ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(5):315-326

Experimental Study of the Effects of Ultrasonic Waves on Surface Sediments in Pool Boiling

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Khooshehchin M.[1] *PhD*,
Ghotbinasab S.[2] *MSc*,
Mohammadidoust A.[1*] *PhD*

How to cite this article
Khooshehchin M, Ghotbinasab S, Mohammadidoust A. Experimental Study of the Effects of Ultrasonic Waves on Surface Sediments in Pool Boiling. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(5):315-326.

[1] Department of Chemical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
[2] Departement of Chemical Industry, University of Applied and Technology, Dehloran Center, Iran

Correspondence
Address: Department of Chemical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.
Phone: -
Fax: -
mohammadidoust@iauksh.ac.ir

Article History
Received: July 16, 2020
Accepted: December 14, 2020
ePublished: April 19, 2021

ABSTRACT

Increasing heat transfer and preventing sedimentation in equipment have always attracted the engineer's attention. In this work, the variations of salt concentration were effective on bubble diameter, departure frequency, and generation points, and its sediments acted as a heat transfer resistance. Therefore, first, the effect of ultrasonic waves was investigated on salt sedimentations in pool boiling. The results revealed that the ultrasonic waves had a positive effect by suspending the soluble particles in the fluid and preventing them from precipitating on the surface of heat transfer. Increasing turbulences and perturbations improved the heat transfer coefficient due to changes in bubble dynamic and cavitation phenomenon significantly. The effect of roughness on the surface heat transfer in bubble production was another investigation of this research. Bubble production by increasing the roughness with ultrasonic wave irradiation had direct and important effects on enhancing the heat transfer. Finally, salt and nanofluid sediments were compared. The nanoparticles precipitate faster and more easily under the bubble layer, but less in the salt solution if its dissolution is maintained. The ultrasonic waves were employed at three powers of 30%, 60%, and 90%. Finally, the heat transfer coefficient and bubble departure diameter increased by 8.43% and 7.54%, respectively. Also, the sedimentation decreased by 37.19%. As a result, the waves reduced their deposition by preserving salt dissolution.

Keywords Pool Boiling, Ultrasonic Waves, Sediment, Boiling Heat Transfer Coefficient

CITATION LINKS

[1] Experimental studies on pool boiling het... [2] Pool boiling heat transfer and bubble dynamics... [3] Fundamentals of multiphase flow. [4] Study of flow boiling heat transfer characteristics... [5] A review on critical heat flux enhancement with nanofluids... [6] Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling... [7] Pool boiling heat transfer on copper foam... [8] Effect of inclination angle on the pool boiling heat transfer... [9] Experimental investigations on pool boiling... [10] Experimental investigation on boiling heat transfer characteristics of the spent fuel... [11] Experimental investigation of nucleate pool boiling characteristics of high concentrated... [12] An experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer... [13] Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer enhancement... [14] Analysis of the influence of surface roughness and nanoparticle... [15] Effects of thickness of boiling-induced nanoparticle deposition... [16] Pool boiling heat transfer enhancement... [17] Experimental investigation of the effect of particle deposition... [18] Initiation of CaSO4 scale formation... [19] Fouling of tube bundles under pool boiling conditions. [20] Modeling of CaSO4 crystallization fouling... [21] Surfactant aided bubble departure... [22] Surfactant prevented growth and enhanced thermophysical... [23] Enhanced thermal uniformity and stability... [24] Ultra-high pool boiling performance and effect of channel width... [25] Subcooled Nucleate Boiling of Alumina Nanofluid... [26] The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability and heat transfer... [27] A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag... [28] Comparing the heat transfer coefficient of copper sulfate and isopropanol solutions... [29] A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer... [30] Mixed salt crystallisation fouling. [31] A new model for the effect of calcium sulfate... [32] Application of asymptotic model for the prediction of fouling rate... [33] Statistical analysis of calcium sulfate... [34] Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity... [35] Fouling studies and control in heat exchangers. [36] An analysis of pool boiling heat transfer... [37] An optimization study on heat transfer of pool boiling... [38] Experimental study of micro-particle fouling...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی آزمایشگاهی اثرات امواج فراصوت بر رسوبات سطحی در جوشش استخری

محسن خوشه‌چین PhD
گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی،کرمانشاه، ایران
سمیرا قطبی نسب MSc
گروه صنایع شیمیایی، مرکز علمی کاربردی دهلران، ایلام، ایران
اکبر محمدی دوست* PhD
گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی،کرمانشاه، ایران

چکیده
افزایش انتقال حرارت و جلوگیری از رسوب ذرات در تجهیزات، همواره مورد توجه مهندسان بوده است. در این تحقیق تغییرات غلظت نمک بر دینامیک حباب موثر بوده و با رسوب بر سطح انتقال حرارت به عنوان یک مقاومت عمل کرد. بنابراین به منظور کاهش رسوب، ابتدا تاثیرامواج فراصوت بر رسوبات نمکی در جوشش استخری بررسی شد. نتایج نشان داد که امواج فراصوت با معلق نگه‌داشتن ذرات محلول در سیال و جلوگیری از رسوب آن‌ها بر سطح انتقال حرارت، اثر مثبتی بر انتقال حرارت داشت. افزایش اغتشاشات به سبب تغییر در دینامیک حباب و پدیده‌ی کاویتاسیون، موجب بهبود انتقال حرارت شد. در نهایت، نقش ایجاد زبری بر سطح انتقال حرارت در تولید حباب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب تولید حباب به وسیله افزایش زبری و امواج فراصوت، اثر مهمی در افزایش انتقال حرارت داشته‌اند. امواج فراصوت در سه قدرت امواج ۳۰%، ۶۰% و ۹۰% اعمال گردید به طوری که توان ۹۰% توانست به ترتیب ضریب انتقال حرارت و قطر جدایش را تا حدود ۸/۴۳% و ۷/۵۴% نسبت به حالت بدون پرتو دهی امواج افزایش داده و همچنین رسوب را تا ۳۷/۱۹% کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: جوشش استخری، امواج فراصوت، رسوب، ضریب انتقال حرارت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴
*نویسنده مسئول: mohammadidoust@iauksh.ac.ir

