

بررسی اثرهای زبری سطح انتقال حرارت در جوشش استخری در محلول استون-ایزوپروپانول

محسن خوشه‌چین^۱، سعید اویسی^۲، سهراب فتحی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

پیام‌نگار: s.fathi@kut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، به بررسی اثرهای افزایش زبری سطح انتقال حرارت بر ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری در محلول‌های دوجزئی استون و ایزوپروپانول با درصد حجمی ثابت (۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول و همچنین محلول ۷۰٪ استون و ۳۰٪ ایزوپروپانول) پرداخته شده است. سامانه آزمایشی از یک مکعب شیشه‌ای عایق بندی شده، یک استوانه فلزی از جنس برنز به عنوان سطح انتقال حرارت و یک لامپ مدادی وصل شده به اتوترانسفورماتور به عنوان منبع حرارتی تشکیل شده است. آزمایش‌ها با چهار زبری مختلف (۰/۲۵، ۰/۳۴، ۰/۴۷ و ۰/۶۱ میکرومتر) سطح انتقال حرارت و گستره شارهای حرارتی از ۱/۵ تا ۸۸ کیلووات بر متر مربع و در شرایط هواکرهای انجام گرفته است. نتایج نشان داده است که با افزایش زبری سطح، تولید حباب در محلول بیشتر شده و به دنبال آن آشفتنگی افزایش یافته است؛ در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت را به همراه داشته است. مدل بهینه با حداکثر همپوشانی با نتایج آزمایشگاهی این‌گونه مشخص گردید که در این میان مدل وینایاک (۲۰۰۴) با خطای متوسط ۱۵٪ کمترین خطا و مدل تام (۱۹۶۶) با خطای متوسط ۲۷٪ بیشترین خطا را در میان دیگر مدل‌ها دارا هستند.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۲

شماره صفحات: ۴۶ تا ۶۰

کلیدواژه‌ها: ضریب انتقال

حرارت جوشش، نقاط مولد حباب،

محلول دوجزئی، زبری سطح

۱. مقدمه

به علت گرمای زیاد نهان که در ارتباط با تغییر فاز وجود دارد (به عنوان مثال: خنک‌سازی ریزتراشه و مدیریت بار حرارتی نیروگاه‌های هسته‌ای) به طور چشمگیری در مهندسی حرارتی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. جوشش هسته‌ای فرایندی پیچیده با تغییر فاز است که با بسیاری از عوامل مانند خواص سیال (مایع)، فشار عملیاتی و شرایط سطح انتقال حرارت، تحت تأثیر

جوشش هسته‌ای یکی از مؤثرترین روش‌های انتقال حرارت است که به طور گسترده در کاربردهای مختلف فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت انرژی حرارتی از راه انتقال حرارت بین دوفاز،

* کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، دانشکده انرژی، گروه مهندسی شیمی

انتقال حرارت می‌شود [۱۴ و ۶]. فان^۶ [۱۵] با افزایش زبری سطح در مقیاس نانو با استفاده از اسپری پوشش نانوذرات سیلیکا، دفع گرما از سطح را تا ۶۰٪ افزایش داد. کانگ^۷ [۱۶] با افزایش زبری سطح یک لوله افقی به ۳۰٪، افزایش ۷۱/۴٪ را در شار حرارتی در جوشش استخری مشاهده کرد. نانوسیالات نیز یکی دیگر از راه‌های افزایش ضریب انتقال حرارت است که در چندسال گذشته محبوبیت پیدا کرده است [۲۰-۱۷]. از هنگامی که فالکنر^۸ [۲۱] آزمایش‌هایی را به بررسی تأثیرات نانوذرات سرامیکی بر ضریب انتقال حرارت همرفتی در یک ظرف حرارتی اختصاص داد و بهبود محدود ضریب انتقال حرارت را گزارش کرد، دیگر پژوهندگان نیز بر آن شدند تا با نانوسیال به‌عنوان خنک‌کننده در مبدل‌های حرارتی و سامانه‌های انتقال حرارتی آغاز به کار کنند [۲۵-۲۲]. در ادامه بررسی مروراری بر روابطی که تاکنون ارائه شده خواهیم داشت

پالن^۹ [۲۶] در سال ۱۹۶۴ جزء اولین پژوهشگرانی بود که مدلی برای مخلوط مایعات ارائه کرد. وی در این مدل، ضریب انتقال حرارت را تابعی از درجه حرارت فرض کرد. استفان و کرومر^{۱۰} [۲۷] در سال ۱۹۶۹ مدل خود را که از مهمترین روابط در پیشگویی ضریب انتقال حرارت به‌شمار می‌رود ارائه کردند. این مدل دارای شاخصی تنظیم‌کننده است که باعث شده محدودۀ کاربرد آن برای مخلوط‌های مایع افزایش یابد. کالوس و رایس^{۱۱} [۲۸] در سال ۱۹۷۲ داده‌های آزمایشگاهی مخلوط‌های دوجزئی استون-آب و آیزوپروپانول-آب و آب-گلیکول را بر روی یک‌سیم با آلیاژ نیکل-آلومینیوم انجام دادند. آن‌ها برای نخستین بار از ضرائب انتقال جرم و حرارت استفاده کردند. در ۱۹۸۰ جانگ نیکل^{۱۲} [۲۹] آزمایش‌های خود را بر روی یک‌صفحه مسی افقی و با استفاده از مخلوط‌های مایع سردساز انجام داد. وی در بخش مدل‌سازی این آزمایش‌ها، مدلی خاص را برای ضریب انتقال حرارت آرمانی در مخلوط‌ها ارائه کرد. شلوندر^{۱۳} [۳۰] در سال ۱۹۸۶ مدل تجربی خود را با استفاده از یک شاخص تنظیم‌کننده برای دقت بیشتر و طیف وسیع‌تر در کاربرد مخلوط‌ها ارائه کرد. شلوندر در محلول مورد

قرار می‌گیرد [۴]. توسعه‌دهندگان سامانه‌های انتقال حرارت، تمرکز خود را بر طرح‌های انتقال حرارتی دوفازی متمرکز کرده‌اند. سامانه‌های انتقال حرارت دوفازی، توانایی به‌دست‌آوردن اندازه‌های بالاتری از گرما را دارا هستند، درحالی‌که به‌طور همزمان دمای سامانه نیز پایین نگه‌داشته می‌شود [۵]. افزایش ضریب انتقال حرارت، به شاخص‌هایی همچون قطر جدایش حباب، فرکانس جدایش حباب، نقاط مولد حباب و غیره بستگی دارد. یکی از عوامل افزایش این شاخص‌ها ناهنجاری‌های ریزمقیاسی سطح یا همان زبری سطح است، که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. افزایش زبری سطح به‌طور معمول باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت است، که در نتیجه فعال‌شدن حفره‌های فعال هسته‌زایی در سطح انتقال حرارت است [۶]. تراکم حفره‌های فعال هسته‌زایی و قابلیت ترشوندگی سطح انتقال حرارت، مسئول انتقال حرارت و افزایش شار حرارتی هستند [۷].

نیمکار^۱ و همکاران [۸] در یک پژوهش آزمایشگاهی، پس از انجام جوشش هسته‌ای از FC-72 بر روی سطوح آلومینیوم، برنج و مس گزارش کردند که نرخ رشد حباب با افزایش شار حرارتی سطح انتقال حرارت، افزایش یافته است. چوو^۲ و همکاران [۹] با تعریف خوبی از ریزستون‌های سیلیکون پوشاننده سطح، برای نشان‌دادن اثر زبری سطح انتقال حرارت برای افزایش شار حرارتی بحرانی^۳ (CHF)، مدل پیشنهادی CHF خود را، براساس زبری و قدرت نیروهای موینگی خط تماس حباب‌های بخار در سطح گرمکن ارائه کردند، که سازگاری خوبی با داده‌های تجربی از خود نشان می‌دهد. اثبات شده که زبری و تخلخل روی سطح، نقش مهمی در ضریب انتقال حرارت جوشش دارد [۱۰ و ۱۱]. زبری سطح می‌تواند تأثیر عمیقی بر عملکرد انتقال حرارت از جمله انتقال تک فاز، دوفاز و حتی تابش نیز داشته باشد [۱۲]. ستول ها کیم^۴ [۱۳] با بررسی اثر بخشی سطوح با زبری میکرومتر در افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش^۵ (BHTC) و CHF در شرایط اشباع، نشان داد که افزایش زبری سطح، BHTC را ۳۰٪ و CHF را ۳۵۰٪ نسبت به سطح صیقلی بهبود بخشیده است. مقالات بازپسین، درباره گسترش سطوح، نشان داده‌اند که شناخت و بهره‌برداری از سازوکارهای جوشش موجب بهبود ژرفی در عملکرد

