به سمت سطح گرم حرکت می‌کند که سبب کاهش دمای سیال در مجاورت سطح و افزایش انتقال حرارت می‌شود. جهت بررسی عددی اثر کاپیتاسیون صوتی بر افزایش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌ی مربعی، کی و همکاران [7]، اثر قرار دادن ترانس‌دیوسر با فرکانس ۱۸ کیلوهرتز در داخل محفظه را بررسی کردند. آن‌ها جهت مدلسازی عددی فرض کردند در قسمتی که ترانس‌دیوسر قرار می‌گیرد، فشار به صورت متناوب با رابطه‌ی کسینوسی تغییر می‌کند و سطح پایین محفظه به عنوان سطحی

برای این منظور، ترانسدایوسرها به صورت صفحات دایروی با شرط مرزی سینوسی برای سرعت ورودی در نظر گرفته می‌شود. با تغییر دامنه‌ی این موج سینوسی، سرعت‌های ورودی مختلفی به ازای هر دامنه به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، به صورت عددی به بررسی اثر دامنه موج صوتی روی میدان سرعت جریان و دمای سطح گرمکن و سیال پرداخته شده و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، علت افزایش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد با افزایش دامنه بررسی شده است. این موضوع کمتر توسط دیگر پژوهشگران بررسی شده است. در شبیه‌سازی عددی، در کف مخزن استوانه‌ای پنج ترانسدایوسر با آرایش یک ترانسدایوسر در مرکز و ۴ ترانسدایوسر در اطراف، در نظر گرفته شده است. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده از یک تا سه ترانسدایوسر با چیدمان خطی در کارهای آزمایشگاهی و از یک ترانسدایوسر در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. علاوه بر آن، جهت بررسی عددی از مدل کاویتاسیون اشنر و ساوئر (Schnerr and Sauer) استفاده شده است. بررسی شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این مدل توسط دیگر پژوهشگران جهت شبیه‌سازی فرآیند کاویتاسیون هنگام اعمال امواج آلتراسونیک استفاده نشده است. این مدل، سبب همگرایی سریع‌تر و پایداری بیشتر می‌شود و اثر گازهای محلول در سیال را در نظر نمی‌گیرد. جهت مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی و بررسی صحت نتایج آن‌ها، دمای متوسط سطح گرمکن و دمای سیال آب در ۴ نقطه‌ی مختلف در مخزن، به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و با نتایج عددی مقایسه شده است. با توجه به اینکه رابطه‌ی خاصی برای ضریب انتقال حرارت گرمکن ماریچی در منابع وجود ندارد، مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج تجربی در پژوهش حاضر، صحت نتایج را نشان می‌دهد. نتایج پژوهشگران نشان می‌دهد که هندسه‌ی گرمکن و نحوه قرارگیری آن در مخزن، تأثیر بسزایی در نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی دارد. اما اثر امواج آلتراسونیک در انتقال حرارت جابه‌جایی از گرمکن ماریچی مورد مطالعه قرار نگرفته است. استفاده از گرمکن ماریچی به دلیل داشتن سطح بیشتر نسبت به گرمکن‌های تخت و استوانه‌ای که توسط سایر پژوهشگران بررسی شده، این امکان را ایجاد می‌کند که درون فضای محدود مخزن حاوی سیال، حرارت از سطح بیشتری به سیال منتقل شود.

## ۲- شرح دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش، مخزنی شامل دو استوانه هم محور ساخته شده و ۵ ترانسدایوسر آلتراسونیک با فرکانس ۲۶ کیلوهرتز در کف آن چسبانده شده است. یک ترانسدایوسر در مرکز و چهار ترانسدایوسر دیگر با فواصل مساوی از مرکز در زوایای ۹۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند.

که در معرض شار ثابت حرارتی قرار دارد در نظر گرفته شده است. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که کاویتاسیون صوتی سبب ایجاد جت سیال در اطراف سطح گرم و نازک شدن لایه مرزی گرمایی و در نتیجه کاهش دمای سطح گرم می‌شود.

تاجیک و همکاران [8, 9]، به صورت عددی و آزمایشگاهی به مطالعه‌ی اثر موج صوتی روی نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی در محفظه‌ی استوانه‌ای که تا ارتفاع مشخصی از آب پر شده، پرداختند. آن‌ها گرمکن را به صورت صفحه‌ی تخت دایروی با شار یکنواخت رو به پایین، در بالای مخزن قرار دادند. بنابراین با برخورد امواج آلتراسونیک به سطح و برگشت آن، موج ایستا در مخزن شکل می‌گیرد که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. آن‌ها اثر ارتفاع گرمکن را نیز بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، در صورتی که ارتفاع گرمکن برابر با ضریبی از طول موج باشد، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

رحیمی و همکاران [10]، به بررسی عددی اثر امواج آلتراسونیک با فرکانس بالا در مخزن استوانه‌ای روی انتقال حرارت جابه‌جایی از گرمکن استوانه‌ای پرداختند. به منظور مدلسازی عددی، آن‌ها از نرم افزار فلونت ۶/۲ استفاده کردند. در شبیه‌سازی آن‌ها، ترانسدایوسر آلتراسونیک با فرکانس ۱/۷ مگا هرتز در کف مخزن و مرکز آن قرار گرفته و شرط سرعت ورودی به عنوان شرط مرزی ترانسدایوسر به کار گرفته شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با به کارگیری امواج آلتراسونیک ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و در نتیجه دمای سطح گرمکن کاهش می‌یابد.

آن‌ها در پژوهشی دیگر به مقایسه امواج آلتراسونیک با فرکانس ۱/۷ مگاهرتز و ۲۴ کیلوهرتز پرداختند [11]. جهت شبیه‌سازی امواج ۲۴ کیلوهرتز، ترانسدایوسر آلتراسونیک از قسمت بالای مخزن تا ارتفاع مشخصی در سیال آب قرار می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش نرخ انتقال حرارت با به کارگیری امواج با فرکانس ۱/۷ مگاهرتز دارای راندمان حرارتی بیشتری است.

یکی از پارامترهای مؤثر بر افزایش نرخ انتقال حرارت، توان آلتراسونیک است. بیشتر پژوهش‌ها در توان آلتراسونیک ثابت انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام شده در توان‌های مختلف آلتراسونیک نشان می‌دهد که با افزایش توان آلتراسونیک، درصد افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [12, 13]. کی و همکاران [12]، به بررسی اثر کاویتاسیون صوتی روی انتقال حرارت جابه‌جایی از گرمکن استوانه‌ای افقی پرداختند. آن‌ها ترانسدایوسر آلتراسونیک با فرکانس ۱۸ کیلوهرتز را از بالا در مخزن قرار دادند و توان آلتراسونیک را در بازه ۰ تا ۲۵۰ وات اعمال کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت در کمترین توان گرمکن و بیشترین توان آلتراسونیک بیشترین مقدار را دارد. برای توضیح علت افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش توان آلتراسونیک، در این پژوهش به صورت عددی به بررسی اثر این پارامتر با تغییر دامنه‌ی جابه‌جایی ترانسدایوسر پرداخته می‌شود.

برای انجام آزمایش، ابتدا قسمت داخلی مخزن با آب دیونیزه تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر پر می‌شود. دمای اولیه‌ی آب مخزن برابر با ۱۲ درجه سانتیگراد است. در مرحله‌ی اول ابتدا گرمکن روشن می‌شود و پس از آنکه تغییری در دمای سطح گرمکن مشاهده نشد (حدود ۵ دقیقه)، منبع تغذیه‌ی آلتراسونیک در مرحله‌ی دوم، روشن می‌شود و امواج آلتراسونیک با توان ۲۱۰ وات و فرکانس ۲۶ کیلوهرتز اعمال می‌شود. در این دو مرحله، دمای سیال و دمای سطح گرمکن به صورت پیوسته توسط داده خوان ثبت می‌شود.