۱- مقدمه
به علت وجود بحران انرژی در سراسر جهان، توجه بیشتری معطوف به صرفه‌جویی در تولید انرژی و تبدیل کارآمد آن در تجهیزات صنعتی شده است. یکی از روش‌های موثر برای انتقال انرژی حرارتی با شار حرارت بالا، فرآیند تغییر فاز مایع به بخار (تبخیر و جوشش) و بالعکس می‌باشد[1]. انتقال گرما به روش جوشش، یکی از موثرترین روش‌های انتقال حرارت به‌دلیل گرمای نهان تبخیر بالا می‌باشد. این روش کاربردهای صنعتی زیادی در ارتباط با سیستم‌های تبادل گرما، تبدیل انرژی و خنک‌سازی راکتورهای هسته‌ای با قدرت بالا دارد[2, 3]. اما با این وجود فرآیند جوشش دارای محدودیت‌های حرارتی می‌باشد که با توجه به شرایط سیستم در حین فرآیند به وجود می‌آید. یکی از این محدودیت‌ها خارج شدن فرآیند از ناحیه جوشش هسته‌ای به جوشش فیلمی هست. این نقطه را شار حرارتی بحرانی(Critical heat flux) یا ناحیه خشک شدن می‌نامند که باعث افزایش ناگهانی دمای سطح و کاهش شدید سرعت انتقال حرارت می‌شود[4-6]. در ناحیه خشک به علت اختلاف دمای بالا بین سطح انتقال حرارت و مایع در حال جوشش، مایع نمی‌تواند با سطح انتقال حرارت (گرم‌کن) تماس برقرار کرده و در واقع یک لایه بخار بین سطح و مایع ایجاد می‌شود . همچنین این پدیده موجب صدمه به سطح انتقال حرارت می‌شود. حال تلاش‌های زیادی در جهت افزایش و بهبود نقطه شارحرارتی بحرانی در به تأخیر افتادن آن انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده ازفوم‌های متخلخل[7, 8]، تغییر شیب سطوح (از افقی به عمودی)[9-11] و همچنین لایه‌های متخلخل ایجادشده توسط رسوب ذرات معلق مانند نانو ذرات، از روش‌های بهبود شارحرارتی بحرانی می‌باشند[12, 13]. افزایش نقطه‌ی شار حرارتی بحرانی به وسیله رسوب حاکی از این واقعیت است که رسوب نشسته بر سطح انتقال حرارت باعث افزایش رطوبت (خیس شوندگی) و در نتیجه ایجاد نیروی مویینگی در سطح انتقال حرارت می‌شود[14, 15]. به بیانی ساده، سیالی که برروی سطح رسوب گرفته‌شده فرآیند جوشش را ادامه می‌دهد، به وسیله‌ی نیروی مویینگی ایجادشده از میان حفرات رسوبی به سطح انتقال حرارت رسیده و با ادامه تولید حباب آن را خنک می‌کنند. آنچه که در بالا گفته شد نشان می‌دهد که وجود رسوب بر سطح انتقال حرارت می‌تواند شار حرارتی بحرانی را بهبود دهد و جوشش فیلمی را به تأخیر بیندازد. اما نکته مهم این است که میزان رسوب تا چه اندازه باشد که خود موجب کاهش انتقال حرارت نشود. یکی دیگر از پارامترهای مهم در افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش، افزایش هدایت حرارتی سیال است..بسیاری از دانشمندان تلاش کرده‌اند تا هدایت حرارتی مایعات را با تعلیق نانو ذرات فلزی که دارای ضریب هدایت گرمایی بالا هستند مانند فلزات مس، آلومینیوم، الماس، اکسیدهای فلزی، نانو لوله‌ها و یا انواع دیگر نانو ذرات بهبود بخشند[16]. اما تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیالات، ضخامت لایه رسوب روی سطح انتقال حرارت را نیز افزایش داده و منجر به افزایش مقاومت حرارتی و کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش می‌شود[17]. همان طور که گفته شد وجود پارامتر مؤثر گرمای نهان تبخیر بالا در فرآیند جوشش،که از ویژگی‌های مهم آن، افزایش دینامیک حباب (چگالی نقاط مولد فرکانس و قطر جدایش حباب تولیدی) می‌باشد، بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. وجود پارامترهای دینامیک حباب موجب تشدید، ایجاد اغتشاشات و تلاطم در سیال شده، که با افزایش عدد ناسلت (Nusselt Number) و به دنبال آن ضریب انتقال حرارت، برتری جوشش هسته‌ای را بر سایر حالت‌های انتقال گرما نمایان می‌کند. اما پارامترهای دینامیک حباب و اثر آن‌ها بر تشکیل حباب، منجر به تشکیل سریع‌تر رسوب بر سطح انتقال حرارت می‌شوند[18, 19]. این امر به دلیل تبخیر بیشتر سیال، تولید و جدایش حباب از سطح انتقال حرارت می‌باشد که غلظت نمک را در مرزبندی زیرحباب‌ها یعنی میکرولایه

افزایش می‌دهد[20]. چرا که با جدایش هر حباب از سطح انتقال حرارت، ذرات محلول در سیال در ناحیه زیر حباب‌های جداشده رسوب می‌کنند. از آن‌جایی که وجود رسوب همیشگی است، دو روش استفاده از سورفکتانت(Surfactant)و[21, 22] اعمال امواج فراصوت[23,24] برای رسوب زدایی مورد بحث می‌باشند. اضافه کردن سورفکتانت به مایع می‌تواند کشش سطحی را کاهش دهد[25]. با کاهش کشش سطحی رسوبات به راحتی از سطوح جدا می‌شوند. اما استفاده از سورفکتانت موجب آلودگی سیستم‌های انتقال حرارت، تولید فوم (foam) در دمای بالا و افزایش مقاومت حرارتی می‌شود[26, 27] در نتیجه استفاده از سورفکتانت روش مناسب در فرآیند جوشش نمی‌باشد. در روش دوم از اعمال امواج فراصوت برای شکستن یا ضعیف کردن نیروی جذب واندروالس درسطح تماس بین ذرات می‌توان استفاده کرد. همچنین در اثر اعمال امواج فراصوت به محلول، رشد و ترکیدن حباب‌ها در مایع اتفاق می‌افتد. تشکیل حباب به وسیله امواج فراصوت را تحت عنوان حفره‌زایی یا کاویتاسیون(Cavitation) صوتی شناخته می‌شود. به عبارتی در پدیده‌ی کاویتاسیون عملیات گسستگی و جدا شدن مایع از طریق کاهش فشار در دمای ثابت اتفاق می‌افتد. مایعات حاوی میکرو حباب‌های هوا، هسته‌هایی هستند که با کاهش فشار رشد کرده و کاویتی‌ها (حفره‌ها) را به وجود آورده‌اند. در نتیجه امواج فراصوت با کاهش نیروهای واندروالس و فشار و همچنین تولید حباب به کاهش رسوبات و افزایش ضریب انتقال حرارت در فرآیند جوشش کمک شایانی می‌کند[28]. هدف از انجام این تحقیق بررسی کاهش رسوب نمک‌های (املاح یا ذرات) موجود در محلول در حال جوشش به خصوص محلول‌های آبی، با استفاده از امواج فراصوت می‌باشد. در روش استفاده از امواج فراصوت بر خلاف روش‌های تزریق مواد شیمیایی و رسوب‌زدا که احتیاج به ماده ثانویه می‌باشد، رسوبات سطحی با استفاده از شوک صوتی کاهش‌یافته و در نهایت افزایش ضریب انتقال حرارت را به همراه دارد. از طرفی امواج فراصوت با ایجاد اغتشاشات سهم عظیمی در افزایش ضریب انتقال حرارت به واسطه‌ی تولید و پراکنده‌سازی حباب خواهد داشت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- دستگاه آزمایشگاهی

بخش اصلی دستگاه آزمایشگاهی شامل یک گرم‌کن استوانه‌ای شکل و توخالی از جنس مس صیقلی با متوسط زبری سطح ۰/۸۴ میکرومتر (زبری ثابت در طول آزمایش‌ها) می‌باشد. این لوله‌ی استوانه‌ای با قطر خارجی، قطر داخلی و طول به ترتیب ۲۴، ۱۳ و ۱۶۰ میلی‌متر ساخته شد. گرم‌کن در درون یک ظرف آکواریومی مکعب مستطیلی شکل به ترتیب با ابعاد طول، عرض و ارتفاع ۱۸۰، ۹۰ و ۳۵۰ میلی‌متر از جنس شیشه ایمن و محکم با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که دارای مقاومت حرارتی بالا بود، قرار داده شد. اطراف این آکواریوم به وسیله پشم‌شیشه به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی عایق شد. یک لامپ مدادی به قطر ۱۱ میلی‌متر، طول ۱۶۰ میلی‌متر و با توان حداکثر ۱۰۰۰W به عنوان منبع حرارت در وسط لوله مسی تعبیه گردید. این لامپ با برق شهری ۲۲۰V روشن می‌شد که جهت تغییر در ولتاژ ورودی و ثبت داده‌های دمایی، بر مسیر جریان یک اتو ترانسفورماتور ۱۰KVA (Model MST) با ورودی ۲۲۰VAC و خروجی۰V-۳۰۰ در توان۱۰۰۰kW برقرار گردید. دامنه ولتاژ کاری ۲۰۰V-۱۰۰و به صورت پلکانی۲۰V افزایش یافت. پس از هر بار تغییر ولتاژ به سیستم اجازه داده می‌شود تا سیستم از نظر تغییرات دمایی ایجادشده پایدار و سپس نتایج ثبت و مجدد ولتاژ افزایش داده می‌شود . برای ثابت نگه‌داشتن حجم و غلظت محلول در حال جوشش، از یک کندانسور در بالای آکواریوم جهت میعان بخارات تولیدشده و بازگشت آن‌ها به آکواریوم استفاده شده است. جهت ایجاد امواج فراصوت، از دستگاه USH 1200 Generator Ultrasonic Homogenizer با توان ۱۲۰۰ W و فرکانس ۲۵ kHz استفاده گردید جزییات بیشتر در شکل ۱ قابل‌مشاهده می‌باشد.