6. Fan
7. Kang
8. Faulkner
9. Palen.
10. Stephan and Körner
11. Calus and Rice
12. Jung Nickel
13. Schlünder

1. Nimkar
2. Chu
3. Critical Heat flux
4. Seol Ha Kim
5. Boiling Heat Transfer Coefficient

سطح انتقال حرارت و تغییرات کشش سطحی محلول در حال جوشش با استفاده از درصد‌های حجمی مختلف محلول الکلی (استون و ایزوپروپانول) است؛ زیرا زبری سطح انتقال حرارت با ایجاد چشمه‌های فعال مولد حباب و از طرفی تأثیرات کشش سطحی با افزایش و کاهش قطر جدایش حباب تولیدی، موجب افزایش آشفته‌گی‌ها و در نتیجه بالا رفتن ضریب انتقال حرارت جوشش در محلول می‌شود. افزایش ضریب انتقال حرارت تأثیر بسزایی در افزایش بازده حرارتی و بهینه‌شدن مصرف سوخت در کنار کاهش دمای سطح انتقال حرارت برای برداشت همان میزان حرارت مورد نیاز دارد. کاهش دمای سطح یعنی کاهش آسیب‌هایی که در طول فرایند در اثر گرما به سطح وارد می‌شود؛ بنابراین بررسی این دو عامل، برای درک بهتر از شرایط تأثیرپذیری در افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش، لازم و ضروری است.

۲. مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک گرمکن استوانه‌ای از جنس برنز است که به ترتیب با طول و قطر خارجی و قطر داخلی ۲۰، ۲/۵ و ۱/۳ سانتی‌متر به‌عنوان سطح انتقال حرارت در درون یک ظرف آکواریومی مکعب مستطیلی از جنس شیشه‌ایمِن و ضخامت ۱۰ mm با مقاومت حرارتی بالا، طوری قرار داده شده که اطراف آن را سیال فرا می‌گیرد. گرمکن استوانه‌ای توخالی است و یک لامپ مدادی به قطر ۱/۱ cm با توان حداکثر ۱ kW به‌عنوان منبع حرارت در درون آن قرار داده شده است و می‌توان به‌آسانی ولتاژ آن و به‌عبارتی توان را با اتوترانس تغییر داد.

آزمایش‌ها با زبری‌های متفاوت سطح گرمکن (۰/۲۵، ۰/۳۴، ۰/۴۷ و ۰/۶۱ میکرومتر) انجام می‌گیرد. دامنه ولتاژ از ۵۰ تا ۲۷۰ ولت است و به‌صورت پلکانی ۲۰ v افزایش می‌یابد. برای اندازه‌گیری دمای سطح که به‌وسیله لامپ مدادی در ولتاژهای مختلف تولید می‌شود سه‌سوراخ با قطر ۲mm با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم در نزدیک‌ترین قسمت به سطح خارجی لوله برنزی، ایجاد شده است که در درون هر کدام یک ترموکوپل نوع K قرار داده می‌شود. صفحه نمایش دما از نوع LCD و مدل آن N3NKCC T4WM است که اطلاعات حاصل از ترموکوپل را دریافت و پس از پردازش نمایش می‌دهد. محلول‌های مورد استفاده هر کدام به‌مقدار ۷ لیتر هستند که محلول اول تشکیل شده از درصد حجمی ثابتی برابر با ۷۰٪ استون و

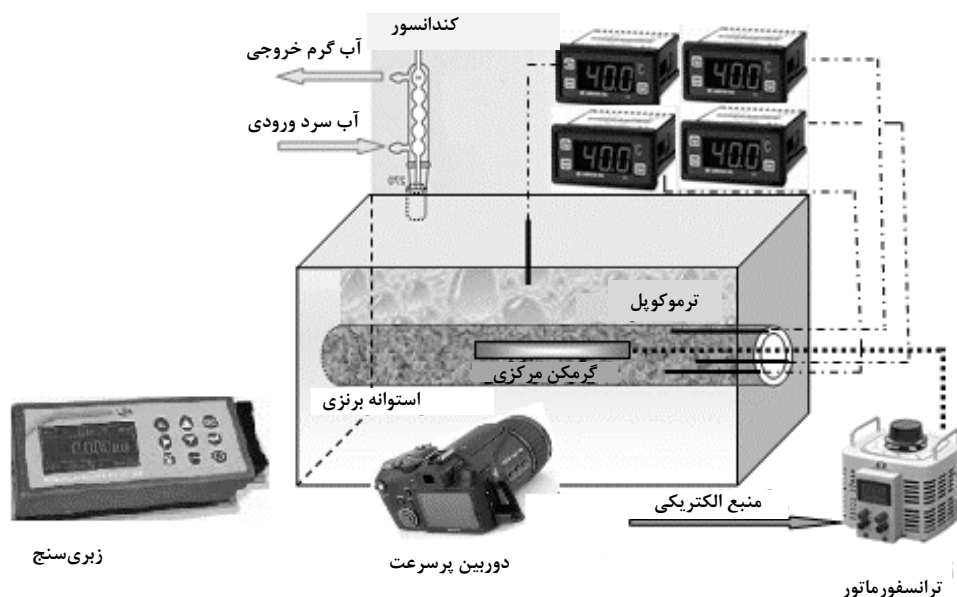
آزمایش خود از $SF_6 - CF_2Cl_2$ استفاده کرد و در مدل‌سازی خود ضریب انتقال جرم همزمان با انتقال حرارت را در نظر گرفت و مقدار آن را برابر با 2×10^{-4} m/s لحاظ نمود. یونال^۱ [۳۱] در سال ۱۹۸۶ مدل را بر پایه تجزیه ابعادی و با استفاده از داده‌های ۳۸۸ آزمایش از ۱۳ مخلوط دوجزئی آزمایشگاهی ارائه کرد. یونال توانست در این مدل میزان انحراف از نتایج آزمایشگاهی را برای تعدادی از مخلوط‌ها کاهش دهد. تام و شاکر^۲ [۳۲] در سال ۱۹۸۷ مدل جدیدی با فرض این که دمای نقطه جوشش در نزدیک سطح ثابت نیست ساختند. این مدل، اصلاح شده مدل آن‌ها در سال ۱۹۸۳ بود که پیش‌بینی دقیق‌تری از ضریب انتقال حرارت مخلوط‌های دوجزئی نسبت به مدل قبلی خود دارد. فوجیتا و تسوتسوی^۳ [۳۳] در سال ۱۹۹۶ آزمایش‌های خود را با محلول $CF_3CF_2F/CHCl_2CF_3$ بر روی یک سطح استوانه عمودی انجام دادند که باعث به‌دست‌آمدن مدلی بر اساس این فرض شد که دمای حباب در نزدیکی سطح انتقال حرارت ثابت نیست و با اختلاف دما سطح انتقال حرارت و محلول نسبت مستقیم دارد. وینایاک و بالاک ریشنان^۴ [۳۴] در سال ۲۰۰۴ مطالعات آزمایشگاهی خود را در مخلوط‌های استون-ایزوپروپانول، استون-آب و متیل اتیل کتون-آب انجام دادند و سپس نتایج آزمایش‌ها را مدل کردند. این مدل نیز مانند بسیاری از مدل‌ها شامل ضریب‌های جرمی و حرارتی بود. علوی فاضل^۵ [۳۵] در سال ۲۰۰۸ مدل خود را که برای مخلوط‌ها شامل آب - مونواتانل آمین و همچنین آب-دی اتانل آمین جداگانه و به‌صورت آزمایشگاهی بر روی یک استوانه افقی و در فشار هواکره‌ای اندازه‌گیری شده است، ارائه کرد. این آزمایش‌ها در محدوده وسیعی از غلظت‌ها و شار حرارتی و تنها با داشتن کسر مولی اجزا، قابل اجرا برای محلول‌ها انجام می‌شود و همپوشانی بسیار بالایی با داده‌های تجربی برای حساب کردن ضریب انتقال حرارت مایعات خالص دارد. از مهمترین دلایل انجام این پژوهش، همزمانی بررسی اثرهای زبری سطح انتقال حرارت و تغییرات کشش سطحی محلول در حال جوشش با استفاده از درصد‌های مختلف محلول الکلی (استون و ایزوپروپانول) است.

از مهم‌ترین دلایل انجام این پژوهش، بررسی همزمان اثرهای زبری

1. Unal
2. Thome and Shakir
3. Fujita and Tsutsui
4. Vinayak and Balakrishnan
5. Alavi Fazeli

جدول ۱. روابط پیشنهادی محققان برای ضریب انتقال گرما.