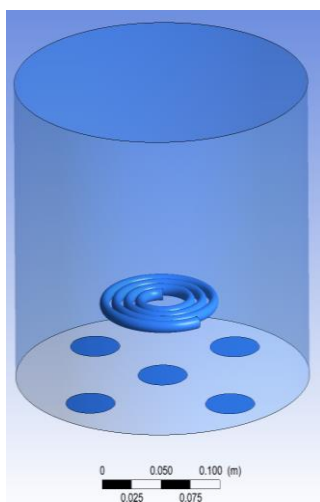
### ۳- مدل‌سازی عددی

#### ۳-۱- هندسه‌ی مسئله

در این پژوهش، شبیه‌سازی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۱۹ انجام شده است. همچنین هندسه‌ی گرمکن با استفاده از نرم افزار سالیدورکز ایجاد و سپس وارد محیط نرم افزار انسیس شده است. هندسه‌ی مخزن به صورت استوانه‌ای با شعاع ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که در سطح دایروی پایین آن یک ترانسدیوسر در مرکز و ۴ ترانسدیوسر دیگر، با زوایای ۹۰ درجه نسبت به همدیگر در فواصل یکسان از مرکز دایره، به صورت سطوح دایروی با قطر ۴ سانتی‌متر ایجاد شده است. ایجاد هندسه‌ی سه‌بعدی مخزن و شبکه‌بندی آن و همچنین شبکه‌بندی گرمکن مارپیچی توسط نرم افزار انسیس صورت گرفته است. شکل ۲، هندسه‌ی مخزن را نشان می‌دهد.

#### ۳-۲- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود که مرحله‌ی دوم بدون مقداردهی اولیه و پس از پایا شدن مرحله‌ی اول صورت می‌گیرد. مرحله اول: مدل‌سازی عددی در حالت عدم حضور امواج آلتراسونیک.

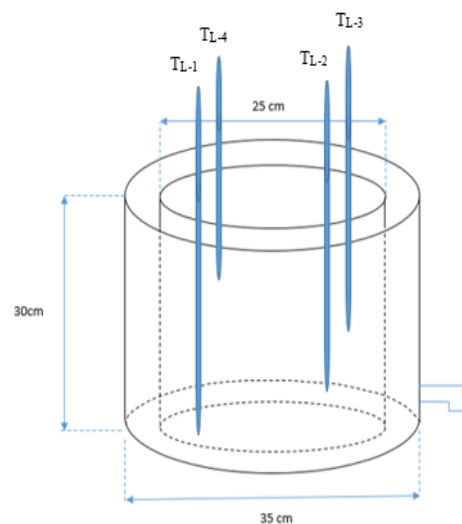


شکل ۲) هندسه مدل عددی

همچنین به منظور ثابت نگه داشتن دمای جداره‌ی استوانه‌ی داخلی در صفر درجه سانتیگراد، مخلوط آب و یخ در جدار بیرونی استوانه داخلی قرار داده شده است. گرمکن مارپیچی با قطر ۸ میلی‌متر و با قابلیت جابه‌جایی در ارتفاع ۵ سانتی‌متر از کف مخزن، در مرکز استوانه داخلی قرار گرفته است. قطر لوله‌ی گرمکن برابر با ۸ میلی‌متر است. دو ترموکوپل میله‌ای نوع k با ضخامت ۱ میلی‌متر، برای اندازه‌گیری دمای سطح گرمکن در دو نقطه‌ی متفاوت روی سطح گرمکن با بست محکم شده است. همچنین، دمای بالک سیال آب نیز، توسط ۴ ترموکوپل میله‌ای از نوع k اندازه‌گیری شده است. این ترموکوپل‌ها در ۴ ارتفاع متفاوت ۲، ۷، ۱۲ و ۱۷ سانتی‌متری از کف مخزن قرار گرفته‌اند. استفاده از ترموکوپل میله‌ای نوع k با ضخامت ۱ میلی‌متر سبب نوسان کمتر مقادیر اندازه‌گیری دما در هنگام اعمال امواج آلتراسونیک و دقت بیشتر نتایج می‌گردد. شکل ۱-الف و ب، به ترتیب مخزن آزمایش و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها را در داخل سیال نشان می‌دهد.



شکل ۱) الف) محل قرارگیری ترموکوپل‌ها



شکل ۱) ب) محل قرارگیری ترموکوپل‌ها

شکل ۱) الف) سامانه‌ی آزمایش، ب) محل قرارگیری ترموکوپل‌ها

$$P_{US} = P_0 \cos(\omega t) \quad (۴)$$

که در این رابطه،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و برابر با  $2\pi f$  است.  $P_{US}$  فشار بعد از اعمال آلتراسونیک و  $P_0$ ، بیشترین دامنه‌ی تغییرات فشار است.

در نتیجه با کاهش فشار، فرآیند کاویتاسیون صوتی صورت می‌گیرد. لذا جریان دو فازیه بوده و حباب‌های بخار تشکیل می‌شوند. بنابراین در این مقاله، برای شبیه‌سازی جریان دو فازیه از مدل مخلوط استفاده شده است.

در مدل مخلوط، معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad (۵)$$

در این روابط،  $\vec{V}_m$  و  $\rho_m$  سرعت متوسط و چگالی مخلوط هستند و توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n f_k \rho_k \vec{V}_k}{\rho_m} \quad (۶)$$

$$\rho_m = \sum_{i=0}^n f_k \rho_k \quad (۷)$$

که در این روابط،  $f_k$  کسر حجمی فاز  $k$  است.

همچنین معادله مومنتوم نیز با جمع کردن معادله‌های ممنتوم تک تک فازها محاسبه شده و به صورت زیر بیان می‌شود [15]:

تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{V}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) &= -\nabla P \\ &+ \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] \\ &+ \rho_m \vec{g} + \vec{F} \\ &+ \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n f_k \rho_k \vec{V}_{dr,k} \vec{V}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (۸)$$

که در این رابطه،  $n$  تعداد فازها است.  $\vec{F}$  نیروی حجمی و  $\mu_m$  ویسکوزیته مخلوط است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n f_k \mu_k \quad (۹)$$

همچنین،  $\vec{V}_{dr,k}$  سرعت رانش فاز دوم  $k$  است:

$$\vec{V}_{dr,k} = \vec{V}_k - \vec{V}_m \quad (۱۰)$$

معادله انرژی برای مخلوط نیز به صورت زیر می‌باشد [15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (f_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=0}^n f_k \vec{V}_k (\rho_k E_k + P) &= \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (۱۱)$$

در معادله‌ی فوق،  $k_{eff}$  رسانندگی مؤثر است که برابر با  $\sum \alpha_k (k_k + k_t)$  می‌باشد و  $k_t$  ضریب رسانندگی گرمایی مغشوش بوده که بر اساس مدل مغشوش تعریف می‌شود. عبارت

در حالتی که امواج آلتراسونیک اعمال نشود، به دلیل تغییرات چگالی در سیال و اثر نیروی گرانش، جریان ناشی از شناوری ایجاد شده که سبب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد می‌شود. در جابه‌جایی آزاد، عدد بدون بعد ناسلت تابعی از عدد بدون بعد رایلی است. عدد رایلی جهت بررسی قدرت جریان ناشی از شناوری به کار می‌رود و توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [14]:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha} \quad (۱)$$

که در این رابطه،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک،  $\Delta T$  اختلاف دما بین سطح گرمکن و بالک سیال،  $\beta$  ضریب انبساط گرمایی و  $\alpha$  ضریب پخش گرمایی و  $g$  شتاب گرانش زمین است.

جهت محاسبه‌ی عدد رایلی ابتدا خواص از جدول مربوط به آب در دمای متوسط سطح گرمکن و آب (۲۹۵ کلوین) خوانده می‌شود [14]:

$$\begin{aligned} Ra &= \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha} \\ &= \frac{9.81 \times 227.5 \times 10^{-6} \times (32.5 - 12) \times 0.008^3}{9.6 \times 10^{-7} \times 1.45 \times 10^{-7}} \\ &\cong 168281 \end{aligned} \quad (۲)$$

با توجه به اینکه عدد رایلی کمتر از  $10^8$  است، جریان ناشی از شناوری آرام در نظر گرفته می‌شود [14]. سیال مورد بررسی آب است که تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود.

به علت تغییرات چگالی در جابه‌جایی طبیعی، از تقریب بوزینسک برای چگالی استفاده می‌شود که در آن ارتباط چگالی و دما به صورت زیر است [14]:

$$(\rho_1 - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T_1 - T_0)g \quad (۳)$$

که  $\rho_0$  چگالی ثابت سیال،  $T_1$  و  $T_0$  به ترتیب دمای سیال و دمای عملکرد است. سایر خواص سیال به دلیل تغییرات ناچیز، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

معادلات حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشد. برای اتصال فشارسرعت از حلگر مبتنی بر فشار جفت شده استفاده شده است. جهت گسسته سازی فشار از طرح پرستو (Presto) و برای چگالی و مومنتوم از طرح بالادست مرتبه اول استفاده شده است.