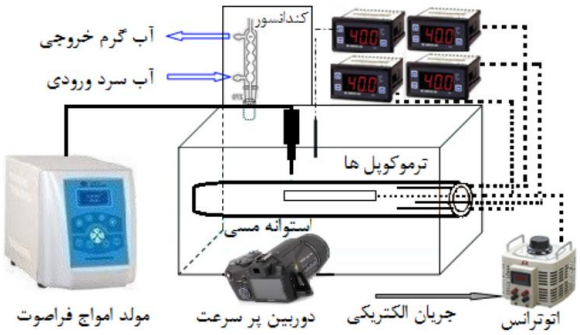
۲-۲- سیستم اندازه‌گیری

جهت اندازه‌گیری مقادیر ولتاژ و آمپر مصرفی از یک مولتی‌متر در محدوده۱۰۰۰ V ~ ۱mV و محدوده جریانی در ۲۰A ~ ۰/۱μA در مسیر جریان استفاده شدند. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد جهت ثبت دقیق تغییرات دمای ایجادشده در سطح گرم‌کن به وسیله تغییرات در ولتاژ، سه عدد ترموکوپل (Thermocouple) در سه سوراخ با زاویه ۱۲۰° نسبت به هم ایجادشده‌اند که در نزدیک‌ترین فاصله ممکن به قطر خارجی استوانه یعنی درامیلی‌متر آن قرار گرفته است. قطر هر سوراخ ۲ میلی‌متر و عمق آن نیز ۵۰ میلی‌مترمی‌باشد. در درون هر سوراخ یک ترموکوپل نوع K با محدوده عملکرد ۱۸۰ °C- تا ۷۵۰ °C+ قرار داده می‌شود. صفحه نمایش دمایی که ترموکوپل‌ها به آن وصل می‌باشند تک کاناله و از نوع LCD و مدل آنHANYOUNG ED6-FKMAP4 با دقت خواندن دما به صورت اعشاری و با خروجی ۵A، محدوده دمایی ۸۸ °C- تا ۹۹۹°C+ و زمان نمونه‌برداری ورودی ۵۰۰ms می‌باشد. این صفحه اطلاعات حاصل از ترموکوپل را دریافت و پس از پردازش نمایش می‌دهد. جهت اندازه‌گیری میزان رسوبات سطحی از دستگاه زبری سنج مدل Elcometer ۲۲٤ انگلستان که دارای بین محدوده کاری۵۰۰-۰ میکرومتر با دقت بالا استفاده شد. در نهایت به منظور آنالیز دقیق رسوبات سطحی تصاویر (Atomic Force Microscopy) AFM ثبت و در فضای سه بعدی تحلیل و بررسی شدند.

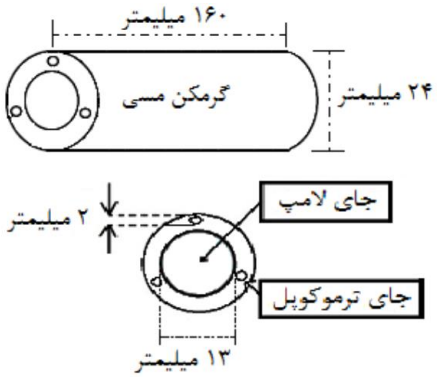
۲-۳- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها ابتدا با آب دی‌یونیزه (Deionized water) به عنوان سیال پایه و سپس محلول نمک در سه غلظت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم بر لیتر و در حجم ۲/۵ لیتر انجام گرفت. برای گرمایش اولیه‌ی مایع تا رسیدن به دمای جوشش اشباع خود از یک گرم‌کن کمکی (گرم‌کن جوش آورنده آب) با توان ۱ kW استفاده شد. همواره به

کمک ترموکوپل چهارم که در محلول قرار داشت از جوشش اشباع محلول در طول آزمایش‌ها اطمینان پیداکرده و در صورت خارج شدن محلول از حالت جوشش اشباع، گرم‌کن کمکی دوباره روشن می‌شد. پس از رسیدن محلول به نقطه جوش، گرم‌کن کمکی خاموش و سپس برای ادامه جوشش محلول، لامپ درون استوانه مسی (گرم‌کن) به وسیله اتو ترانس روشن می‌گردید. درحالت اشباع به محلول چند لحظه فرصت داده تا در دماي اشباع خود باقي بماند. این فرصت زماني باعث مي‌شد تا حباب‌هاي هواي موجود در فاز مایع از سیستم خارج شوند. در هر مرحله از آزمایش-ها با استفاده از دوربین فیلم‌برداری پر سرعت Sony PMW-300K1 از تغییرات رخ داده در سطح گرم‌کن و محلول در حال جوشش فیلم گرفته تا بتوان اثرات و تغییرات دینامیک حباب ضبط گردد. سپس فیلم ضبط‌شده را با استفاده از نرم‌افزار EDIUS (نرم‌افزاری جهت ویرایش فیلم) آهسته کرده تا تغییرات دینامیک حباب که شامل فرکانس جدایش حباب (به وسیله شمارش حباب‌های خروجی در واحد زمان)، قطر جدایش حباب تولیدشده (با متوسط گیری قطر تعدادی مشخص از حباب‌های خروجی) و همچنین نقاط مولد حباب (تعداد نقاط مولد بر اساس واحد سطح) را مشاهده تعیین گردند. لازم به ذکر است که هر آزمایش حداقل ۵ بار تکرار کرده و میانگین داده‌های آزمایشی لحاظ شدند.



شکل ۱) دستگاه آزمایشگاهی



شکل ۲) جزئیات مربوط به گرم‌کن گرمایشی

۳- عدم قطعیت

عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت را می‌توان با قانون سرمایش نیوتن تخمین زد:

$$h = \frac{q/A}{(\mathrm{Ts} - T_{sat})} \quad (۱)$$

از آنجا که گرم‌کن موجود در سیستم توان الکتریکي را به انرژي حرارتي تبدیل مي‌کند, مقدار شار حرارتي را مي‌توان با استفاده از معادله‌ي زیر محاسبه کرد[29].

$$q/A = \mathrm{V.\ I.\ cos}\varphi \quad (۲)$$

φ اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکي و شدت جریان (اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکي و شدت جریان ناچیز بوده و عملاً مي‌توانφ را برابر واحد درنظرگرفت). حداکثر عدم اطمینان تخمین زده‌شده برای شار گرمایی از معادله ۳ بدست می‌آید[29].

$$\frac{\delta(q/A)}{q/A} = \sqrt{(\frac{\delta I}{I})^2 + (\frac{\delta V}{V})^2} \quad (۳)$$

قبل از برآورد عدم قطعیت برای ضریب انتقال حرارت،δh، لازم است که عدم قطعیت تفاوت دما، $\delta\Delta T$، با توجه به موارد زیر محاسبه شود[29].

$$\delta\Delta T = \sqrt{(\delta T_S)^2 - (\delta T_{th})^2} \quad (۴)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{(\frac{\delta I}{I})^2 + (\frac{\delta V}{V})^2 + (\frac{\delta T}{T})^2} \quad (۵)$$

از آنجا که ثبت دقیق دمای سطح گرم‌کن توسط ترموکوپل برای تجزیه و تحلیل نتایج حائز اهمیت است و از طرف دیگر مکان نصب ترموکوپل‌ها در فاصله کمی با سطح بیرونی گرم‌کن قرار دارند و این فاصله‌ی هر چند کوچک، باعث اختلاف دمای ناچیزی شده که برای ثبت دقیق‌تر دما، از معادله ۶ برای تصحیح این خطا استفاده می‌شود:

$$T_S = T_{th} - \frac{q'' b_s}{K_S} \quad (۶)$$

در این معادله، b فاصله بین محل‌های نصب ترموکوپل تا سطح انتقال حرارت و Ks هدایت حرارتی سطح گرم‌کن می‌باشد. میانگین درجه حرارت سه ترموکوپل ($\overline{T_S}$) از معادله ۷ محاسبه می‌شود:

$$\overline{T_S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_{S.i} \quad (۷)$$

دقیق بودن تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای آزمایش انجام‌شده و نتایج در جدول ۱ گزارش شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر رسوبات نمکی بر ضریب انتقال حرارت و دینامیک حباب