ارائه‌دهنده	مدل ریاضی
[۲۶] پالن ۱۹۶۴	$h/h_{id} = e^{-0.027\Delta T_{bp}}$ $\Delta T_{bp} = T_{dew\ point} - T_{bubble\ point}$
[۲۷] استفان ۱۹۶۹	$h/h_{id} = (1/1 + K_o y - x (0.88 + 0.13P)) K_o = -1.141 \log(P^*) - 0.06$
[۲۸] کالوس و رایس ۱۹۷۲	$h/h_{id} = 1/[1 + y - x (\hat{\alpha}/D_{AB})^{0.50}]^{0.7}$
[۲۹] جانگ نیکل ۱۹۸۰	$h/h_{id} = 1/1 + K_o y - x (\rho_V/\rho_l)(q/A)^{(0.48+0.1x)}$ $h_{id} = x_1h_1 + x_2h_2$
[۳۰] شولیندر ۱۹۸۶	$B_0 = 1; \beta_1 = 2E - 4\ m/s$ $h/h_{id} = \left\{ 1 + \frac{\alpha_{id}}{q} \left[\sum_{i=1}^{n-1} (T_{Sn} - T_{Si})(y_i - x_i)(1 - \exp(-B_o q / \beta_{li} \rho_l H_{fg})) \right] \right\}^{-1}$;
[۳۱] یونال ۱۹۸۶	$h/h_{id} = 1/[1 + (b_2 + b_3)(1 + b_4)][1 + b_5]$; $b_2 = (1 - x) \ln \frac{1.01 - x}{1.01 - y} + x \ln \frac{x}{y} + y - x ^{1.5}$; $b_3 = 0$; $b_4 = 152 P_r^{3.9} b_5 = 0.92 y - x ^{0.001} P_r^{0.66}$
[۳۲] تام و شاکر ۱۹۸۷	$h/h_{id} = 1/1 + (h_{id} \Delta T_{bp} / q) \cdot [1 - \exp[-B_o \cdot q / \beta_{li} \cdot \rho_l \cdot h_{fg}]]$
[۳۳] فوجیتا ۱۹۹۶	$h/h_{id} = 1/1 + (h_{id} \Delta T_{bp} / q) \left(1 - 0.75 \exp \left[(-60 q / \rho_V h_{fg}) \cdot (\rho_V^2 / \sigma g (\rho_l - \rho_V))^{1/4} \right] \right)$
[۳۴] وینایاک ۲۰۰۴	$h/h_{id} = \left[1 - (y - x \sqrt{D_{AB} / \hat{\alpha}}) \right]$ $h_{id} = 0.74 \times \left(\frac{K_l}{d_b} \right) * \left[\frac{q \cdot d_b}{AK_l \cdot T_s} \right]^{0.674} * \left[\frac{\rho_V}{\rho_l} \right]^{0.297} * \left[\frac{H_{fg} d_b^2}{\hat{\alpha} l^2} \right]^{0.371} * \left[\frac{\hat{\alpha} l^2 \cdot \rho_l}{\sigma d_b} \right]^{0.35}$ $* \left[\frac{(\rho_l - \rho_V)}{\rho_l} \right]^{-1.73} * P_r^{-0.5} * \gamma^{-0.1} * \left(\frac{Ra P}{\sigma} \right)^{0.133}$
[۳۵] علوی ۲۰۰۸	$\frac{h}{h_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} (1 - \exp(-1.646 \times 10^{-2} (\frac{q}{A})))}$



شکل ۱. طرحواره دستگاه جوشش استخری.

پیش از برآورد نبود قطعیت برای ضریب انتقال حرارت، δh لازم است که نبود قطعیت تفاوت دما، $\delta \Delta T$ را حساب کنیم [۳۶]:

$$\delta \Delta T = \sqrt{(\delta T_s)^2 - (\delta T_{th})^2} \quad (۳)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2} \quad (۴)$$

دقیق بودن تجزیه و تحلیل نبود قطعیت در حال حاضر برای آزمایش انجام شده، که در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول ۲. منابع نبود قطعیت.

میزان خطا	شاخص
$\pm 0.1 \text{ mm}$	قطر و طول لوله
$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	ترموکوپل K-type
$\pm 1\% \text{ V}$	ولتاژ (V)
$\pm 1\% \text{ A}$	جریان (A)
$\pm 1/15 \text{ W}$	توان (W)
$\pm 1/8545 \text{ kW.m}^{-2}$	۷۶ در شار حرارتی kW.M^{-2}
$\pm 0.01 \text{ W.m}^{-2}.\text{ }^\circ\text{C}$	KD2 pro
± 0.5	زبری سنج
± 0.01	pH

۳. بحث و نتایج

در این بخش به بررسی تغییرهای ضریب انتقال حرارت بر اساس تغییرات کشش سطحی و زبری سطح انتقال حرارت در محلول‌های استون/ایزوپروپانول پرداخته شده است. مهمترین شاخص‌های اثرگذار بر افزایش ضریب انتقال حرارت، همان گونه که پیشتر هم ذکر شد، پویایی شناختی حباب (قطر جدایش، بسامد جدایش و نقاط مولد حباب) است؛ زیرا در جوشش استخری که هیچ‌گونه نیروی خارجی که باعث اغتشاش در محلول شود وجود ندارد، در نتیجه هرکدام از این شاخص‌ها با ایجاد اغتشاش در محلول، تأثیر به‌سزایی در افزایش انتقال حرارت دارند. در آغاز به بررسی تغییرهای کشش سطحی که عامل مهمی در رشد و جدایش حباب است پرداخته شده است.

۳۰٪ ایزوپروپانول و محلول دوم با درصد حجمی ثابت ۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول تهیه شده‌اند. برای ثابت نگه‌داشتن حجم و غلظت محلول، از یک کندانسور در بالای آکواریوم باهدف میعان بخارهای تولیدشده و بازگشت آن‌ها استفاده شده است. همواره به کمک ترموکوپل چهارم که در محلول قرار دارد از جوشش اشباع محلول در طول آزمایش‌ها اطمینان پیدا می‌کنیم. پس از به جوشش آمدن محلول، در حالت اشباع ۲۰ دقیقه فرصت داده می‌شود تا محلول در دمای اشباع باقی بماند. این فرصت زمانی باعث می‌شود تا حباب‌های هوای موجود در فاز مایع از سیستم خارج شود. در هر مرحله از آزمایش‌ها با استفاده از دوربین فیلم‌برداری پرسرعت Sony PMW-300K1 از تغییرات رخ داده در سطح انتقال حرارت و محلول در حال جوشش، فیلم گرفته می‌شود تا بتوان اثرها و تغییرهای پویایی شناختی حباب را ضبط و سپس این فیلم‌برداری را با استفاده از نرم‌افزار EDIUS (نرم‌افزاری برای ویرایش فیلم) آهسته کرد تا بتوان تغییرهای پویایی شناختی حباب را که شامل بسامد جدایش حباب، قطر جدایش حباب‌های تولیدشده و همچنین نقاط مولد حباب است مشاهده و حساب کرد. خواص فیزیکی سطح انتقال حرارت و محلول به ترتیب به وسیله دمای سطح انتقال حرارت و محلول حساب می‌شود. برای سنجش زبری سطح از دستگاه زبری‌سنج مدل RT-220 ساخت کمپانی PCE آلمان استفاده شده است. جزئیات بیشتر دستگاه در شکل (۱) نمایش داده شده است. برای حساب کردن مقدار ضریب انتقال حرارت از معادله (۱) قانون سرمایش نیوتن استفاده می‌شود.

$$q = h(T_s - T_{sat}) \quad (۱)$$

که این اختلاف دما یعنی $T_s - T_{sat}$ را دمای مازاد می‌گویند T_s را دمای سطح، T_{sat} را دمای اشباع و q شار حرارتی می‌نامند.