سطح جانبی مخزن، دیواره با دمای صفر درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. همچنین در سطح آزاد مخزن فشار خروجی با فشار نسبی صفر پاسکال تعریف شده است.

مرحله دوم: مدلسازی عددی در حضور امواج آلتراسونیک امواج آلتراسونیک از موج‌های انبساط و انقباض تشکیل می‌شود. انتشار امواج آلتراسونیک در سیال باعث تغییر فشار به صورت متناوب می‌شود که تغییرات فشار را می‌توان توسط رابطه‌ی زیر در نظر گرفت [7]:

متلاطم می‌باشد. در این پژوهش از مدل RNG-k-ε جهت شبیه‌سازی جریان متلاطم استفاده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی امواج آلتراسونیک در محدوده فرکانس کم، دقت بالاتری دارد [10].

شرایط مرزی در مرحله‌ی دوم به غیر از شرط مرزی ترانسدیوسرهای آلتراسونیک، مشابه مرحله‌ی قبل می‌باشد. برای سطوح دایروی ترانسدیوسرها از شرط مرزی سرعت سینوسی طبق رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$v(t) = \omega A_0 \sin(\omega t) \quad (18)$$

که در این رابطه،  $A_0$  دامنه‌ی ارتعاشی بوده و در این مقاله مقادیر مختلفی برای آن در نظر گرفته می‌شود. با توجه به ناپایا بودن حل، گام زمانی برابر با یک هشتم زمان تناوب در فرکانس ۲۶۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شده که برابر با  $4/8 \times 10^{-6}$  ثانیه است.

حجم دامنه‌ی محاسباتی با استفاده از سلول‌های سه وجهی شبکه بندی شده است. سطوح دایروی ترانسدیوسر و سطح گرمکن و همچنین نواحی نزدیک به این سطوح به منظور دقت بیشتر نتایج عددی، با سلول‌های کوچک‌تری شبکه‌بندی شده است. عدم وابستگی حل به اندازه شبکه‌بندی نیز با به کارگیری اندازه‌های مختلفی از شبکه در دامنه‌ی محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته و دمای متوسط سطح گرمکن به عنوان معیاری برای استقلال از شبکه‌بندی در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به استقلال از شبکه در جدول ۱ آمده است. شبکه با اندازه ۹۳۰۵۴۲ به عنوان شبکه نهایی انتخاب شده است.

**جدول ۱** دمای متوسط سطح گرمکن برای اندازه‌های مختلفی از شبکه

اندازه شبکه	دمای متوسط سطح گرمکن (°C)
۷۴۱۱۵۱	۳۲/۴
۹۳۰۵۴۲	۳۳
۱۲۲۴۲۱	۳۳/۱

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- عدم قطعیت

عدم قطعیت کل دستگاه به صورت زیر محاسبه می‌شود [16]:

$$\delta F_{tot} = \sqrt{(\delta F_{inst})^2 + (\delta F_{rep})^2} \quad (19)$$

که در این رابطه،  $\delta F_{inst}$  عدم قطعیت دستگاه و  $\delta F_{rep}$  مربوط به عدم قطعیت حاصل از تکرار آزمایش است که به صورت زیر تعریف می‌شوند [16]:

$$\delta F_{rep} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

$$\delta F_{inst} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

اول در سمت راست معادله‌ی ۱۰، انتقال انرژی به دلیل رسانش را نشان می‌دهد.  $S_E$  شامل هر منبع حرارتی حجمی دیگر است. همچنین در معادله ۱۰،  $E_k$  برای فاز تراکم ناپذیر برابر با آنتالپی محسوس در نظر گرفته می‌شود.

از معادله‌ی پیوستگی، معادله کسر حجمی برای فاز دوم (فاز بخار) به صورت زیر به دست می‌آید [15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (f_v \rho_v) + \nabla \cdot (f_v \rho_v \vec{V}_m) \\ = -\nabla \cdot (f_v \rho_v \vec{V}_{dr,v}) \\ + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qv} - \dot{m}_{vq}) \end{aligned} \quad (12)$$

همچنین برای شبیه‌سازی فرآیند کاپیتاسیون، از مدل اشتر و ساوئر استفاده شده است. این مدل سبب همگرایی سریع‌تر و پایداری بیشتر می‌شود [15]. جهت مدل‌سازی کاپیتاسیون، یک فاز به عنوان سیال آب و یک فاز به عنوان بخار آب تنظیم می‌شود. در مدل کاپیتاسیون، انتقال جرم بین فاز بخار و سیال به صورت تشکیل حباب (تبخیر) و فروپاشی آن (میعان) در نظر گرفته می‌شود. همچنین مدل کاپیتاسیون اشتر و ساوئر به طور پیش فرض اثر گازهای غیر قابل تراکم را در نظر نمی‌گیرد. این مدل بر اساس معادله ریلی‌پلس (Rayleigh-Plesset) است. انتقال جرم بین دو فاز (تبخیر و میعان) با استفاده از معادله انتقال بخار به صورت زیر حاصل می‌شود [15]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f \rho_v) + \nabla \cdot (f \rho_v \vec{V}) = R \quad (13)$$

در این مدل، عبارت چشمه‌ی جرم خالص به صورت زیر است:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l D f}{\rho D t} \quad (14)$$

مدل اشتر و ساوئر از عبارت زیر برای ارتباط کسر حجمی با تعداد حباب‌ها در واحد حجم سیال استفاده می‌کند:

$$f = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi \Re_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi \Re_B^3} \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه‌ی فوق در رابطه‌ی نرخ انتقال جرم (رابطه‌ی ۱۵)، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} f (1 - f) \frac{3}{\Re_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 \rho_l}} \quad (16)$$

که در روابط فوق،  $\Re_B$  شعاع حباب برابر است با:

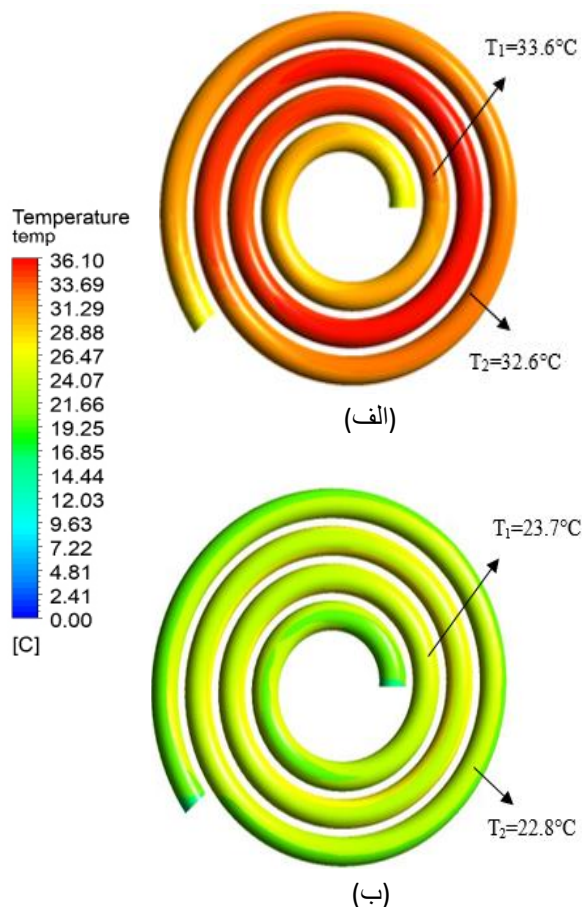
$$\Re_B = \left( \frac{f}{1 - f} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

در دمای ۱۲ درجه‌ی سانتیگراد، فشار اشباع آب برابر با ۱۳۸۷ پاسکال است. همچنین در این مرحله به دلیل تشکیل گردابه در اثر فروپاشی حباب‌های بخار در فرآیند کاپیتاسیون، جریان

ابزار اندازه‌گیری	کمیت اندازه‌گیری	دقت اندازه‌گیری	عدم قطعیت ابزار	عدم قطعیت تکرار	عدم قطعیت کل
ترموکوپل	دما (°C)	±۰/۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۲۶
گرمن	توان (W)	±۱	۰/۲۸	۰/۷۱	۰/۹۹
ژنراتور آلتراسونیک	جریان (A)	±۰/۱	۲/۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۰/۰۰۵	۰/۰۳۳
کولیس	طول (mm)	±۰/۱	۲/۸	۰/۱۴	۲/۹۴

صورت تجربی در نظر گرفته می‌شود. سپس، به صورت عددی، اثر افزایش دامنه‌ی موج صوتی روی شدت کاویتاسیون بررسی می‌شود.