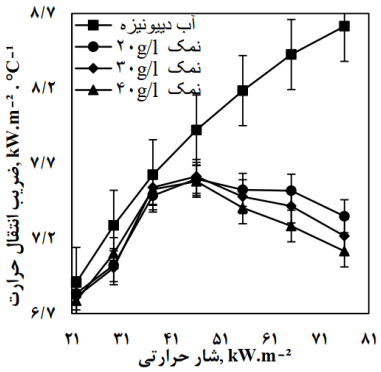
در فرآیندهایی مانند تبخیر و تبلور بسته به شرایط عملیاتی مانند دما، فشار،pH ، قدرت یونی محلول و غیره نمک‌های مختلف، به ترتیب خاصی رسوب می‌کنند. حلالیت بیشتر نمک‌ها با افزایش دما افزایش‌یافته، اما به طور معمول این نمک‌ها در سطوح حرارتی متبلور نشده مگر اینکه غلظت آن‌ها بسیار زیاد باشد[30]. تقریباً

جدول ۱) منابع عدم قطعیت

پارامتر	میزان خطا
قطر لوله	±۰/۰۱ mm
طول لوله	±۰/۰۱ mm
ترموکوپل، K-type	±۰/۱ °C
متوسط دما	±۱/۹۷۱% °C
ولتاژ	±۱% V
جریان	±۱%A
توان	±۱/۵% W
درشار حرارتی،۲-W. m ۷۶kW.	±۱/۸۵۴kW. m-2
متوسط ضریب انتقال حرارت	±۰/۲۹۸% kW. m-2. °C-1
زبری سنج	±۵%
مقیاس خط کش در برنامه EDIUS	±۰/۰۰۵ mm
مقیاس زمان در برنامهEDIUS	±۲۰۰ms

همه محققین میزان تبلور نمک‌ها را با توجه به میزان نیروی محرکه فوق اشباعشان بیان کرده‌اند. درک دقیق از غلظت اشباع نمک‌ها برای پیش‌بینی میزان رسوب در سطوح حرارتی ضروری است[30]. فرآیند رسوب‌گذاری در حال حاضر یک مشکل صنعتی مزمن می‌باشد که در مدت زمان انتقال حرارت همرفتی تحمیل می‌گردد. پدیده رسوب در هنگام جوشش هسته‌ای شدیدتر می‌شود. زیرا تبخیر، ایجاد و جدایش حباب‌ها از سطح انتقال حرارت، غلظت نمک را در مرزبندی زیر حباب‌ها یعنی در میکرولایه‌ها افزایش می‌دهد[20]. اگر ماده در حالت تبخیر حاوی مواد حل شده (ناخالصی) باشد، ابتدا ته‌نشینی‌ها در زیرحباب‌ها شروع به رشد می‌کنند، که دلیل این امر به مسئله فوق اشباع موضعی برمی‌گردد و منجر به تبخیر با شیب تند دمایی شده که به تبع آن ته‌نشینی نمک را با حلالیت معکوس تسریع می‌بخشد [18, 19, 31].

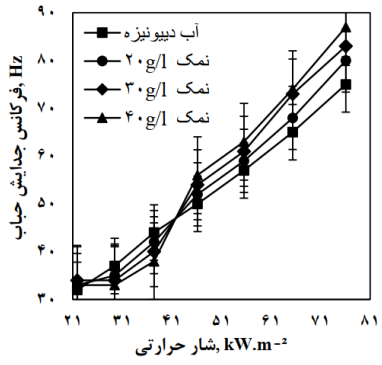
در این قسمت به بررسی تشکیل رسوبات نمکی در سه غلظت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم بر لیتر پرداخته شده است. علت انتخاب این غلظت‌ها، به دلیل نزدیکی آن به غلظت آب خلیج‌فارس در فصول مختلف سال می‌باشد. نتایج تغییرات ضریب انتقال حرارت در سه غلظت به‌کاررفته نسبت به آب دی‌یونیزه در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزودن نمک به آب دی‌یونیزه، ضریب انتقال حرارت به شدت افت کرده است. اما نکته قابل‌توجه



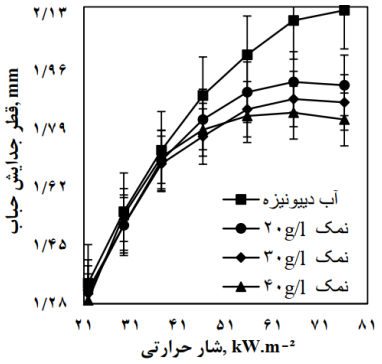
شکل ۳) مقایسه‌ی تغییرات غلظت بر ضریب انتقال حرارت

این است که این افت همواره نزولی نبوده، به‌صورتی که در شارهای حرارتی پایین تا شار حرارتی حدوداً ٤٥kW.m^{-2} سیر صعودی داشته و سپس با روندی کاهشی فرآیند ادامه یافته است. این تغییرات صعودی و سپس نزولی، از تغییرات رسوبی حاصل می‌شود که نمک در طول فرآیند برروی سطح انتقال حرارت ایجاد می‌کند. در ابتدا (شارهای حرارتی پایین) مقدار کمی از نمک بر سطح انتقال حرارت رسوب‌کرده اما با ادامه فرآیند جوشش و رسوب بیشتر، این رسوبات باعث تشکیل هسته‌های حباب‌زا برروی سطح رسوب می‌شوند. به طوری که حباب‌ها با قطری بزرگ‌تر برای لحظاتی تشکیل می‌شوند. این افزایش قطر برای هر چند زمان کوتاه به علت افزایش اغتشاشاتی که در محلول به همراه دارد فقط در مرحله کوتاه یا زمان اولیه فرآیند اتفاق می‌افتد (شارهای حرارتی پایین). این پدیده همچنین در برخی آزمایش‌های رسوب و تبلور دیگر نیز مشاهده می‌شود[32]. ایجاد چشمه‌های جدید به وسیله رسوب اولیه باعث می‌شود تا مدتی در فرآیند ضخامت رسوب افزایش نیابد. اما با افزایش زمان فرآیند، افزایش شار حرارتی و به تبع آن افزایش دمای سطح، لایه رسوبی اولیه ضخیم‌تر ویک‌دست‌تر شده (ضخامت یکنواخت) و باعث می‌شوند که مقاومت حرارتی افزایش یابد[19, 31]. افزایش دوباره‌ی رسوب بر سطح موجب تولید چشمه-هایی با قطر خیلی کوچک می‌شوند. با ادامه این روند ، رفته‌رفته این نقاط هم مسدود شده و رسوب مانند یک بالشتکی از ناخالصی‌های نمکی، کل سطح انتقال حرارت را می‌پوشاند. در نتیجه این پوشش از نمک مانع از رسیدن مایع در حال جوشش به سطح انتقال حرارت می‌شود. نرسیدن مایع به سطح انتقال حرارت ، تولید حباب کمتر و کم شدن اغتشاشات در محلول را به دنبال دارد. پیغمبرزاده و همکاران در سال ۲۰۱۳ با بررسی بر روی جوشش سولفات کلسیم، نتایج مشابهی کسب نمودند[33]. شکل‌های ٤و ٥ به بررسی تغییرات دینامیک حباب و تاثیرشان بر ضریب انتقال حرارت در شرایط سطح رسوبی پرداخته است.

