نشریه مباحث برگزیده در انرژی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی جوشش استخری محلول دوجزئی آب و اتانول

گوهرشاد حسینی[1*]، سید علی علوی فاضل [2]، سمانه بورد[3]

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، باشگاه پژوهشگران جوان ونخبگان، ماهشهر، ایران

۲- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی،ماهشهر، ایران

۳- کارشناسی ارشد ، مهندسی شیمی ، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی،ماهشهر، ایران

چکیده

در این پژوهش، ضریب انتقال حرارت جوشش استخری در ناحیه جوشش هسته ای برای سیالاتی نظیر آب خالص، اتانول خالص و محلول آب- اتانول روی یک گرمکن استوانه‌ای افقی از جنس فولاد ضد زنگ در فشار اتمسفر مورد بررسی قرار گرفت. مجموعه آزمایشات در غلظت های متفاوت و در شار حرارتی ۵ تا ۱۰۳ کیلو وات بر مترمربع انجام شده است. نتایج نشان می دهدکه ضریب انتقال حرارت با افزایش شار حرارتی برای آب خالص و اتانول خالص و نیز محلولی حاصل از ترکیب این دو مایع افزایش می یابد. ضریب انتقال حرارت در محلول- به‌استثنای غلظت مولی ۰/۰۴ اتانول- کم‌تر از مقدار آن در اجزای خالص در همان شار حرارتی است. هم‌چنین ضریب انتقال حرارت در غلظت مولی آزئوتروپ با خطای حدود ۶ درصد، تقریباً با ضریب انتقال حرارت ایده‌آل برابر می‌باشد. در نهایت بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مدلی جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت محلول آب و اتانول با خطایی حدود ۱۳ درصد ارائه گردید.

کلیدواژگان: جوشش استخری هسته‌ای ، ضریب انتقال حرارت، محلول آب و اتانول، مدل‌سازی

Experimental investigation on pool boiling heat transfer in binary mixture of Water and Ethanol

Goharshad hosseini[1*], Ali Alavi fazel [2] ,Samaneh Bovard[3]

1-Young Researchers Club, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

2-Department of chemical engineering, college of chemistry and chemical engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

3- Department of chemical engineering, college of chemistry and chemical engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Abstract

In this study, heat transfer coefficient and the bubble diameter during pool boiling of pure water, pure ethanol and water-ethanol solutions on a horizontal tube in an atmospheric pressure is examined. Experiments are accomplished for different mole fraction of ethanol in water and in heat flux of 5-103$\frac{kW}{m^2}$ .The results reveal that heat transfer coefficient increases by increasing heat flux for pure water and pure ethanol and the combination of these two liquids. The heat transfer coefficient in the solution except for ethanol molar concentration of 0.04 is less than those in single component substances at the same heat flux. Also the heat transfer coefficient for azeotrope molar concentration y an error about 6% is almost equal to ideal heat transfer coefficient. Finally, the results are analyzed by Genetic Algorithm and a new model is presented to calculate the heat transfer coefficient of the water-ethanol solution.

Keywords: Nucleate pool boiling, Heat transfer coefficient, Water/Ethanol solution, Modelling

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

۱- مقدمه

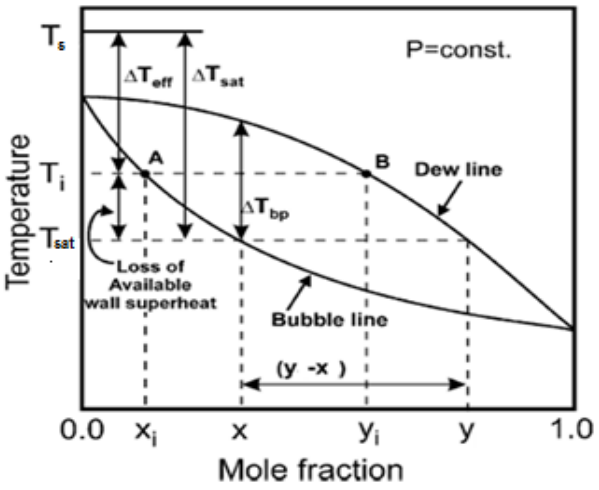
جوشش استخری هسته‌ای به تشکیل بخار در مواضع هسته زایی مورد نظر بر روی یک سطح گرم غوطه‌ور در مایع در دمایی بالاتر از دمای اشباع مایع اطلاق می‌شود [۱].