در ادامه، نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به دمای سطح گرمکن مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل ۳، نتایج عددی مربوط به توزیع دمای سطح گرمکن را در حضور و عدم حضور امواج آلتراسونیک نشان می‌دهد. در این شکل، دمای حاصل از شبیه‌سازی عددی در دو نقطه از گرمکن که محل قرارگیری ترموکوپل‌ها می‌باشد، مشخص شده است. همچنین جدول ۱ نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به دمای سطح گرمکن را در این دو نقطه قبل و بعد از اعمال آلتراسونیک نشان می‌دهد.



شکل ۳) توزیع دمای سطح گرمکن (الف) قبل از اعمال آلتراسونیک، (ب) بعد از اعمال آلتراسونیک

$S$  و  $n$  در رابطه‌ی ۲۰، به ترتیب بیانگر انحراف از معیار و تعداد تکرار می‌باشند. در رابطه‌ی ۲۱،  $a$  نشان دهنده‌ی نصف دقت وسیله‌ی آزمایشگاهی است. عدم قطعیت مربوط به دستگاه‌های اندازه‌گیری در سامانه‌ی آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه‌ی ۲۲ تعیین می‌شود.

$$h = \frac{q}{A(T_h - T_l)} \quad (22)$$

که در این رابطه،  $q$  انتقال حرارت از گرمکن به سیال،  $A$  سطح گرمکن ماریچ،  $T_h$  دمای متوسط سطح گرمکن و  $T_l$  دمای متوسط سیال است.

عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $\delta h$ ) طبق رابطه‌ی ۲۳ تعیین می‌شود.

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial q} \delta q\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial A} \delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_h} \delta T_h\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_l} \delta T_l\right)^2} \quad (23)$$

که در این رابطه،  $\delta q$ ،  $\delta A$ ،  $\delta T_h$  و  $\delta T_l$  به ترتیب عدم قطعیت توان گرمکن، سطح گرمکن، دمای سطح گرمکن و دمای سیال هستند. نسبت به توان، سطح، دمای سطح و دمای سیال هستند.

در نتیجه عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از تقسیم عدد به دست آمده از رابطه‌ی ۲۲ بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت حدود  $\pm 4/8$  درصد است.

#### ۴-۲- اعتبارسنجی

جهت بررسی صحت مدل‌سازی، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. برای این منظور، ۵ ترانسدیوسر در کف مخزن مرتعش می‌شوند و توان آلتراسونیک برابر با ۲۱۰ وات در نظر گرفته می‌شود که معادل با دامنه‌ی ارتعاشی برابر با ۴ میکرومتر است.

در اثر انتشار امواج آلتراسونیک در توان آلتراسونیک ۲۱۰ وات، هر دو فرآیند کاویتاسیون صوتی و موج صوتی اتفاق می‌افتد و حباب‌های کاویتاسیون در سیال هنگام آزمایش دیده می‌شوند. بنابراین در این پژوهش، اثر هر دو فرآیند بر نرخ انتقال حرارت به

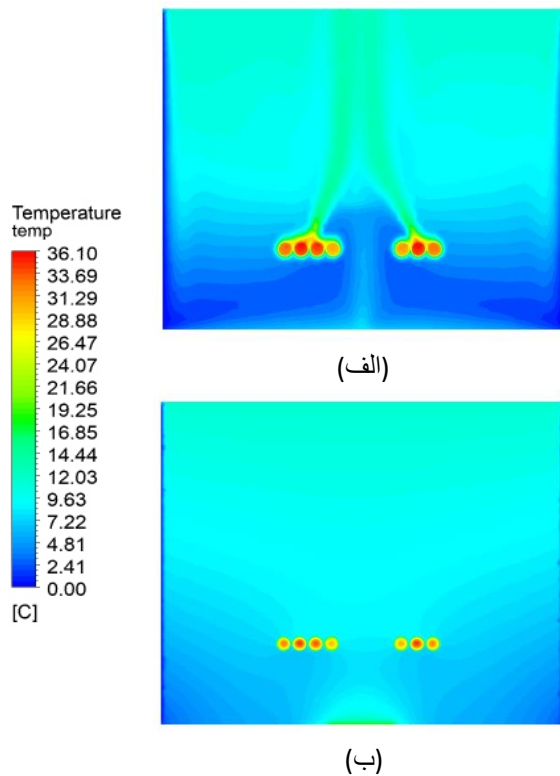
جدول ۳) عدم قطعیت اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف

عدم حضور امواج آلتراسونیک				حضور امواج آلتراسونیک		
دما	آزمایشگاهی (°C)	عددی (°C)	اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی	آزمایشگاهی (°C)	عددی (°C)	اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی
$T_1$	۳۲/۷	۳۳/۶	۲/۷۵	۲۲/۶	۲۳/۷	۴/۸۶
$T_2$	۳۲/۳	۳۲/۶	۰/۹۲	۲۲/۱	۲۲/۸	۳/۱۶

جدول ۳ نشان می‌دهد که نتایج عددی مربوط به دمای سطح گرمکن با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش نزدیک بوده و بیشترین اختلاف حدود ۵ درصد است.

**۳-۴- مقایسه توزیع دما و سرعت قبل و بعد از اعمال آلتراسونیک**  
ابتدا تغییرات دمای سطح گرمکن با زمان در شکل ۴ بررسی می‌شود. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت با اعمال آلتراسونیک، دمای متوسط سطح گرمکن پس از حدود ۱/۲ ثانیه به حالت پایا می‌رسد و بعد از آن تغییری مشاهده نمی‌شود. تغییرات دمای بالک سیال نیز به صورت عددی در شکل ۵ و مقادیر آن برای ۴ نقطه متفاوت که مطابق با محل قرارگیری ترموکوپلها در سامانه‌ی آزمایشگاهی (شکل ۱-ب) می‌باشد، با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ و جدول ۴، قبل از اعمال آلتراسونیک، دمای سیال در پایین گرمکن، کمترین مقدار را دارد و با افزایش ارتفاع از کف مخزن، دمای سیال بیشتر می‌شود. بعد از اعمال آلتراسونیک، دمای سیال یکنواخت‌تر و در قسمت‌های مختلف به هم نزدیک می‌شود. با توجه به نتایج عددی، اختلاف دمای سیال قسمت پایین و بالا در مخزن از مقدار ۷ درجه سانتیگراد قبل از اعمال آلتراسونیک به ۴ درجه سانتیگراد بعد از اعمال آلتراسونیک کاهش می‌یابد، اما همچنان دمای سیال در قسمت پایین مخزن کمتر است.

برای توضیح تغییرات دما در مخزن، بردارهای سرعت قبل و بعد از اعمال آلتراسونیک در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود، قبل از اعمال آلتراسونیک، جریان آب

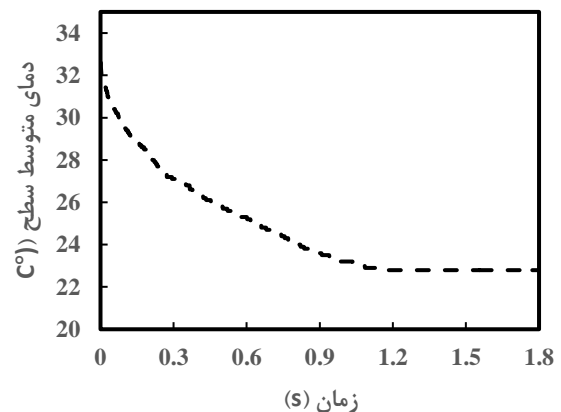


شکل ۵) توزیع دما، الف) قبل از اعمال آلتراسونیک، ب) بعد از اعمال آلتراسونیک

نسبتاً گرم از محل گرمکن به سمت بالا می‌رود و سپس با توجه به اینکه دیواره دارای دمای صفر درجه سانتیگراد است، جریان سرد در اطراف دیواره از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند. این امر سبب کمتر شدن دمای سیال در قسمت پایین گرمکن می‌شود. اما با اعمال آلتراسونیک، جریان سیال در قسمت‌های مختلف، دارای سرعت بیشتری است و به دلیل جریان‌های چرخشی کوچکی که در اطراف گرمکن تشکیل شده، اختلاط سیال در قسمت‌های مختلف مخزن بیشتر می‌شود. بنابراین دمای سیال نیز یکنواخت‌تر می‌شود.