۲-۱ نبود اطمینان و کاهش داده

حداکثر نبود قطعیت تخمینی شار حرارتی برابر است با [۳۶]:

$$\frac{\delta(q/A)}{q/A} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2} \quad (۲)$$

۱-۳ حساب کردن کشش سطحی

معادله‌های (۵) و (۷) مکلوند^۱ به ترتیب برای حساب کردن کشش سطحی محلول‌های خالص و چند جزئی ارائه شده است [۳۱].

$$\sigma = P_C^{0.67} T_C^{0.33} Q (1 - T_r)^{1.2} \quad (5)$$

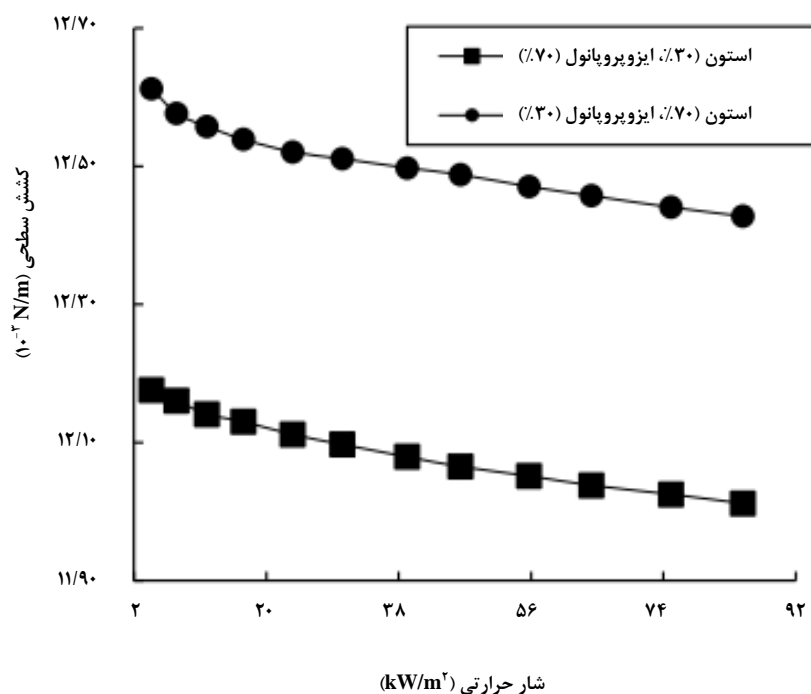
$$Q = 1.1207 \left(\frac{T_r \ln P_C}{1 + T_r} \right) - 0.281 \quad (6)$$

$$\sigma_{mix}^{1/4} = \sum_{i=1}^n P_i (\rho_{l mix} X_i - \rho_{g mix} Y_i) \quad (7)$$

در این معادله‌ها برای سامانه‌های ناقطبی، خطایی معادل ۵٪ تا ۱۰٪ و قطبی-قطبی معادل ۵٪ تا ۱۵٪ قابل انتظار است.

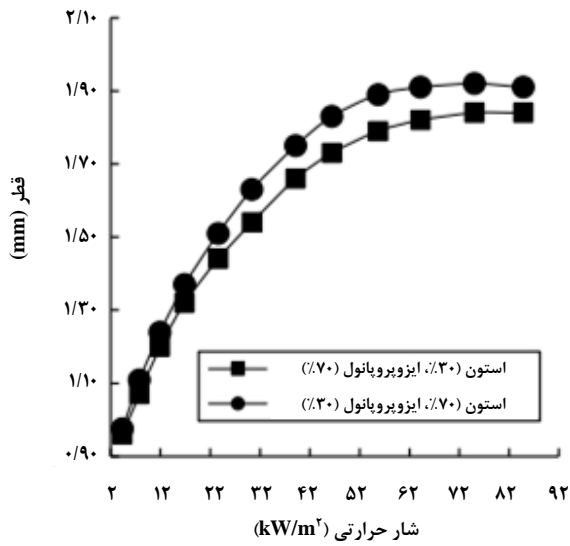
شکل (۲) به مقایسه نیروی کشش سطحی بین دو محلول

استون ۳۰٪ و استون ۷۰٪ در زبری پایه ۰/۲۵ میکرومتر سطح انتقال حرارت پرداخته و همان گونه که دیده می‌شود محلول حاوی ۷۰٪ استون کشش سطحی بیشتری از محلول حاوی ۳۰٪ استون دارد، که این افزایش به‌طور متوسط برابر ۳/۴۵ است. چون کشش سطحی استون نسبت به ایزوپروپانول بیشتر است انتظار می‌رود که حساب‌های تولیدی، سطح انتقال حرارت را دیرتر ترک‌کنند که باعث شده حساب‌ها هنگام جداسدن از سطح انتقال حرارت بزرگتر شوند و هرچه حساب بزرگتر شود یعنی توانایی آشفته‌گی بیشتری را در محلول دارا هستند. حال باید به بررسی اثر نیروی کشش سطحی بر قطر جدایش و بسامد جدایش حساب در شکل (۳-الف) و (۳-ب) و آخرسر، تغییرات ضریب انتقال حرارت در شکل (۳-پ) نشان داده شده است.

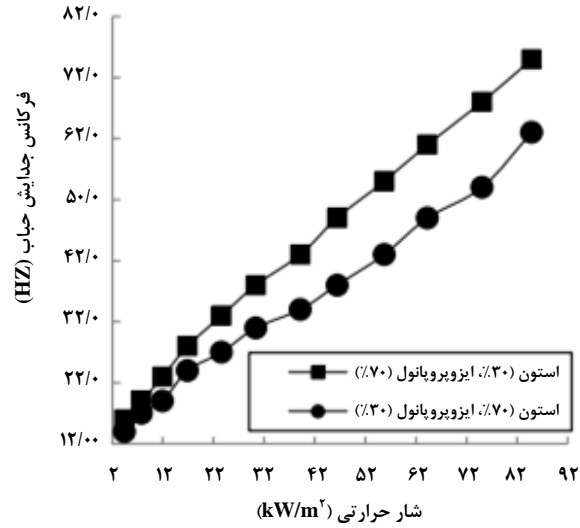


شکل ۲. تغییرهای نیروی کشش سطحی.

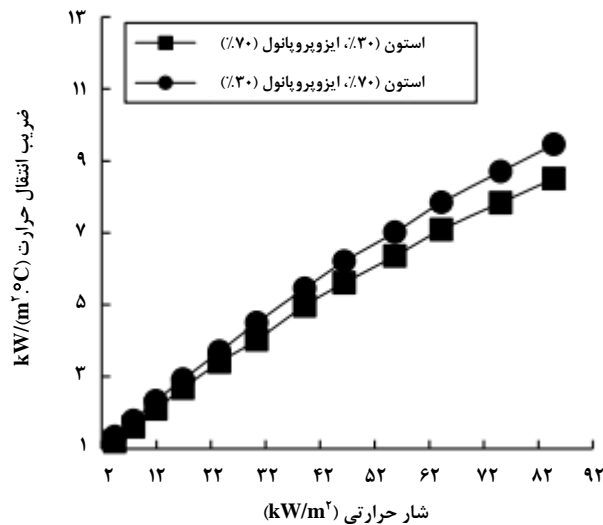
1. Macleond



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۳. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تغییر درصد حجمی الکل؛ (الف) تغییرهای قطر جدایش حباب، (ب) تغییرهای بسامد جدایش حباب، (پ) تغییرهای ضریب انتقال حرارت.

و (ب) قابل مشاهده است. بسامد جدایش حباب با قطر جدایش آن رابطه عکس دارد [۳۸]. بزرگتر شدن قطر حباب دو برتری نسبت به افزایش بسامد به همراه دارد: اول اینکه قطر بزرگتر حباب یعنی آشفته‌گی‌های بیشتر در محلول و دوم اینکه میزان حرارت گاز تشکیل‌دهنده حباب، دمایی به اندازه دمای سطح انتقال حرارت دارد، بنابراین هرچه حباب، بزرگتر تولید شود یعنی مقدار بیشتری از گرمای سطح انتقال حرارت را جدا و به محلول انتقال می‌دهد. این افزایش قطر حباب باعث شده که محلول حاوی ۷۰٪ استون،

محلول ۷۰٪ استون دارای قطر حباب‌های بزرگتری نسبت به محلول ۳۰٪ استون است که متوسط این افزایش برابر ۴۱/۴٪ است که علت اصلی آن، بیشتر بودن نیروی کشش سطحی است. نیروی کشش سطحی نقش مهمی در رشد حباب‌ها ایفا می‌کند، حباب پس از افزایش نیروی شناوری خود و غلبه آن بر نیروی کشش سطحی، می‌تواند از سطح انتقال حرارت جدا شود [۳۷]. کشش سطحی زیاد، یعنی زمان ماند بیشتر حباب در حال رشد بر سطح و از طرفی موجب کاهش بسامد جدایش حباب می‌شود که در شکل‌های (الف)

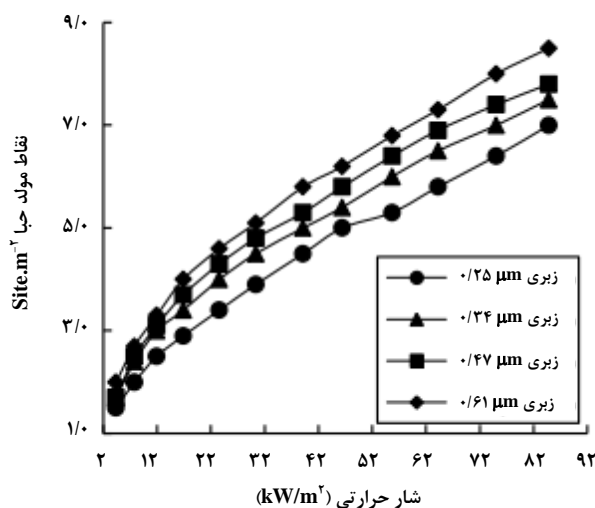
جوشش می‌شود. افزایش زبری سطح در کنار افزایش حرارت سطح انتقال حرارت، منجر به افزایش نقاط مولد حباب و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود [۳۹ و ۶]. در جدول (۳) میزان تغییرات چگالی نقاط مولد حباب و ضریب انتقال حرارت با افزایش زبری سطح انتقال حرارت، بررسی شده‌است.