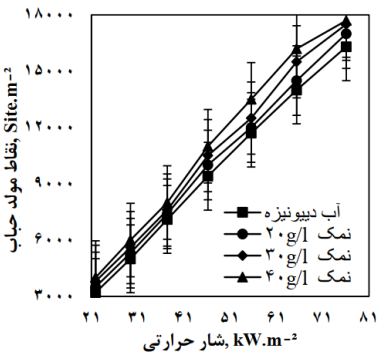
همان طور که فرکانس جدایش حباب شکل ۴ (الف) و قطر جدایش حباب در شکل ۴ (ب) نیز مشخص است این دو پارامترفتار عکسی با هم در فرآیند جوشش دارند[34] . زیرا با افزایش دمای سطح انتقال حرارت، حباب‌ها فرصت کمتری برای رشد پیداکرده و در نتیجه کوچک‌تر می‌شوند اما با فرکانس بالاتری از سطح انتقال حرارت جدا می‌گردند. مسئله‌ی مهمی که قابل‌بحث می‌باشد تأثیر قطر بزرگ‌تر جدایش و فرکانس بیشتر حباب‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌توان گفت که اگر چه فرکانس بیشتر حباب تأثیر مناسبی بر میزان اختلاط داشت اما اثرات قطرهای بزرگ حباب بر ضریب انتقال حرارت به مراتب بهتر و بیشتر گزارش گردید. علاوه بر بحث گرمایش سطح، در اینجا مسئله وجود رسوب نمک نیز وجود دارد که باعث تولید چشمه‌ی کوچک‌تر و بیشتر شده (شکل ۴ ج) و در نتیجه حباب با قطر کوچک‌تر ایجاد می‌شود. با توجه به شکل، نمودار آب دی‌یونیزه



(الف)



(ب)



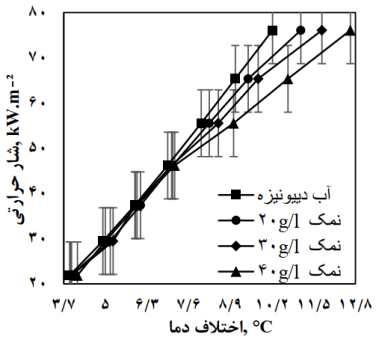
(ج)

شکل ۴) دینامیک حباب نسبت به شار ورودی در سه غلظت نمک نسبت به آب دی‌یونیزه شده الف- فرکانس ب- قطر ج- نقاط مولد حباب

شده با تغییرات کمی روند فرآیند را ادامه می‌دهد. اما در مورد محلول‌های نمکی به دلیل رسوبات، فرکانس جدایش در ابتدای فرآیند روند کاهشی و سپس افزایشی داشته‌اند.

در شکل ۵ رسوبات نمکی موجب شده‌اند که دمای سوپرهیتی سطح انتقال حرارت به دلیل کاهش قطر جدایش حباب و ایجاد یک لایه مقاومتی بر سطح انتقال حرارت در سه غلظت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم بر لیتر به ترتیب به‌طور متوسط ۳/۸۶، ۵/۶۷ و ۹/۵۳ درجه سانتی‌گراد نسبت به آب دی‌یونیزه افزایش یابد.

اهمیت قطر حباب نسبت به دیگر پارامترهای دینامیکی همچنین به برداشت حرارت بیشتر از سطح در قطرهای بزرگ‌تر بر می‌گردد که در خنک‌سازی سطح در جهت بهبود نیرومحرکه و انتقال حرارت بهتر کمک شایانی خواهد کرد. نتایج بیشتر در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵) تغییرات سوپرهیتی سطح انتقال حرارت در سه غلظت نمک نسبت به آب دی‌یونیزه

جدول ۲) متوسط درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت و دینامیک حباب در سه غلظت نمک نسبت به آب دی‌یونیزه

غلظت نمک(g/l)	۲۰	۳۰	۴۰
ضریب انتقال حرارت(kW. m -2. °C -1) %	-۶/۳۱	-۶/۷۳	-۷/۲۰
نقاط مولد حباب(Site. m -2) %	۵/۲۰	۱۰/۶۲	۱۶/۳۴
فرکانس تولید حباب(kHz) %	۱/۷	۲/۸۸	۴/۴۳
قطرجدایش حباب(mm) %	-۴/۸۲	-۶/۴۳	-۶/۸۷
اختلاف دما(°C) %	۳/۸۶	۵/۶۸	۹/۵۳

در شکل ٦ کاملاً واضح است که افزایش غلظت نمک باعث پوشش سطح و ایجاد چشمه‌های جدید (به صورت حفرات قابل‌مشاهده

الف) ۲۰ g.l-1

ب) ۳۰g.l-1

ج) ۴۰g.l-1

شکل ۶) تأثیر افزودن نمک بر سطح انتقال حرارت

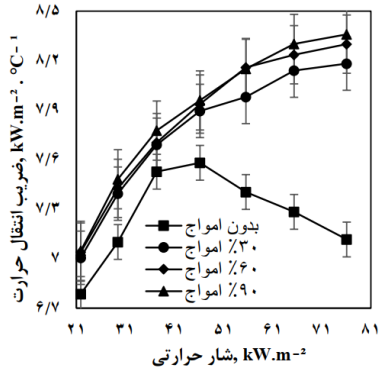
هستند) مولد حباب شده است. نکته مهم این است که این چشمه‌ها، نقاط ناپایداری برای حباب‌زایی می‌باشند، زیرا به مرور زمان به وسیله ذراتی که بعداً رسوب می‌کنند مسدود یا پوشانده می‌شوند. المتیری[35] نشان داد که با افزایش غلظت محلول، میزان رسوبCaSO4 افزایش می‌یابد. در شکل ۶ (الف) در غلظت ۲۰ گرم در لیتر لایه‌ای بسیار نازک بر روی سطح ایجاد شده است اما با افزایش مقدار غلظت نمک به ۳۰ گرم بر لیتر در شکل۶ (ج) و ۴۰ گرم بر لیتر در شکل ۶ (ب) ضخامت لایه رسوبی افزایش پیدا کرده که به مرور زمان مانند یک لایه‌ی عایق حرارتی عمل می‌کند.

۴-۲- تأثیر امواج فراصوت بر رسوبات نمکی

در این قسمت به بررسی اثر امواج فراصوت بر رسوبات نمکی پرداخته می‌شود. امواج در سه توان ۳۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ از دستگاه (۱۲۰۰ w) ، در سیکل تابش ۰/۵-۰/۵ و زمان تابش ۱۴ دقیقه تنظیم (این تنظیم‌ها از بهینه‌سازی آزمایشگاهی بدست آمده‌اند) و در محلول آب و نمک ۴۰ گرم بر لیتر به صورت مستقیم به‌کار گرفته شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۷ قابل‌مشاهده می‌باشد.

با مقایسه‌ی تأثیر قدرت تابش امواج فراصوت در محلول نمکی، توان ۹۰٪ تابش امواج به بهترین عملکرد ضریب انتقال حرارت دست پیدا کرده است. هر چند که در هر سه قدرت تابش امواج، در شارهای حرارتی پایین عملکرد تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند، اما افزایش شار حرارتی موجب افزایش دمای سطح انتقال حرارت و محلول شده و در نتیجه حلالیت نمک را کم و کمتر می‌کند. با توجه به شکل توان ۹۰% تابش در شارهای حرارتی بالا با حفظ پراکنده نگه‌داشتن ذرات نمک و عدم رسوب آن‌ها بر سطح انتقال حرارت موجب افزایش هر چه بیشتر ضریب انتقال حرارت گردید. از طرفی در توان بالای امواج میزان اغتشاشات ایجادشده خیلی بیشتر می‌شود، این افزایش موجب حل شدن ذرات و رسوب کمتر آن‌ها بر سطح انتقال حرارت می‌شود. در نتیجه مشکل مقاومت حرارتی را تا حدود زیادی برطرف می‌کند. نتایج عددی این تغییرات در جدول ۳ قابل‌مشاهده می‌باشد.

علاوه بر این، میزان کاهش رسوب در سطح انتقال حرارت و در نتیجه کاهش مقاومت حرارتی با افزایش توان تابش فراصوت در



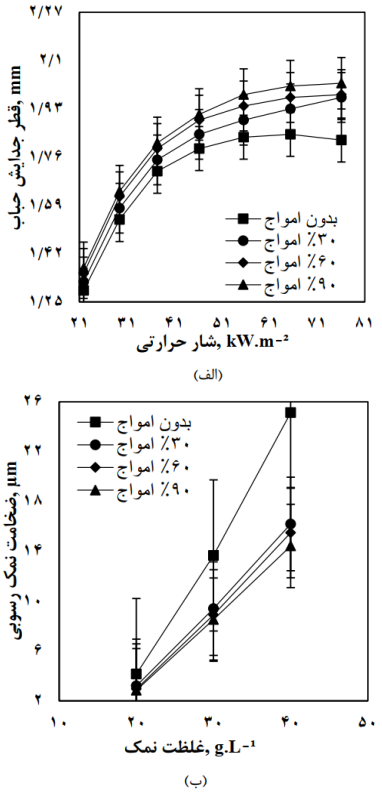
شکل ۷) مقایسه‌ی تغییرات فراصوت بر ضریب انتقال حرارت در محلول نمکی ۴۰ g.l⁻¹

جدول ۳) متوسط درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت در محلول نمکی g.l⁻¹ ۴۰ با تابش فراصوت نسبت به بدون فراصوت

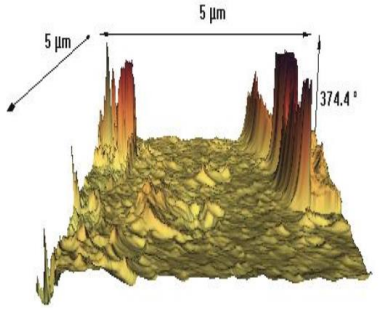
توان فراصوت	۳۰%	۶۰%	۹۰%
ضریب انتقال حرارت(% (kW. m ⁻². °C ⁻¹	۶/۸۸	۷/۹۱	۸/۴۳

شکل۸ (ب) کاملاً مشهود می¬باشد. همان طور که گفته شد، امواج فراصوت با افزایش اغتشاشات و تلاطمی که به وجود می‌آورد، میزان حلالیت نمک در محلول را افزایش داده و موجب شده محلول کمتر رسوب کند.