از رابطه‌ی ۲۲ برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت در صورت عدم حضور و حضور امواج آلتراسونیک که به ترتیب با  $h_u$  و  $h_0$  نشان داده می‌شود، می‌توان استفاده کرد. درصد افزایش ضریب انتقال حرارت نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{h_u - h_0}{h_0} \quad (23)$$



شکل ۴) تغییرات دمای متوسط سطح گرمکن با زمان



جدول ۴) مقایسه توزیع دمای آزمایشگاهی و عددی بالک سیال قبل و بعد از اعمال آلتراسونیک در نقاط مشخص شده مطابق شکل ۱-ب

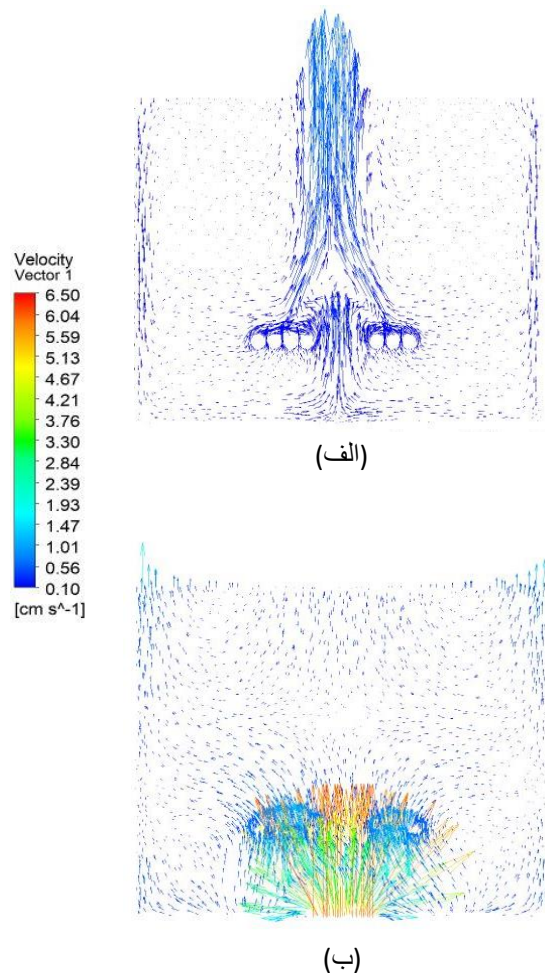
حضور امواج آلتراسونیک		عدم حضور امواج آلتراسونیک	
عددی (°C)	آزمایشگاهی (°C)	عددی (°C)	آزمایشگاهی (°C)
۸	۱۰/۵	۵	۶
۹	۱۱	۸/۸	۹
۱۱	۱۱/۴	۱۰/۵	۱۱
۱۲	۱۱/۴	۱۲	۱۲

جدول ۵) مقایسه آزمایشگاهی و عددی ضریب انتقال حرارت در صورت حضور و عدم حضور امواج آلتراسونیک و درصد افزایش آن

درصد افزایش ضریب انتقال حرارت (%)		ضریب انتقال حرارت در حضور امواج آلتراسونیک ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )		ضریب انتقال حرارت بدون حضور امواج آلتراسونیک ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )	
عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی
۸۱/۹	۷۹/۱	۱۱۳۴/۳	۱۱۸۲/۳	۶۲۳/۶	۶۶۰

(An) بررسی می‌شود. برای این منظور تغییرات دامنه در بازه ۸-<sup>۴</sup> تا <sup>۷</sup>۶/۱۲×۱۰<sup>-۷</sup> متر در نظر گرفته شده است. شکل ۷، تغییرات دمای سطح گرمکن را به ازای دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز مقادیر دمای متوسط سطح گرمکن را برای دامنه‌های بررسی شده مشخص می‌کند. با توجه به شکل و جدول، با افزایش دامنه، دمای متوسط سطح گرمکن از ۲۶/۸ به ۱۹/۵ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. کاهش محسوس دمای سطح گرمکن به علت تغییرات سرعت جریان در اثر افزایش دامنه‌ی ارتعاشی است. شکل ۸، تغییرات سرعت جریان را برای دامنه‌های ارتعاشی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی، سرعت جریان سیال نیز افزایش می‌یابد. به ازای دامنه‌های <sup>۸</sup>۴/۹×۱۰<sup>-۸</sup>، <sup>۷</sup>۱/۲×۱۰<sup>-۷</sup> و <sup>۷</sup>۴×۱۰<sup>-۷</sup> متر، بیشینه سرعت در سطح ترانسدیوسرها اتفاق می‌افتد و با افزایش دامنه، سرعت جریان سیال در کل مخزن و سرعت متوسط اطراف گرمکن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده، سرعت متوسط در اطراف گرمکن از ۰/۱۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. اما هنگامی که مقدار دامنه‌ی ارتعاشی <sup>۷</sup>۶/۱۲×۱۰<sup>-۷</sup> متر باشد، بیشینه سرعت بالاتر از سطح ترانسدیوسر و در فاصله‌ی بین ترانسدیوسر و گرمکن اتفاق می‌افتد. این امر سبب افزایش سرعت متوسط به مقدار ۳/۵ سانتی-متر بر ثانیه در اطراف سطح گرمکن می‌شود.

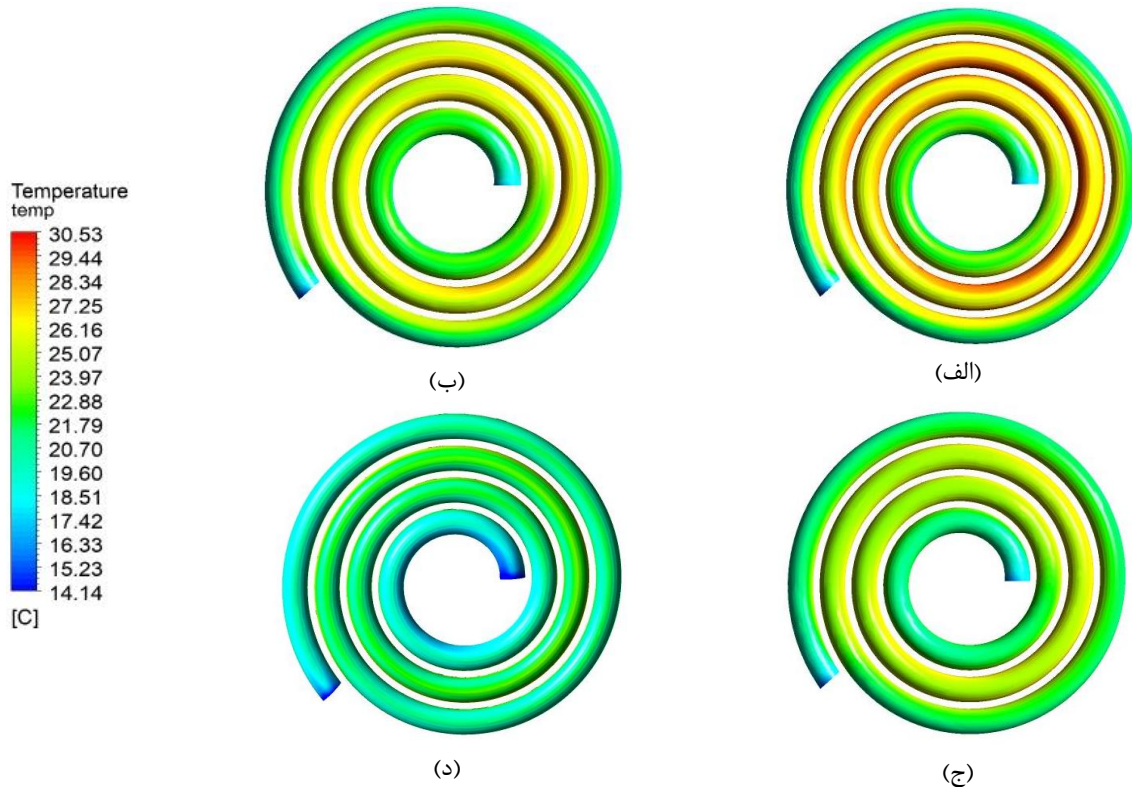
افزایش سرعت سیال در اطراف گرمکن، سبب افزایش توربولنسی در این ناحیه می‌شود. علاوه بر آن، انتشار امواج آلتراسونیک سبب فرآیندهای کاویتاسیون و موج صوتی در سیال می‌شود. این فرآیندها اثرات فیزیکی قابل توجهی دارند که باعث تغییر در ضخامت لایه مرزی حرارتی و سرعتی و در نتیجه مقاومت حرارتی می‌شوند.