۳-۲ بررسی تغییرات شار حرارتی بحرانی

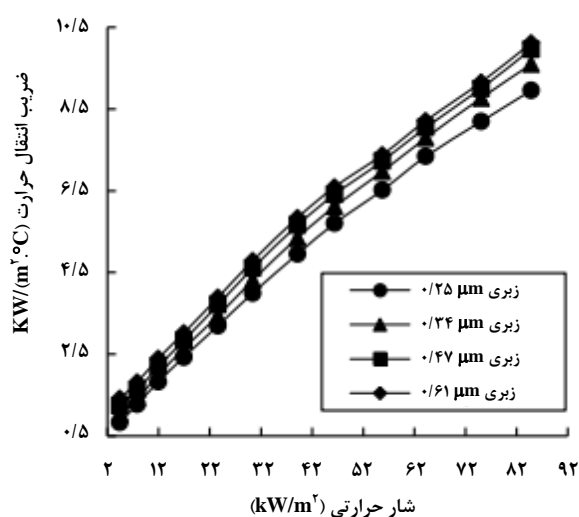
مهمترین اثری که افزایش ضریب انتقال حرارت به دنبال دارد، کاهش دمای سوپرهیتی سطح گرمکن ($T = T_W - T_{sat}$) است، که در این قسمت به آن پرداخته شده‌است.

به ضریب انتقال حرارت $12/85$ ٪ بیشتر نسبت به محلول حاوی 30 ٪ استون دست پیدا کند. با مشخص شدن محلول 70 ٪ استون به عنوان محلول مناسب‌تر، در ادامه برای رسیدن به ضریب انتقال حرارت بیشتر، به بررسی اثرهای زبر نمودن سطح بر چگالی نقاط مولد حباب پرداخته شده‌است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شکل ((۴-الف)) افزایش هر چه بیشتر زبری سطح گرمکن باعث افزایش چگالی نقاط مولد حباب شده‌است، که نتیجه آن در شکل ((۴-ب)) موجب افزایش ضریب انتقال حرارت شده‌است. افزایش چگالی نقاط مولد حباب باعث تولید حباب بیشتر و در نتیجه افزایش میزان آشفتگی‌ها در محلول در حال



(ب)

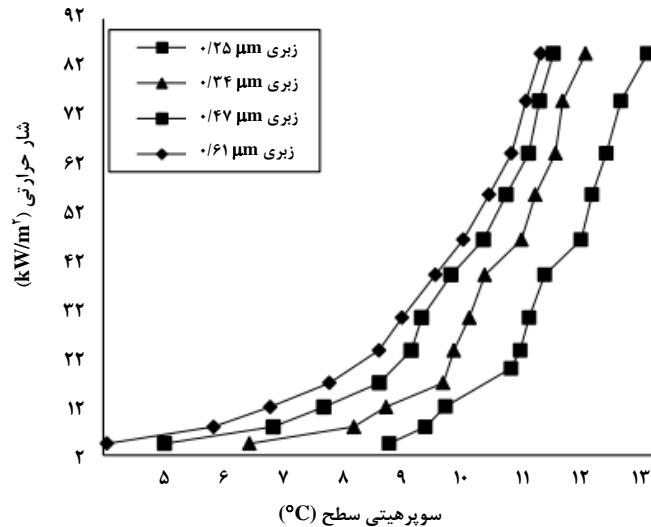


(الف)

شکل ۴. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تغییر زبری سطح انتقال حرارت؛ (الف) تغییرهای جدایش حباب، (ب) تغییرهای ضریب انتقال حرارت.

جدول ۳. درصد تغییرات چگالی نقاط مولد حباب و ضریب انتقال حرارت نسبت به زبری $0.25 \mu\text{m}$.

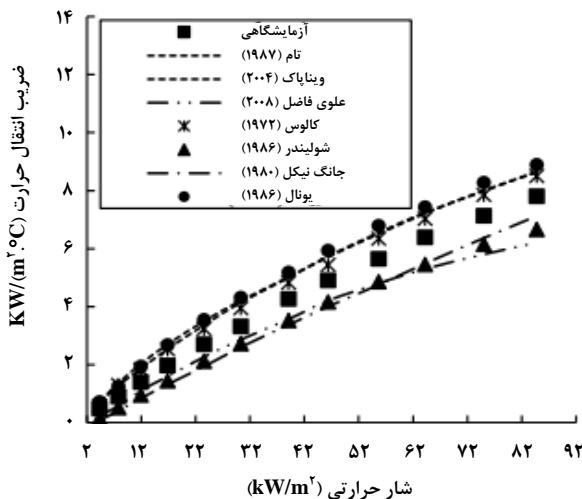
زبری	$0.34 \mu\text{m}$	$0.47 \mu\text{m}$	$0.61 \mu\text{m}$
چگالی نقاط مولد حباب	۱۳/۷۰	۲۰/۱۱	۲۱/۴۲
ضریب انتقال حرارت	۹/۳۸	۱۷/۷۵	۲۴/۴۸



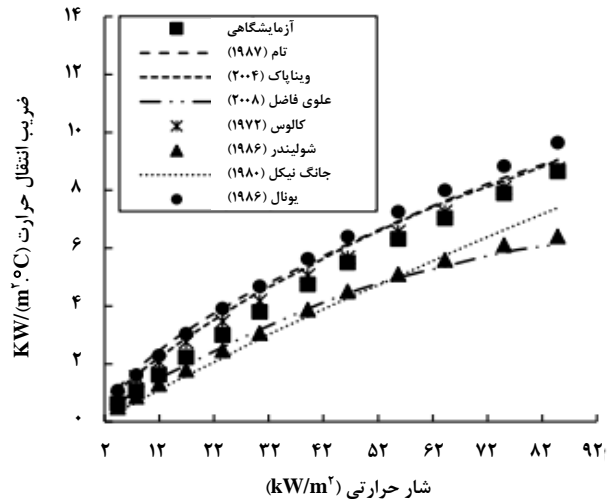
شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تغییر زبری سطح انتقال حرارت.

شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش زبری، مقدار سوپرهیتی سطح کاهش چشمگیری به دنبال داشته‌است. بیشترین کاهش را در زبری $0.61 \mu\text{m}$ به مقدار $1.18/55\%$ نسبت به زبری $0.25 \mu\text{m}$ به دست آمده‌است. پرو^۱ و همکاران [۴۰ و ۴۱] نشان دادند که زبری سطح باعث افزایش تراکم نقاط مولد حباب و کاهش شار گرمای بحرانی (CHF) می‌شود. افزایش در دمای سطح، باعث کاهش شدید سرعت انتقال حرارت می‌شود و همچنین افزایش فرسودگی سطح را به دنبال دارد [۴۲]. در نتیجه کاهش هرچه بیشتر دمای سطح انتقال حرارت

ولی با حفظ همان مقدار حرارت مورد نظر) یکی از مهمترین نتایج بررسی زبری سطح انتقال حرارت است. شکل (۶) به بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط پیشین که در بخش مقدمه ذکر شد می‌پردازد. البته از میان روابط ذکر شده، روابطی را که کمترین خطا با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند، استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت به دست آمده تابعی از شار حرارتی است که با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت نیز افزایش پیدا کرده‌است.