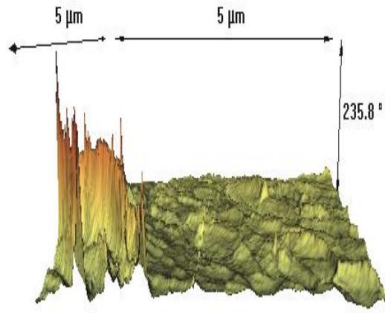
با توجه به مطالب و شکل ۸ (الف و ب)، روشن است که با اعمال امواج فراصوت و تولید حباب با قطر جدایش بیشتر، تأثیر مثبت بر انحلال‌پذیری و رسوب کمتر نمک بر سطح انتقال حرارت دارا می‌باشد. افزایش تولید حباب از نظر افزایش زبری سطح انتقال حرارت و ایجاد چشمه‌های فعال مولد حباب می‌تواند به عنوان حالتی جدا از پرتودهی فراصوت در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی بیشتر تغییرات رسوب سطح انتقال حرارت با اعمال امواج فراصوت در محلول نمکی، از تصاویر سه بعدی که توسط دستگاه Atomic Force Microscopy (AFM) ثبت‌شده، استفاده گردید. این تصاویر به صورت تغییرات پستی و بلندی در شکل ۹ (الف-د) مشاهده می‌شود. هرچه زبری پستی و بلندی سطح بیشتر باشد، رسوبات بیشتری بر سطح وجود دارد. شکل ۹ (الف) سطح تحت فرآیند جوشش بدون امواج فراصوت و



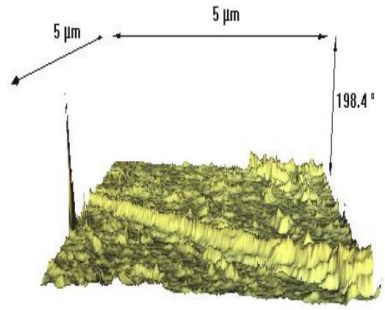
شکل ۸) مقایسه تغییرات اعمال امواج فراصوت (الف) تغییرات قطر حباب نسبت به شار ورودی در توان‌های مختلف در غلظت ۴۰g.l⁻¹ (ب) ضخامت رسوب نسبت به تغییرات غلظت نمک در توان‌های مختلف



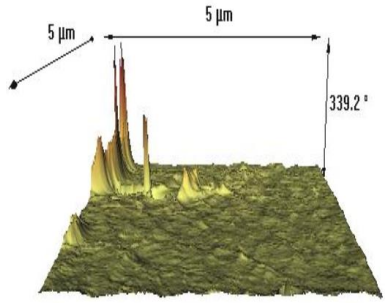
(الف)



(ب)



(ج)



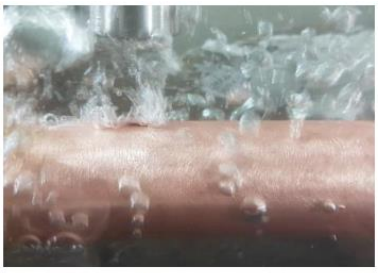
(د)

شکل ۹) تصاویر AFMو مقایسه تغییرات رسوب با اعمال امواج فراصوت در محلول نمک ۴۰g.l-1 و در شار حرارتی ۵۱ kW. m -2، الف) قبل از اعمال امواج ب) امواج با توان ۳۰% ج) ۶۰% د) ۹۰%

شکل‌های ب، ج و د به ترتیب تحت امواج با توان‌های ۳۰%، ۶۰% و ۹۰% را نشان می‌دهد. این تصاویر از یک محلول نمکی با غلظت ۴۰g/l و در شار ۵۱ kW. m-2 ثبت‌شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان میزان رسوبات کمتر شده و در قسمت (د) با توان ۹۰% ، به طور میانگین کمترین میزان رسوب (۳۷/۱۹%-)

الف)

ب)



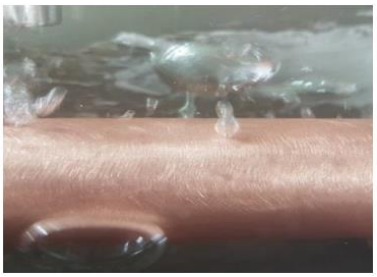
ج)

د)

شکل ۱۰) مقایسه تغییرات واقعی قطر جدایش حباب با اعمال امواج فراصوت بر محلول نمک ۴۰g.l-1 و در شار حرارتی ۵۱ kW. m -2 الف) قبل اعمال امواج ب) امواج با توان ۳۰% ج) ۶۰% د) ۹۰.%

گزارش گردید. میزان کاهش نسبت به حالت بدون موج در توان‌های ۳۰ و ۶۰ درصد به ترتیب ۲۹/۸۸- و ۳۴/۰۵- تعیین گردید.در شکل ۱۰ میزان افزایش قطر خروجی حباب در محلول نمک با غلظت g.l-۴۰[1] در قبل (شکل ۱۰ الف) و سپس با اعمال امواج با سه قدرت ۳۰%، ۶۰% و ۹۰% (در شکل‌های ب، ج و د) نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که با اعمال امواج، حباب‌ها رشد قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند.

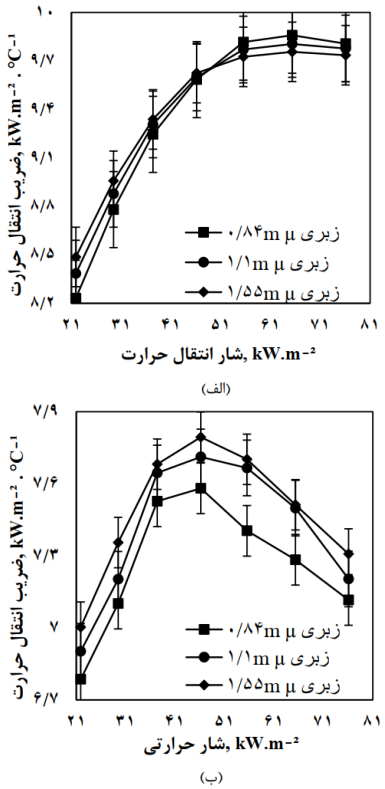
همچنین همان طوری که ذکر شد یکی دیگر از تأثیرات مهم امواج فراصوت کاهش رسوبات سطحی می‌باشد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱) اثرات اعمال امواج فراصوت بر کاهش رسوبات در توان ۹۰ %

۴-۳- مقایسه‌ی تأثیر زبری سطح بر رسوب

به منظور بررسی نقش زبری برای افزایش تولید حباب، سطح را از ۰/۸۴ به ۱/۱ و سپس تا ۱/۵۵ میکرومتر زبر کرده، که نتایج در شکل۱۲ نشان داده شده است. بدین منظور برای مقایسه بهتر رسوب ذرات از محلول آب و نمک با غلظت ۴۰g.l-1 و نانو سیال از نانو ذره CuO با اندازه ۲۰ nm و غلظت ۰/۰۷۵ wt.%استفاده شده است. دلایل استفاده از نانو ذره (فلزی اکسید مس) جهت مقایسه با محلول نمک این است که نانو ذرات علم روز بوده و با ضریب هدایت بالایی که دارد توجه بسیاری از محققین را در فرآیندهای انتقال حرارت به خصوص جوشش استخری به سمت خود جلب کرده است[36, 37]. اما نانو ذرات نیز خود به علت ناپایداری به شدت تمایل به رسوب و کلوخه شدن را دارند. همچنین نوع رسوب نانو ذرات مانند نانو ذرات فلزی با ذرات نمک متفاوت بوده به طوری که نمک با پیوند یونی و نانو ذرات با نیروهای واندروالسی رسوب



شکل ۱۲) مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت با افزایش زبری الف- نانو سیال ب – محلول نمک

می‌کنند. در نهایت میزان اثرات رسوب این دو ماده بر مقاومت رسوبی بررسی شد.