شکل ۶) بردارهای سرعت، الف) عدم حضور امواج آلتراسونیک، ب) در حضور امواج آلتراسونیک

#### ۴-۴- تأثیر دامنه ارتعاش

در این بخش، تأثیر دامنه ارتعاشی روی تغییرات دمای سطح گرمکن و جریان سیال به ازای مقادیر متفاوت دامنه ارتعاشی



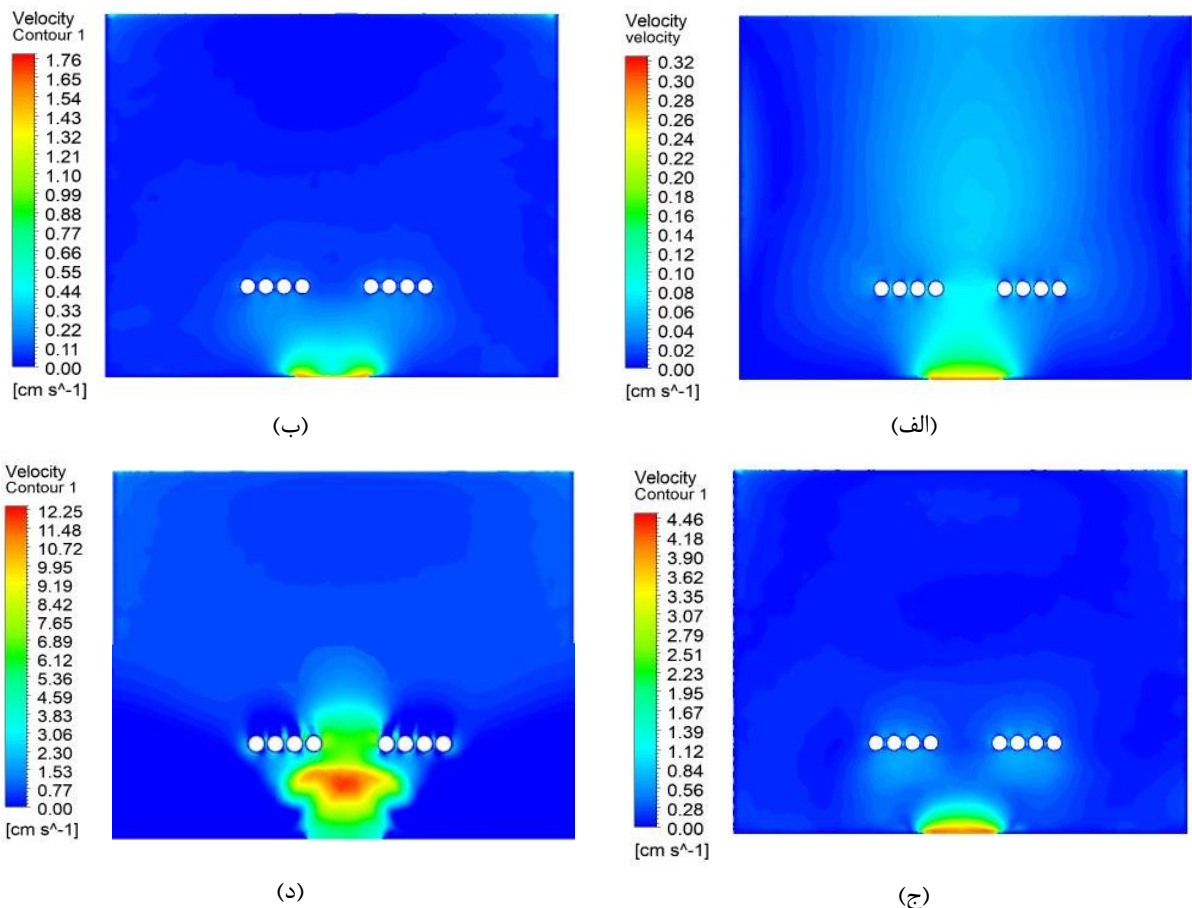
شکل ۷) توزیع دمای سطح گرمکن برای دامنه‌های ارتعاشی الف)  $4/9 \times 10^{-8}$  متر، ب)  $1/2 \times 10^{-7}$  متر، ج)  $4 \times 10^{-7}$  متر، د)  $6/2 \times 10^{-7}$  متر

جدول ۶) نتایج عددی مربوط به دمای متوسط سطح گرمکن به ازای دامنه‌های مختلف

دامنه ارتعاشی (m)	متوسط دمای سطح گرمکن (°C)
$4/9 \times 10^{-8}$	۲۶/۸
$1/2 \times 10^{-7}$	۲۵
$4 \times 10^{-7}$	۲۳/۶
$6/2 \times 10^{-7}$	۱۹/۵

با توجه به شکل، به ازای کمترین دامنه‌ی ارتعاشی، جریان چرخشی در اطراف دیواره تشکیل شده و با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی، چرخش جریان در اطراف گرمکن سبب اختلاط جریان در این ناحیه می‌شود. در دامنه‌ی ارتعاشی بیشینه (شکل ۹-د)، در پایین سطح گرمکن گردابه‌های بزرگتری تشکیل می‌شود. توزیع کسر حجمی بخار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل، کسر حجمی بخار که بیانگر فرآیند کاویتاسیون است، در فاصله‌ی بین ترانسدیوسر و گرمکن بیشترین مقدار را دارد و با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین مقدار کسر حجمی بخار نیز با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی، در فاصله‌ی بیشتری نسبت به سطح ترانسدیوسر و نزدیک به سطح گرمکن دیده می‌شود. بنابراین در دامنه‌ی ارتعاشی بیشتر، کسر حجمی بخار در اطراف گرمکن بیشینه است (شکل ۱۰-د) و فرآیند کاویتاسیون در نزدیکی سطح گرمکن اتفاق می‌افتد.

کاویتاسیون صوتی که در شدت‌های صوتی بالا صورت می‌گیرد، برخی فرآیندهای هیدرودینامیکی را شکل می‌دهد که جابه‌جایی بالک سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی را به همراه دارد. حرکت نوسانی آهسته‌ی المان‌های سیال سبب ایجاد جریان‌های میکرو می‌شود. علاوه بر آن، نوسان حباب‌های کاویتاسیون در جهت شعاعی سبب حرکت سیال مجاور حباب‌ها با سرعت بالا می‌شود که علت افزایش سرعت جریان در محفظه است. علاوه بر کاویتاسیون صوتی، جریان صوتی نیز با کاهش ضخامت لایه مرزی سبب اختلاط جریان و درهم شدن جریان می‌گردد که افزایش انتقال حرارت از سطح گرمکن و کاهش دمای سطح آن را به دنبال دارد. در ادامه، اثرات فیزیکی این فرآیندها، با بررسی خطوط جریان و تغییرات کسر حجمی با افزایش دامنه توضیح داده خواهد شد. شکل ۹، بردارهای سرعت و خطوط جریان را در اطراف گرمکن برای دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸) توزیع مقدار سرعت کل برای دامنه‌های ارتعاشی الف)  $4/9 \times 10^{-8}$  متر، ب)  $1/2 \times 10^{-7}$  متر، ج)  $4 \times 10^{-7}$  متر، د)  $6/2 \times 10^{-7}$  متر