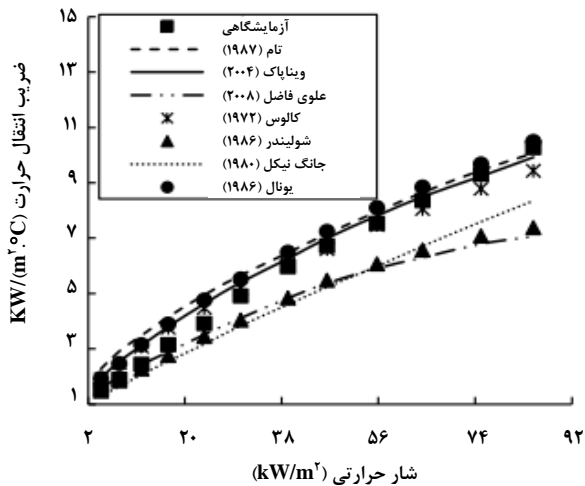


(ب) محلول ۷۰٪ استون و ۳۰٪ ایزوپروپانول

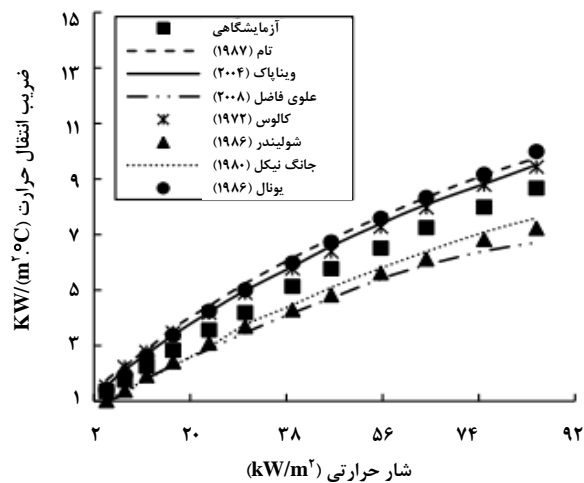


(الف) محلول ۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول

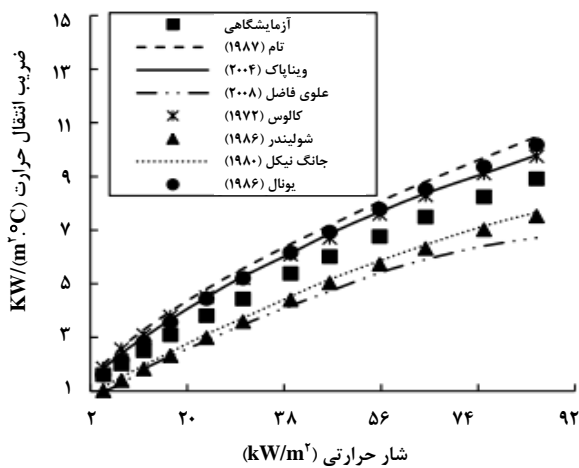
شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت با مدل‌های پیشین در شکل‌های (الف) و (ب) زبری $0.25 \mu\text{m}$ ، شکل‌های (پ) و (ت) زبری $0.34 \mu\text{m}$ ، شکل‌های (ث) و (ج) زبری $0.47 \mu\text{m}$ ، شکل‌های (چ) و (ح) زبری $0.61 \mu\text{m}$



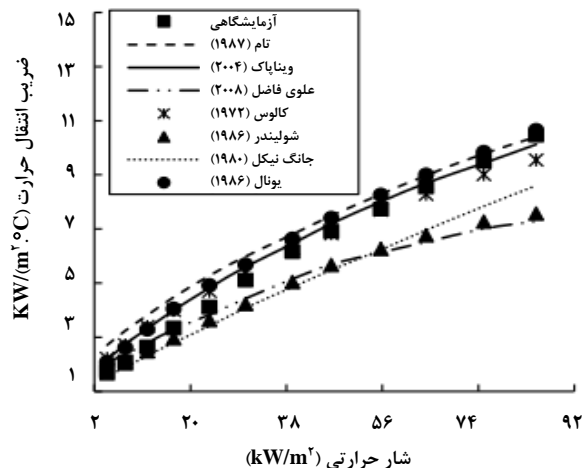
(ب) محلول ۷۰٪ استون و ۳۰٪ ایزوپروپانول



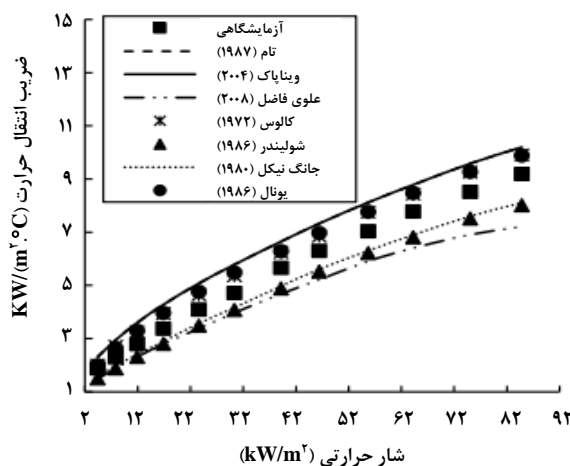
(پ) محلول ۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول



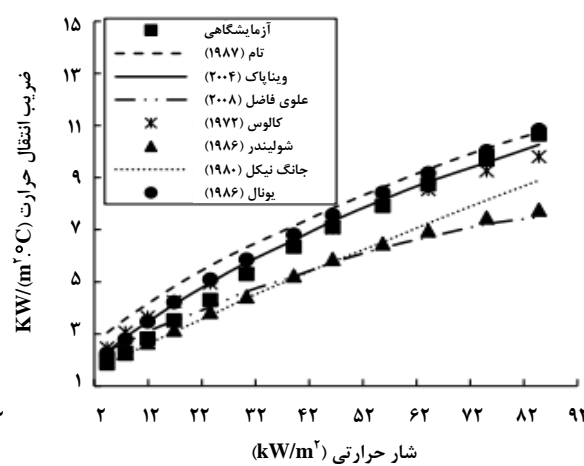
(ج) محلول ۷۰٪ استون و ۳۰٪ ایزوپروپانول



(ث) محلول ۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول



(ح) محلول ۷۰٪ استون و ۳۰٪ ایزوپروپانول



(چ) محلول ۳۰٪ استون و ۷۰٪ ایزوپروپانول

ادامه) شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت با مدل‌های پیشین در شکل‌های (الف) و (ب) زبری $25 \mu\text{m}$ ، شکل‌های (پ) و (ت) زبری $34 \mu\text{m}$ ، شکل‌های (ث) و (ج) زبری $47 \mu\text{m}$ و شکل‌های (چ) و (ح) زبری $61 \mu\text{m}$.

یک درصد در هر دو محلول افزایش پیدا کرده است؛ اما همچنان کمترین همپوشانی را با نتایج آزمایشگاهی دارا است.

با افزایش زبری سطح گرمکن از ۰/۳۴ به ۰/۴۷ میکرومتر در شکل‌های (ث) و (ج)، مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت باز هم بالاتر رفته و روابط وینایاک و یونال همپوشانی خود را با نتایج آزمایشگاهی خیلی بهتر کرده‌اند؛ که این افزایش همپوشانی به دلیل همان شاخص زبری سطح است که آنها در مدل‌های خود به کار گرفته‌اند. رابطه کالوس هر چند که خطایش افزایش یافته، ولی همچنان در میان دیگر مدل‌ها بعد از وینایاک کمترین خطا را دارا است.

آخرین مرحله با زبرکردن سطح گرمکن از ۰/۴۷ به ۰/۶۱ که در شکل‌های (چ) و (خ) مشاهده می‌شود، ضریب انتقال حرارت همچنان افزایش یافته است. روابط وینایاک و یونال بهترین همپوشانی را با نتایج آزمایشگاهی به دست آورده‌اند که دلیلش چنان که پیشتر ذکر شد وجود شاخص زبری سطح در روابط آنها است. رابطه کالوس نیز به دلیل اینکه رابطه‌اش را بر پایه آزمایش‌های دوجزئی استون و ایزوپروپانول به دست آورده است بعد از دورابطه بالا در جایگاه مناسبی نسبت به دیگر مدل‌ها قرار دارد. رابطه تام کمترین همپوشانی را نسبت به روابط دیگر دارا است، به طوری که در هر باز زبرکردن سطح گرمکن، مقدار خطایش بیشتر شده است. در جدول (۴) اندازه‌های خطای هریک از روابط با نتایج آزمایشگاهی ذکر شده است.