شکل ۱۲ (الف و ب) نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح ، ضریب انتقال حرارت در ابتدای فرآیند در هر دو محلول افزایش‌یافته و سپس رفته‌رفته کاهش می‌یابد. البته تأثیر زبری در محلول آب نمک بیشتر بوده است. این افزایش به واسطه‌ی افزایش تراکم نقاط مولد حباب (شکل ۱۳) و اغتشاشاتی که به همراه داشته باعث افزایش حلالیت در محلول آب نمک شده و رسوب‌گذاری را به تأخیر می‌اندازد. اما در مورد نانو سیال به دلیل عدم پایداری نانو ذرات، تولید بیشتر حباب نتوانسته تأثیر زیادی بر عدم رسوب‌گذاری بگذارد. زیرا همان طور که ذکر شد تولید هر چه بیشتر حباب، در نتیجه رسوب بیشتری از نانو ذرات در ناحیه خشک زیر حباب در هنگام جدا شدنش را به همراه دارد. شکل۱۳ تراکم نقاط مولد حباب را فقط برای محلول نمک نشان می‌دهد چون محلول نانو سیال به علت کدر بودن قابل‌مشاهده نمی‌باشد.

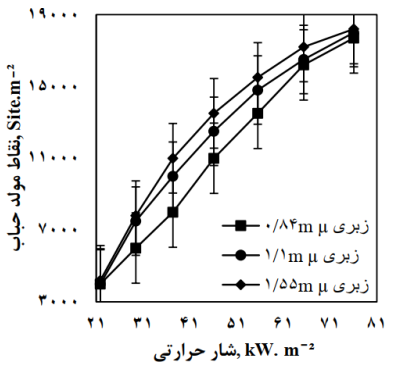
شکل ۱۳ نشان می‌دهد که شیب افزایش نقاط مولد حباب در شارهای حرارتی پایین، با افزایش زبری افزایش یافته است. زیرا علاوه بر زبری سطح ،رسوب ذرات در ابتدای شروع فرآیند به علت خلل و فرجی (زبری) که ایجاد می‌کنند خود موجب تولید چشمه‌های جدید حباب شده درحالی‌که به مرور زمان و با افزایش شار حرارتی، میزان رسوب بیشتر شده و رفته‌رفته چشمه‌ها مسدود و غیرفعال می‌شوند.

۴-۴- مقاومت رسوبی

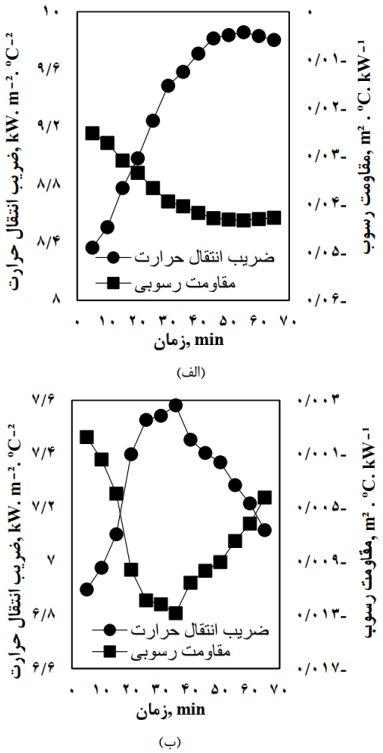
مقدار مقاومتی(Resistance fouling) که در اثر رسوب ایجادشده را می‌توان بر اساس ضریب انتقال حرارت در$t = 0$ (زمان دلخواه است که در این تحقیق زمان بدون رسوب در نظر گرفته شد) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد[38]:

$$R_f = \frac{1}{h(t)} - \frac{1}{h(t=0)} \qquad (۸)$$

نتایج تغییرات مقاومت رسوبی هر دو سیال در شکل ۱۴ نشان داده شده است. شایان‌ذکر است که شرایط محلول‌های نانو سیال و نمکی مشابه حالت قبل می‌باشد.



شکل ۱۳) تغییرات زبری سطح بر نقاط مولد حباب در محلول آب و نمک ۴۰ g.l-1



شکل ۱۴) مقایسه‌ی تغییرات مقاومت رسوب و ضریب انتقال حرارت الف- نانو سیال مس ب- محلول نمکی

مهم‌ترین وجه تمایزی که در بررسی دو شکل وجود داردبه بحث تفاوت در نحوه رسوب‌گذاری در دو محلول بر می‌گردد. در شکل ۱۴ (الف) مشخص است که ته‌نشین شدن نانوذرات به آرامی صورت گرفته است. این مساله به این دلیل اتفاق می‌افتد که اندازه ذرات هرچه کوچک‌تر گردد پایداری آن نیز بیشتر و درنتیجه مقاومت رسوبی نیز به آرامی افزایش یافته است. اما همان طور که در شکل ۱۴ (ب) مشاهده می‌شود رسوبات نمکی، چون در مرحله‌ی آغازین فرآیند به علت رسوب و افزایش زبری سطح انتقال حرارت، موجب ایجاد زبری ناپایداری گردیده و این زبری موجب افزایش نقاط مولد و در نتیجه افزایش حلالیت شده که برای مدت زمانی رسوب کاهش یافته است. اما با افزایش زمان فرآیند مقدار رسوبات افزایش و در نهایت منجر به پوشش بیشتر سطح به وسیله رسوب می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر امواج فراصوت بر رسوبات نمکی سطح انتقال حرارت در جوشش استخری پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت تأثیر بسزایی در حذف یا کاهش رسوبات سطح انتقال حرارت دارد. امواج فراصوت نه تنها موجب حذف و یا کاهش رسوبات می‌شود، بلکه با تأثیر مستقیم بر دینامیک حباب مانند افزایش قطر جدایش حباب و پدیده‌ی کاویتاسیون در اثر کاهش فشار در محلول، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. البته مسئله مهمی که در استفاده از امواج فراصوت وجود دارد بهینه کردن قدرت، سیکل و زمان تابش امواج می‌باشد. به طوری که نمی‌توان برای همه سیالات از پارامترهای (شرایط) مشابه استفاده کرد. در این پژوهش با سعی و خطا و همچنین آزمایش‌های مختلف، یک مقدار بهینه برای محلول آب و نمک بدست آمده است. به طوری که امواج با توان ۹۰% از دامنه-ی دستگاه، سیکل تابش ۰/۵-۰/۵ و زمان تابش ۱۴ دقیقه دارای بهترین عملکرد به عنوان شرایط بهینه‌ی آزمایشگاهی بودند. امواج فراصوت در سه توان ۳۰%، ۶۰% و ۹۰% اعمال گردید که نتایج نشان داد توان ۹۰% توانست به ترتیب ضریب انتقال حرارت و قطر جدایش را تا حدود ۸/۴۳ % و ۷/۵۴ % نسبت به حالت بدون پرتودهی امواج افزایش داده و همچنین رسوب را تا ۳۷/۱۹% کاهش دهد. تفاوت در رسوب نمکی و نانو ذرات اول در اندازه آن می‌باشد که نانو ذرات سریع‌تر و راحت‌تر در زیر حباب رسوب‌کرده و دوم میزان حلالیت نمک است که اگر انحلال آن حفظ شود، کمتر رسوب می‌کند. در نتیجه امواج با حفظ انحلال محلول نمکی موجب کاهش رسوب آن می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که علاوه بر پرتودهی امواج فراصوت، افزایش زبری در شارهای پایین می‌تواند باعث افزایش تراکم نقاط مولد حباب شده و در انتقال حرارت موثر باشد.