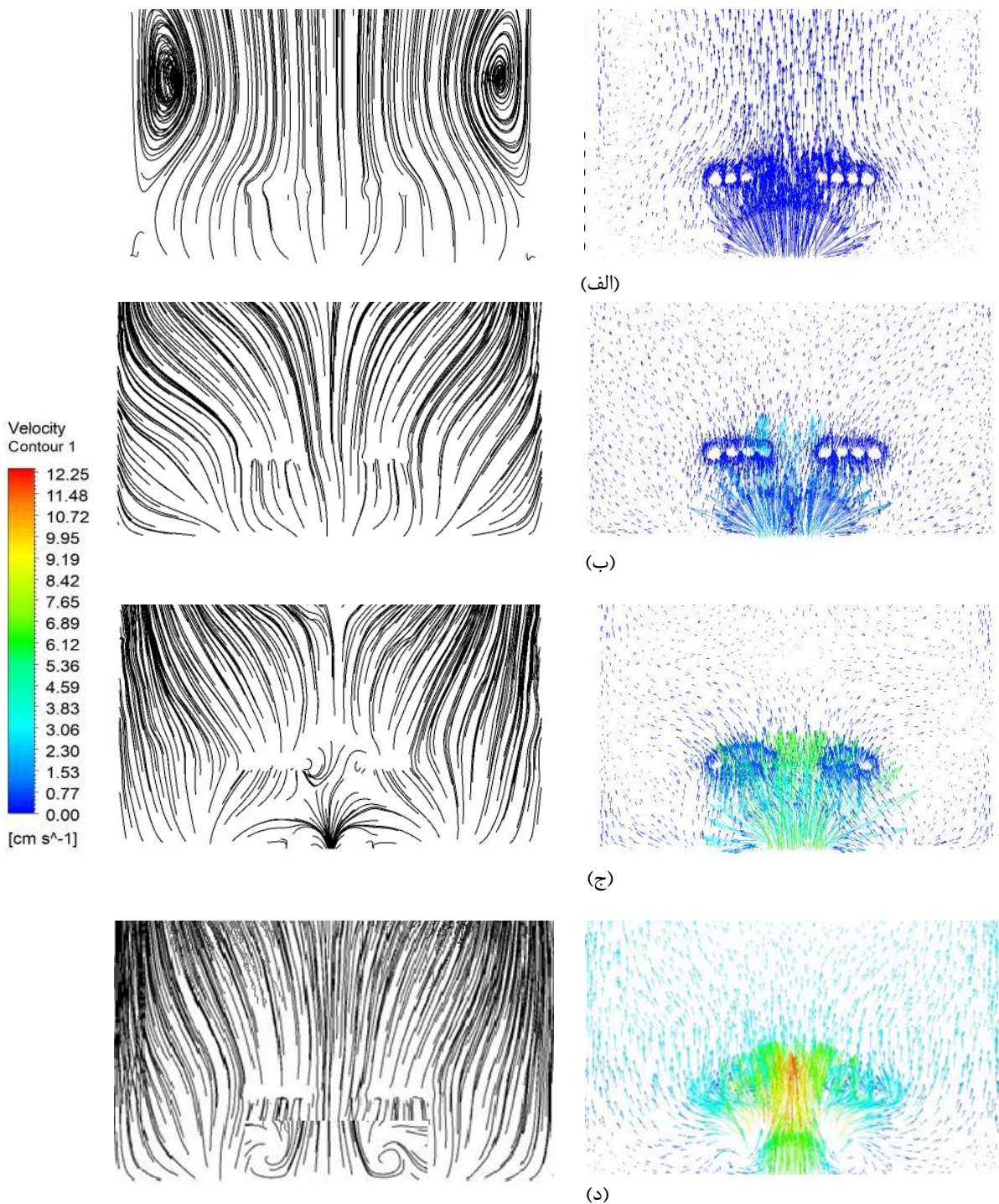
جدول ۷) نتایج عددی مربوط به سرعت متوسط سیال در اطراف گرمکن به ازای دامنه‌های مختلف

دامنه ارتعاشی (m)	متوسط سرعت در اطراف گرمکن (cm/s)
$4/9 \times 10^{-8}$	۰/۱۵
$1/2 \times 10^{-7}$	۰/۳۳
$4 \times 10^{-7}$	۱/۵
$6/2 \times 10^{-7}$	۳/۵

سطح گرمکن مطابق با شکل ۸ بیشتر می‌شود و گردابه‌های بزرگتری در فاصله‌ی بین گرمکن و سطح ترانسدیوسر و گردابه‌های بیشتری در اطراف گرمکن دیده می‌شود (شکل ۹). علاوه بر آن، سرعت جریان در کل محفظه بیشتر می‌شود. بنابراین، افزایش دامنه سبب اختلاط و متلاطم شدن جریان می‌گردد که در اثر آن، دمای سیال یکنواخت می‌شود و انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

شکل ۱۱، تغییرات ضریب انتقال حرارت در حضور امواج آلتراسونیک را برای دامنه‌های مختلف نشان می‌دهد.

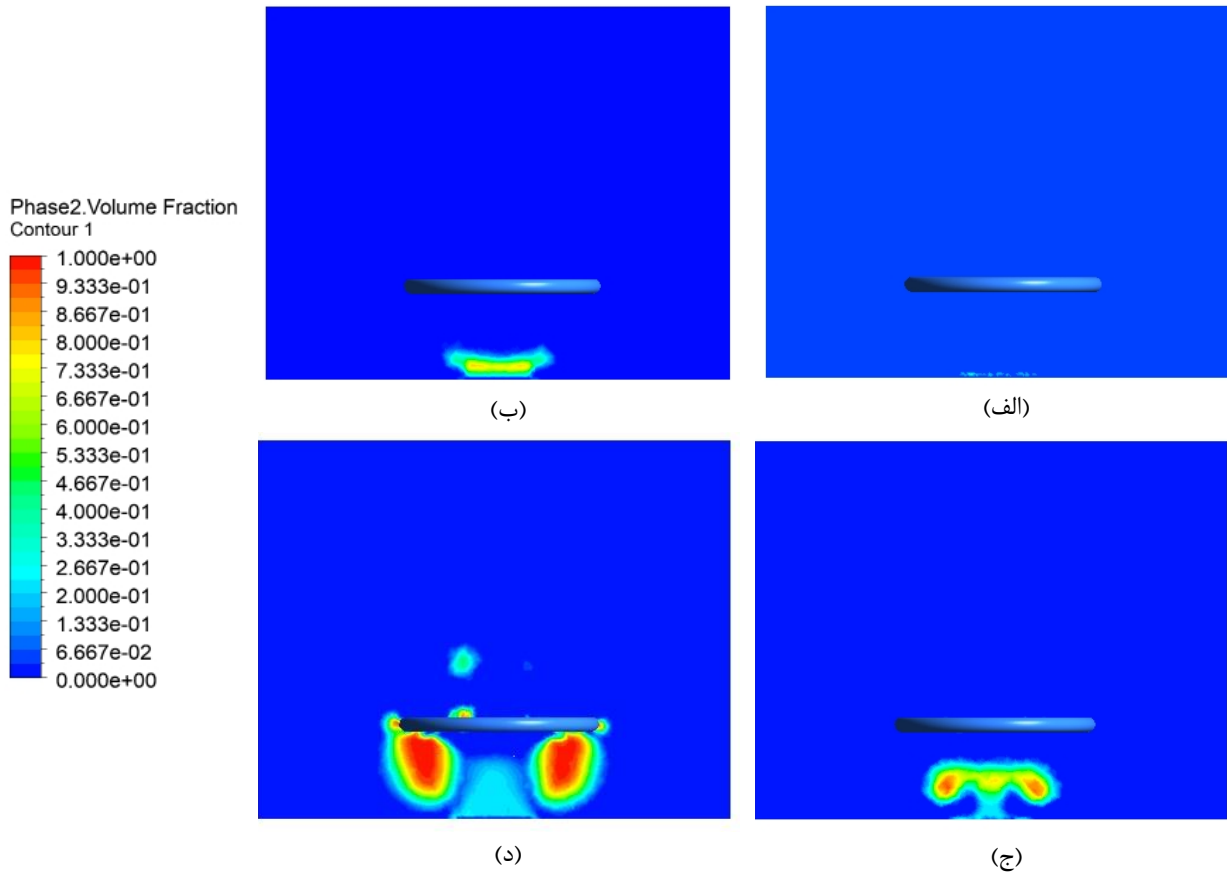
این فرآیند که شامل تشکیل، رشد، نوسان و فروپاشی حباب‌های بخار در سیال می‌باشد، سبب ایجاد میکروجت و موج ضربه در مقیاس میکرو می‌شود. هر چه میزان فروپاشی حباب‌های بخار در نزدیکی سطح گرمکن بیشتر باشد، جت سیال تشکیل شده و موج ضربه که به سطح گرمکن برخورد می‌کند، سبب تغییر بیشتر در لایه مرزی گرمایی و سرعتی و کاهش ضخامت آن‌ها می‌شود. در نتیجه، مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد که این امر، سبب کاهش دمای سطح گرمکن مطابق شکل ۷ می‌شود. همچنین، با افزایش دامنه، سرعت جریان در اطراف گرمکن و در سایر نقاط سیال در اثر افزایش فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون در نزدیکی