همان گونه که در شکل (۶) پیدا است در زبری ۰/۲۵ میکرومتر شکل‌های (الف) و (ب)، ضریب انتقال حرارت در محلول با ۰/۷۰ استون بیشتر از مقدار آن با محلول ۰/۳۰ استون است. رابطه کالوس در هر دو محلول کمترین خطا (بیشترین همپوشانی) را با داده‌های آزمایشگاهی دارد، به گونه‌ای که در محلول ۰/۷۰ استون برابر ۰/۱۳/۴۹ و در محلول ۰/۳۰ استون ۰/۱۶/۹۲ است. مهمترین علت همپوشانی خوب رابطه کالوس این است که مدل را بر اساس آزمایش‌هایی بر روی محلول‌های دوجزئی، به ویژه ایزوپروپانول و استون انجام داده است. از سویی دیگر، رابطه تام و شکیر کمترین همپوشانی را با نتایج داشته است. روابط دیگر مانند علوی فاضل و شلوندر در شارهای حرارتی پایین، همپوشانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته‌اند و برعکس رابطه تام و وینایاک در شارهای حرارتی بالا همپوشانی بهتری به دست آورده‌اند؛ البته این اندازه‌های همپوشانی برای هر مدل در دو محلول با درصد بسیار اندکی متفاوت است. افزایش زبری سطح گرمکن از ۰/۲۵ به ۰/۳۴ میکرومتر در شکل‌های (پ) و (ت)، موجب شده ضریب انتقال حرارت افزایش چشم‌گیری پیدا کند، که این افزایش در محلول ۰/۷۰ استون با هم بیشتر از محلول ۰/۳۰ استون است که مهمترین عامل را می‌توان در افزایش نقاط مولد حباب و در نتیجه تولید بیشتر حباب و افزایش آشفتگی‌ها در سامانه دانست. رابطه کالوس هر چند اندکی افزایش خطا یافته است؛ اما همچنان کمترین خطا و بهترین همپوشانی را با داده‌های آزمایشگاهی دارد. رابطه تام مقدار خطایش به اندازه

جدول ۴. درصد خطای نتایج آزمایشگاهی موجود با مدل‌های پیشین در زبری‌های مختلف

تام	وینایاک	علوی	کالوس	شولیندر	جانگ نیکل	یونال	محلول	زبری
۱۹۸۷	۲۰۰۴	۲۰۰۸	۱۹۷۲	۱۹۸۶	۱۹۸۰	۱۹۸۶		
۲۳/۸۴	۲۰/۹۲	۱۸/۸۱	۱۶/۹۲	۲۱/۹۱	۲۴/۲۶	۲۳/۳۸	۳۰٪ استون	۰/۲۵ میکرومتر
۲۵/۹۱	۱۸/۴۳	۱۵/۰۱	۱۳/۴۹	۱۹/۰۵	۲۳/۳۵	۱۲/۸۴	۷۰٪ استون	۰/۲۵ میکرومتر
۲۴/۶۵	۱۸/۶۶	۲۰/۷۲	۱۸/۰۵	۱۹/۷۹	۲۰/۱۲	۱۹/۷۹	۳۰٪ استون	۰/۳۴ میکرومتر
۲۶/۰۶	۱۶/۴۸	۱۶/۷۷	۱۴/۸۵	۱۷/۰۸	۲۱/۸۶	۱۸/۱۸	۷۰٪ استون	۰/۳۴ میکرومتر
۲۵/۱۶	۱۶/۹۵	۲۱/۱۸	۱۹/۱۳	۱۷/۷۴	۱۷/۰۴	۱۵/۵۸	۳۰٪ استون	۰/۴۷ میکرومتر
۲۷/۶۶	۱۴/۹۸	۱۸/۳۳	۱۵/۰۳	۱۶/۸۱	۱۷/۷۲	۱۵/۳۵	۷۰٪ استون	۰/۴۷ میکرومتر
۲۶/۱۱	۱۳/۷۱	۲۲/۰۷	۲۰/۷۶	۱۶/۸۶	۱۶/۶۵	۱۴/۰۹	۳۰٪ استون	۰/۴۷ میکرومتر
۲۹/۸۷	۱۲/۷۴	۱۹/۳۰	۱۵/۵۶	۱۵/۴۷	۱۷/۹۶	۱۳/۶۱	۷۰٪ استون	۰/۴۷ میکرومتر

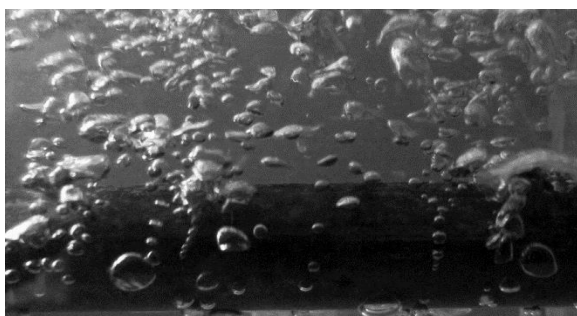
افزایش یابد که نتیجه این دو شاخص افزایش آشفته‌گی‌ها در محلول در حال جوشش است. شاخص تأثیرگذار دیگر، مقدار کشش سطحی است؛ به دلیل اینکه کشش سطحی استون نسبت به ایزوپروپانول بیشتر است، باعث شده تا زمان ماند و رشد حباب در سطح انتقال حرارت بیشتر شود و حباب‌های بزرگتری سطح گرمکن را ترک کنند؛ در نتیجه آشفته‌گی بیشتری در محلول ایجاد شود. در نتیجه همین کشش سطحی بیشتر است که همواره ضریب انتقال حرارت در محلول ۷۰٪ استون از محلول ۳۰٪ آن بالاتر است.

نتیجه مهم در افزایش ضریب انتقال حرارت، کاهش دمای سطح انتقال حرارت است؛ زیرا سطح انتقال حرارت زیر دمای کمتری، حرارت را انتقال می‌دهد که موجب کاهش آسیب‌های احتمالی به سطح و افزایش طول عمر آن می‌شود. در میان روابط، رابطه وینایاک (۲۰۰۴) با خطای متوسط ۱۵٪ به علت داشتن شاخص زبری سطح در معادله خود بهترین همپوشانی و رابطه تام (۱۹۸۷) با خطای متوسط ۲۷٪ کمترین همپوشانی را با نتایج این پژوهش دارا بوده است.

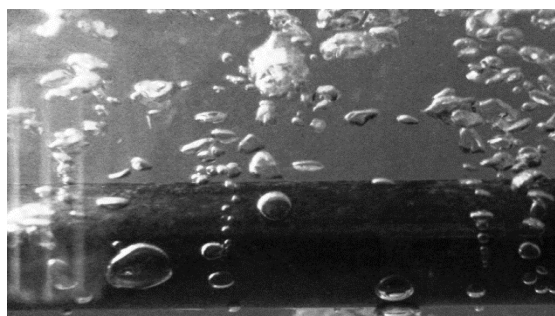
شکل (۷) حباب‌های تولیدی در سطح انتقال حرارت را در درصد حجمی محلول ۷۰٪ استون با شار حرارتی ثابت و در چهار زبری مختلف نشان می‌دهد. از شکل (الف) تا (ت) با افزایش زبری سطح نقاط مولد حباب افزایش پیدا کرده و به دنبال آن حباب‌های تولیدی نیز افزایش یافته است که افزایش آشفته‌گی را همان گونه که مشاهده می‌شود در پی داشته است. افزایش شار حرارتی، همواره نقاط مولد و بسامد جدایش حباب را افزایش می‌دهد، در نتیجه آشفته‌گی‌های بیشتری به همراه دارد، از دیگر سو افزایش بیش از حد شار حرارتی و بیشتر شدن نقاط مولد حباب، سطح انتقال حرارت را به طور کامل با حباب می‌پوشاند که موجب افزایش مقاومت حرارتی و کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود [۳۵].

۴. نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با افزایش هرچه بیشتر زبری، ضریب انتقال حرارت بالاتر می‌رود. زبر کردن سطح موجب شده است تا نقاط مولد حباب بیشتر و در کنار افزایش شار حرارتی، بسامد جدایش حباب‌ها نیز



(ب) زبری ۰/۳۴ میکرومتر



(الف) زبری ۰/۲۵ میکرومتر



(ت) زبری ۰/۶۱ میکرومتر



(پ) زبری ۰/۴۷ میکرومتر

شکل ۷. تصویر تولید حباب در محلول استون/ایزوپروپانول شار حرارتی ۲۰ کیلووات بر مترمربع

علائم و نشانه‌ها	زیر نویس‌ها
A	B
سطح مقطع، m^2	حباب
B_0	b_p
نسبت انتقال حرارت تبخیر به کل انتقال حرارت	نقطه حباب
C_{PL}	d
ظرفیت حرارتی مایع، J/kg.K	قطر
D	f
قطر جدایش حباب، mm	سطح سیال
D_{AB}	g
ضریب نفوذ، $m.s^{-2}$	گرانش
F	l
بسامد جدایش حباب، H_z	مایع
h	i
ضریب انتقال حرارت، $W.m^{-2}.C^{-1}$	ایده‌آل
h_{fg}	sat
گرمای نهان تبخیر، $J.kg^{-1}$	دمای اشباع
K_0	v
ثابت معادله استوفان	بخار
K_L	th
نفوذپذیری گرمایی مایع	دما
I	w
جریان الکتریکی، A	دیواره
$\frac{N}{A}$	
نقاط مولد حباب، $l.m^{-2}$	
P^*	
فشار اشباع	
Pr	
فشار کاهیده	
q	
شار گرمایی، W	
R_p	
متوسط زبری سطح، μm	
S	
سطح، m^2	
T	
دما، $^{\circ}C$	
V	
اختلاف پتانسیل	
W	
توان الکتریکی، w	
X	
جزء جرمی مایع	
Y	
جزء جرمی بخار	