۶- فهرست علائم

A	سطح مقطع (m^2)
C_p	ظرفیت حرارتی($J\ kg^{-1}°C^{-1}$)
D	قطر حباب (mm)
d_b	قطر جدایش حباب (mm)
f	فرکانس جدایش حباب (Hz)
h	ضریب انتقال حرارت جوش($W\ m^{-2}°C^{-1}$)
W	وات (w)
δ	عمق نفوذ حرارت (mm)
µm	میکرومتر
π	عدد پی
I	چقرمگی شکست مود اول (J/m^2)
K	ضریب هدایت حرارتی ($W\ m^{-1}°C^{-1}$)
L	طول(mm)
l	لیتر
Na	نقاط مولد حباب ($Site\ m^{-2}$)
q/A	شار حرارتی ($W\ m^{-2}$)
R_f	متوسط زبری سطح (µm)
S	سطح هیتر
T	دما (°C)
V	ولتاژ(v)
t	زمان (s)
φ	اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان الکتریکی
Δ	اختلاف

زیرنویس‌ها

b	حباب
i	شمارنده
l	مایع
th	دما

sat	اشباع
v	بخار
w	دیواره

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: یافته‌های این مقاله (به طور کامل یا بخشی از آن) در نشریه دیگری منتشرنشده و همچنین تحت داوری مجله دیگری نیست.

تعارض منافع: پژوهش صورت گرفته تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

1- Sunil LJ, Kumarappa S, Hegde RK. Experimental studies on pool boiling heat transfer using alumina and graphen oxide nanofluids. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016:3(1):674-679.
2- Cooke D, Kandlikar SG. Pool boiling heat transfer and bubble dynamics over plain and enhanced microchannels. Journal of Heat Transfer. 2011;133(5).
3- Corradini ML. Fundamentals of multiphase flow. University of Wisconsin, Madison, WI. 1997.
4- Hashemi M, Noie SH. Study of flow boiling heat transfer characteristics of critical heat flux using carbon nanotubes and water nanofluid. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017;130(3):2199-209.
5- Seon Ahn H, Hwan Kim M. A review on critical heat flux enhancement with nanofluids and surface modification. Journal of Heat transfer. 2012;134(2).
6- Kim H. Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids: a state-of-art review. Nanoscale research letters. 2011;6(1):1-8.
7- Yang Y, Ji X, Xu J. Pool boiling heat transfer on copper foam covers with water as working fluid. International Journal of Thermal Sciences. 2010;49(7):1227-37.
8- Yang Y, Ji X, Xu J. Effect of inclination angle on the pool boiling heat transfer of ultra-light copper foams. Heat and mass transfer. 2010;46(7):695-706.
9- Tian Y, Chen Z, Wang N, Cui Z, Cheng L. Experimental investigations on pool boiling on a vertical tube in the confined and unconfined spaces. Applied Thermal Engineering. 2018;133:107-16.
10- Lu D, Yu Z, Zhong Y, Wang H, Zhang Y, Cao Q, Gao S. Experimental investigation on boiling heat transfer characteristics of the spent fuel bundle under flooded condition. Nuclear Engineering and Design. 2019;344:168-73.
11- Kshirsagar JM, Shrivastava R. Experimental investigation of nucleate pool boiling characteristics of high concentrated alumina/water nanofluids. Heat and Mass Transfer. 2018;54(6):1779-90.
12- Ciloglu D. An experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer of nanofluids from a hemispherical surface. Heat Transfer Engineering. 2017;38(10):919-30.
13- Ali HM, Generous MM, Ahmad F, Irfan M. Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer enhancement of TiO2-water based nanofluids. Applied Thermal Engineering. 2017;113:1146-51.
14- Kiyomura IS, Nascimento FJ, Cunha AP, Cardoso EM. Analysis of the influence of surface roughness and nanoparticle concentration on the contact angle. InProceedings of 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil 2015.
15- Park SD, Moon SB, Bang IC. Effects of thickness of boiling-induced nanoparticle deposition on the saturation of critical heat flux enhancement. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014;78:506-14.
16- Ebrahimi-Dehshali M, Najm-Barzanji SZ, Hakkaki-Fard A. Pool boiling heat transfer enhancement by twisted-tape fins. Applied Thermal Engineering. 2018;135:170-7.
17- Ahmed O, Hamed MS. Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012;55(13-14):3423-36.
18- Malayeri MR, Müller-Steinhagen H. Initiation of CaSO4 scale formation on heat transfer surfaces under pool boiling conditions. Heat transfer engineering. 2007;28(3):240-7.
19- Malayeri MR, Müller-Steinhagen H, Bartlett TH. Fouling of tube bundles under pool boiling conditions. Chemical engineering science. 2005;60(6):1503-13.
20- Esawy M, Malayeri MR. Modeling of CaSO4 crystallization fouling of finned tubes during nucleate pool boiling. Chemical Engineering Research and Design. 2017;118:51-60.
21- Kumar N, Raza MQ, Raj R. Surfactant aided bubble departure during pool boiling. International Journal of Thermal Sciences. 2018;131:105-13.
22- Shah J, Ranjan M, Sooraj KP, Sonvane Y, Gupta SK. Surfactant prevented growth and enhanced thermophysical properties of CuO nanofluid. Journal of Molecular Liquids. 2019;283:550-7.
23- Lee D, Lim JS, Lee N, Cho HH. Enhanced thermal uniformity and stability in pool boiling heat transfer using ultrasonic actuation. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019;106:22-30.
24- Jaikumar A, Kandlikar SG. Ultra-high pool boiling performance and effect of channel width with selectively coated open microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016;95:795-805.
25- Zhou L, Wei L, Du X. Subcooled Nucleate Boiling of Alumina Nanofluid With/Without n-Butanol as Surfactant. InASME 2013 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology 2013. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 2013.
26- Khooshechin M, Fathi S, Salimi F, Ovaysi S. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability and heat transfer coefficient

of CuO nanoparticles in the pool boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;154:119783.
27- Esfahani NN, Toghraie D, Afrand M. A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid nanofluid: an experimental study. Powder Technology. 2018;323:367-73.
28- Ghotbinasab S, Khooshehchin M, Mohammadidoust A, Rafiee M, Salimi F, Fathi S. Comparing the heat transfer coefficient of copper sulfate and isopropanol solutions in the pool boiling process: Bubble dynamic and ultrasonic intensification. Chemical Engineering Science. 2021:116589.
29- Fazel SA. A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer on horizontal rod heaters at isolated bubble regime. Heat and Mass Transfer. 2017;53(9):2731-44.
30- Helalizadeh A, Müller-Steinhagen H, Jamialahmadi M. Mixed salt crystallisation fouling. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2000;39(1):29-43.
31- Jamialahmadi M, Mu¨ ller-Steinhagen H. A new model for the effect of calcium sulfate scale formation on pool boiling heat transfer. J. Heat Transfer. 2004;126(4):507-17.
32- Peyghambarzadeh SM, Vatani A, Jamialahmadi M. Application of asymptotic model for the prediction of fouling rate of calcium sulfate under subcooled flow boiling. Applied Thermal Engineering. 2012;39:105-13.
33- Peyghambarzadeh SM, Bahrami N. Statistical analysis of calcium sulfate scaling under boiling heat transfer. Applied thermal engineering. 2013;53(1):108-13.
34- Ivey HJ. Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1967;10(8):1023-40.
35- Al-Mutairi NN. Fouling studies and control in heat exchangers (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Chemical Engineering, College of Engineering, King Saud University, Saudi Arabia). 2007.
36- Cao Z, Wu Z, Abbood S, Sundén B. An analysis of pool boiling heat transfer on nanoparticle-coated surfaces. Energy Procedia. 2019;158:5880-7.
37- Khooshehchin M, Mohammadidoust A, Ghotbinasab S. An optimization study on heat transfer of pool boiling exposed ultrasonic waves and particles addition. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020;114:104558.
38- Peyghambarzadeh SM, Vatani A, Jamialahmadi M. Experimental study of micro-particle fouling under forced convective heat transfer. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2012;29(4):713-24.