شکل ۹) توزیع بردارهای سرعت برای دامنه‌های ارتعاشی الف)  $4 \times 10^{-8}$  متر، ب)  $1/2 \times 10^{-7}$  متر، ج)  $4 \times 10^{-7}$  متر، د)  $6/2 \times 10^{-7}$  متر

سیال و موج ضربه، سبب افزایش سرعت جریان در اطراف گرمکن و در کل محفظه و همچنین کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی و مقاومت گرمایی می‌شود که به دنبال آن انتقال حرارت از سطح گرمکن افزایش می‌یابد. هر چه فرآیند کاویتاسیون در نزدیکی سطح گرمکن صورت گیرد، اثر آن روی کاهش مقاومت حرارتی و

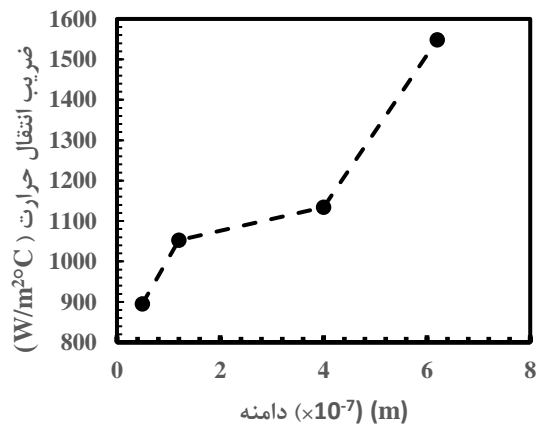
در این نتایج با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش ضریب انتقال حرارت به ازای دامنه‌ی  $6/12 \times 10^{-7}$  متر محسوس‌تر می‌باشد که علت آن تشکیل کاویتاسیون در نزدیکی سطح گرمکن است. همان‌طور که گفته شد، اثرات فیزیکی ناشی از فرآیند کاویتاسیون مانند تشکیل جت



شکل ۱۰) توزیع نسبت حجمی بخار برای دامنه‌های ارتعاشی الف)  $4/9 \times 10^{-8}$  متر، ب)  $1/2 \times 10^{-7}$  متر، ج)  $4 \times 10^{-7}$  متر، د)  $6/2 \times 10^{-7}$  متر

### ۵- جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی اثر دامنه‌ی ارتعاشی امواج آلتراسونیک بر ضریب انتقال حرارت و دمای متوسط سطح گرمکن پرداخته شده است. ابتدا، نتایج عددی برای یک دامنه‌ی مشخص با نتایج آزمایشگاهی مربوط به دمای سطح گرمکن و دمای سیال، مقایسه شده که نزدیکی بسیار خوبی بین نتایج این دو روش مشاهده می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهد که با به کارگیری امواج آلتراسونیک، دمای سیال یکنواخت‌تر شده و سرعت جریان سیال نیز افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش دمای سطح گرمکن می‌گردد. با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی، سرعت جریان سیال نیز افزایش می‌یابد و گردابه‌های کوچکی در اطراف گرمکن تشکیل می‌شود. علاوه بر آن، کسر حجمی بخار نیز افزایش می‌یابد و بیشینه‌ی مقدار آن با افزایش دامنه، در فاصله‌ی کمتری از گرمکن دیده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش کاویتاسیون با افزایش دامنه‌ی ارتعاشی است. بنابراین ضریب انتقال حرارت با افزایش دامنه، بیشتر و متوسط دمای سطح گرمکن کمتر می‌شود.



شکل ۱۱) تغییرات ضریب انتقال حرارت در حضور امواج آلتراسونیک بر حسب دامنه‌های مختلف

افزایش سرعت جریان، به علت ایجاد گردابه‌های بیشتر و بزرگ‌تر در اطراف سطح گرمکن و در فاصله‌ی بین سطح ترانسدیوسر و گرمکن، بیشتر است. بنابراین با افزایش دامنه که سبب ایجاد فرآیند کاویتاسیون با شدت بیشتری در اطراف سطح گرمکن می‌شود، انتقال حرارت از سطح گرمکن بیشتر می‌شود. همین امر، سبب افزایش انتقال حرارت بیشتر ضریب انتقال حرارت با تغییر دامنه‌ی ارتعاشی از  $4 \times 10^{-7}$  به  $6/12 \times 10^{-7}$  متر می‌شد.

modeling of convection heat transfer using 1.7 MHz and 24 kHz ultrasonic waves: a comparative study. *Heat and Mass Transfer*. 2014 Sep;50:1319-33.

12- Cai J, Huai X, Liang S, Li X. Augmentation of natural convective heat transfer by acoustic cavitation. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*. 2010 Sep;4:313-8.

13- Zhou D, Hu X, Liu D. Local convective heat transfer from a horizontal tube in an acoustic cavitation field. *Journal of Thermal Science*. 2004 Nov;13:338-43.

14- Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Wiley; 1996 Feb 16.

15- ANSYS I. *ANSYS Fluent Tutorial Guide*, Technology Drive Canonsburg PA 15317: ANSYS.

16- Moffat RJ. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*. 1988 Jan 1;1(1):3-17.

**تأییدیه اخلاقی:** محتوای این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**تعارض منافع:** هزینه‌های این پژوهش به عنوان طرح پژوهشی شماره ۳ رساله دکتری توسط دانشگاه و نویسندگان تأمین شده است.

### منابع

1- Legay M, Gondrexon N, Le Person S, Boldo P, Bontemps A. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances. *International Journal of Chemical Engineering*. 2011 Oct 5;2011.

2- Dehbani M, Rahimi M, Rahimi Z. A review on convective heat transfer enhancement using ultrasound. *Applied Thermal Engineering*. 2022 May 25;208:118273.

3- Bulliard-Sauret O, Berindei J, Ferrouillat S, Vignal L, Memponteil A, Poncet C, Leveque JM, Gondrexon N. Heat transfer intensification by low or high frequency ultrasound: Thermal and hydrodynamic phenomenological analysis. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019 Jun 1;104:258-71.

4- Azimy H, Meghdadi Isfahani AH, Farahnakian M. Investigation of the effect of ultrasonic waves on heat transfer and nanofluid stability of MWCNTs in sono heat exchanger: an experimental study. *Heat and Mass Transfer*. 2022 Mar;58(3):467-79.

5- Hyun S, Lee DR, Loh BG. Investigation of convective heat transfer augmentation using acoustic streaming generated by ultrasonic vibrations. *International journal of Heat and mass Transfer*. 2005 Jan 1;48(3-4):703-18.

6- Kim HJ, Jeong JH. Numerical analysis of experimental observations for heat transfer augmentation by ultrasonic vibration. *Heat Transfer Engineering*. 2006 Mar 1;27(2):14-22.

7- Cai J, Huai X, Yan R, Cheng Y. Numerical simulation on enhancement of natural convection heat transfer by acoustic cavitation in a square enclosure. *Applied Thermal Engineering*. 2009 Jul 1;29(10):1973-82.

8- Tajik B, Abbassi A, Saffar-Avval M, Abdullah A, Mohammad-Abadi H. Numerical simulation of acoustic streaming for nonlinear standing ultrasonic wave in water inside axisymmetric enclosure. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2012 Jan 1;6(3):366-82.

9- Tajik B, Abbassi A, Saffar-Avval M, Abdullah A, Mohammad-Abadi H. Heat transfer enhancement by acoustic streaming in a closed cylindrical enclosure filled with water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013 May 1;60:230-5.

10- Abolhasani M, Rahimi M, Dehbani M, Alsairafi AA. CFD modeling of heat transfer by 1.7 MHz ultrasound waves. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2012 Nov 15;62(10):822-41.

11- Dehbani M, Rahimi M, Abolhasani M, Maghsoodi A, Afshar PG, Dodmantipi AR, Alsairafi AA. CFD