مراجع

- [1] Thome, J. R., "State-of-the-art overview of boiling and two-phase flows in microchannels", Heat transfer engineering, 27(9): pp. 4-19, (2006).
- [2] Pop, E., "Energy dissipation and transport in nanoscale devices", Nano Research, 3(3): 147-169, (2010).
- [3] Dhir, V., "Boiling heat transfer", Annual review of fluid mechanics, 30(1): pp. 365-401, (1998).
- [4] Wang, J., Diao, M., Liu, X., "Numerical simulation of pool boiling with special heated surfaces", International Journal of Heat and Mass Transfer, 130: pp. 460-468, (2019).
- [5] Liang, G., Mudawar, I., "Review of pool boiling enhancement by surface modification", International Journal of Heat and Mass Transfer, 128: pp. 892-933, (2019).
- [6] Emery, T. S., Jaikumar, A., Raghupathi, P., Joshi, I., Kandlikar, S. G., "Dual enhancement in HTC and CHF for external tubular pool boiling—A mechanistic perspective and future directions", International Journal of Heat and Mass Transfer, 122: pp. 1053-1073, (2018).
- [7] Cao, Z., Wu, Z., Abbood, S., Sundén, B., "An analysis of pool boiling heat transfer on nanoparticle-coated surfaces", Energy Procedia, 158: pp. 5880-5887, (2019).
- [8] Nimkar, N. D., Bhavnani, S. H., Jaeger, R. C., "Effect of nucleation site spacing on the pool boiling characteristics of a structured surface", International journal of heat and mass transfer, 49(17-18): pp. 2829-2839, (2006).

علائم یونانی

$\hat{\alpha}$	ضریب نفوذ حرارتی
βL	ضریب نفوذ جرمی
δ	ضریب نفوذ گرمایی m
ρ	چگالی، $kg m^{-3}$
σ	کشش سطحی، $N.m^{-1}$
π	عدد پی
Δ	اختلاف

- [9] Chu, K. -H., Enright, R., Wang, E. N., "Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer", *Applied Physics Letters*, 100(24): p. 241603, (2012).
- [10] O'Hanley, H., Coyle, C., Buongiorno, J., McKrell, T., Hu, L. W., Rubner, M., Cohen, R., "Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux", *Applied Physics Letters*, 103(2): p. 024102, (2013).
- [11] Ahmad, S. W., Karayiannis, T. G., Kenning, D. B. R., Luke, A., "Compound effect of EHD and surface roughness in pool boiling and CHF with R-123", *Applied Thermal Engineering*, 31(11-12): pp. 1994-2003, (2011).
- [12] Wen, C. -D., Mudawar, I., "Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(17-18): pp. 3591-3605, (2004).
- [13] Kim, S. H., Lee, G. C., Kang, J. Y., Moriyama, K., Kim, M. H., Park, H. S., "Boiling heat transfer and critical heat flux evaluation of the pool boiling on micro structured surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91: pp. 1140-1147, (2015).
- [14] Kandlikar, S. G., "Enhanced Macroconvection Mechanism with Separate Liquid-Vapor Pathways to Improve Pool Boiling Performance", *Journal of Heat Transfer*, 139(5): p. 051501, (2017).
- [15] Fan, L., -W., Li, J. -Q., Zhang, L., Yu, Z. -T., Cen, K. F., "Pool boiling heat transfer on a nanoscale roughness-enhanced superhydrophilic surface for accelerated quenching in water", *Applied Thermal Engineering*, 109: pp. 630-639, (2016).
- [16] Kang, M. -G., "Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer", *International journal of heat and mass transfer*, 43(22): pp. 4073-4085, (2000).
- [17] 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*, 154: p. 119783, (2020).
- [18] Khooshechin, M., Mohammadidous, 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*, 114: p. 104558, (2020).
- [19] Azmi, W. H., Sharif, M. Z., Yusof, T. M., Mamat, R., Redhwan, A. A. M., "Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69: pp. 415-428, (2017).
- [20] Kiseev, V., Sazhin, O., "Heat transfer enhancement in a loop thermosyphon using nanoparticles/water nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132: pp. 557-564, (2019).
- [21] Faulkner, D., Khotan, M., Shekarriz, R., "Practical design of a 1000 W/cm²/cooling system [High Power Electronics]", in *Nineteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, (2003). IEEE.
- [22] Ebrahimi-Dehshali, M., Najm-Barzanji, S. Z., Hakkaki-Fard, A., "Pool boiling heat transfer enhancement by twisted-tape fins", *Applied Thermal Engineering*, 135: pp. 170-177, (2018).
- [23] Sarafraz, M., Hormozi, F., Peyghambarzadeh, S., "Pool boiling heat transfer to aqueous alumina nano-fluids on the plain and concentric circular micro-structured (CCM) surfaces", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72: pp. 125-139, (2016).
- [24] Kim, T., Kim, J. M., Kim, J. H., Park, S. C., Ahn, H. S., "Orientation effects on bubble dynamics and nucleate pool boiling heat transfer of graphene-modified surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108: pp. 1393-1405, (2017).
- [25] Manetti, L. L., Stephen, M. T., Beck, P. A., Cardoso, E. M., "Evaluation of the heat transfer enhancement during pool boiling using low concentrations of Al₂O₃-water based nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 87: pp. 191-200, (2017).
- [26] Palen, J., Small, W., "A new way to design kettle and internal reboilers", *Hydrocarbon Processing*, 43(11): pp. 199-208, (1964).
- [27] Stephan, K., "Calculation of heat transfer in evaporating binary liquid mixtures", *Chem. Ing. Tech*, 41: pp. 409-417, (1969).
- [28] Calus, W., Rice, P., "Pool boiling—binary liquid mixtures", *Chemical Engineering Science*, 27(9): pp. 1687-1697, (1972).
- [29] Jungnickel, H., Wassilew, P., Kraus, W., "Investigations on the heat transfer of boiling binary refrigerant mixtures", *International Journal of Refrigeration*, 3(3): pp. 129-133, (1980).
- [30] Schlunder, E. U. "Heat transfer in nucleate boiling of mixtures", in *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc, (1986).
- [31] Ünal, H., "Prediction of nucleate pool boiling heat transfer coefficients for binary mixtures", *International journal of heat and mass transfer*, 29(4): pp. 637-640, (1986).
- [32] Thome, J., Shakir, S., "A new correlation for nucleate pool boiling of aqueous mixtures", in *Heat transfer: Pittsburgh 1987*, (1987).
- [33] Fujita, Y., Tsutsui, M., "Convective flow boiling of binary mixtures in a vertical tube in convective Flow Boiling", Taylor & Francis, Washington, (1996).
- [34] Rao, G. V., Balakrishnan, A., "Heat transfer in nucleate pool boiling of multicomponent mixtures", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(1): pp. 87-103, (2004).

- [35] Alavi, F. S., Seyf, K. A., Jami, A. M., "Pool boiling heat transfer in water/amines solutions", (2008).
- [36] Fazel, S. A. A., "A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer on horizontal rod heaters at isolated bubble regime", *Heat and Mass Transfer*, 53(9): pp. 2731-2744, (2017).
- [37] Kovalev, S. A., Solov'ev, S. L., "Model of heat-transfer in the boiling of liquid at a porous surface", *Teplofizika vysokikh temperatur*, 22(6): pp. 1166-1171, (1984).
- [38] Ivey, H., "Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(8): pp. 1023-1040, (1967).
- [39] Chen, X., Qiu, H., "Bubble dynamics and heat transfer on a wettability patterned surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88: pp. 544-551, (2015).
- [40] Khoshechin, M., Salimi, F., Jahangiri, A., "The influence of surface roughness and solution concentration on pool boiling process in Diethanolamine aqueous solution", *Heat and Mass Transfer*, 54(10): pp. 2963-2973, (2018).
- [41] Pezo, M., Stevanovic, V., "Numerical prediction of critical heat flux in pool boiling with the two-fluid model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16): pp. 3296-3303, (2011).
- [42] Pezo, M. L., Stevanovic, V. D., "Numerical prediction of nucleate pool boiling heat transfer coefficient under high heat fluxes", *Thermal Science*, 20: pp. S113-S123, (2016).
- [43] Godinez, J. C., Fadda, D., Lee, J., You, S. M., "Development of a stable Boehmite layer on aluminum surfaces for improved pool boiling heat transfer in water", *Applied Thermal Engineering*, 156: pp. 541-549, (2019).