فرآیند جوشش به‌عنوان فرآیندی کاربردی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی ازجمله مواد شیمیایی، تبرید، تقطیر، تولید برق، تهویه هوا، خنک‌کننده راکتورهای هسته‌ای و بسیاری از فرآیندهای صنعتی دیگر جهت انتقال بارهای حرارتی سنگین استفاده می‌شود.[۲-۶]. ساخت، طراحی و بهینه‌سازی این واحدهای صنعتی به‌خصوص بویلرهای صنعتی نیازمند پیش بینی علمی ضریب انتقال حرارت جوششی بین سطح گرم شونده و مایع در حال جوشش می‌باشد. در همین راستا، دانشمندان و محققان بسیاری با انجام آزمایش‌های متعدد و با ارائه‌ی مدل‌های مختلف، سعی در بهبود و پیشبرد این موضوع داشته اند. با توجه به این‌که پدیده جوشش طیف وسیعی از مایعات و مخلوط‌ها را در برمی‌گیرد، بنابراین تخمین خواص همه‌ی این مخلوط‌ها و مایعات توسط یک مدل تجربی واحد تاکنون امری تقریباً ناممکن بوده است.

بنا بر بسیاری از مطالعات انجام‌شده، در اکثر موارد ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای محلول‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از ضریب انتقال حرارت جوشش مایعات خالص در شرایط آزمایشگاهی یکسان می‌باشد. ون ویجک و همکاران [۷] اولین پژوهشگرانی بودند که فرآیند انتقال جرم را در حین رشد حباب در جوشش محلول‌های دوجزئی توضیح داده اند. برای محلول‌های بدون نقطه‌ی آزئوتروپ[1]، غلظت جزء فرارتر در بخار، y ، بیش‌تر از غلظت همان جزء در فاز مایع، x ، می‌باشد. با رشد حباب، غلظت جزء فرارتر در لایه‌ی مایع در سطح مشترک کاهش می‌یابد. لذا یک گرادیان غلظت اطراف حباب در حال رشد شکل می‌گیرد. غلظت جزء فاز مایع در سطح مشترک از x به x_i کاهش‌یافته که نتیجه‌ی آن، افزایش محلی نقطه‌ی جوش اشباع از T_{Sat} به T_i می‌باشد. افزایش نقطه‌ی جوش اشباع محلی باعث کاهش سوپرهیت مؤثر جهت تبخیر به میزان $T_{Sat} - T_i$ می‌شود. این کاهش، سبب نرخ رشد حباب در محلول در مقایسه با جوشش مایعات خالص با همان خواص فیزیکی محلول می‌گردد. در شکل (۱) این کاهش سوپرهیت مشخص می‌باشد. در نقطه‌ی آزئوتروپ غلظت جزء فرارتر در فاز بخار و مایع در سطح مشترک یکسان است و نمودار x و y روی هم قرار می‌گیرند. به‌صورت کلی می‌توان عوامل زیر را دلایل کاهش ضریب انتقال حرارت محلول نسبت به اجزای خالص همان محلول در شرایط یکسان در نظر گرفت: [۹]کاهش نیروی رانش حرارتی حاصل از افزایش نقطه‌ی جوشش در میکرو لایه‌ی تبخیر به سبب تبخیر انتخابی جزء یا اجزای فرارتر در حین رشد حباب

- نفوذ جرمی جزء یا اجزای فرارتر تبخیر شده از حباب به میکرو لایه‌ی تبخیر
- تغییرات غیرخطی خواص فیزیکی مواد با تغییرات غلظت سازندگان
- اثرات مستقیم غلظت ترکیبات سازنده روی فرآیند هسته‌زایی و دینامیک حباب‌ها

بدیهی است ضریب انتقال حرارت در فرایند جوشش به‌طور مؤثری تابعی از دینامیک حباب‌ها می‌باشد. در روابط به‌دست‌آمده برای ÷محلول‌ها، اثر دینامیک حباب ازجمله قطر حباب، فرکانس و تعداد مواضع هسته‌زایی به‌صورت جدی بررسی نشده است.



شکل۱: نمودار تعادلی برای جوشش هسته‌ای مخلوط دوجزئی بدون آزئوتروپ [۸].

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

تعداد بسیاری از روابط ضریب انتقال حرارت در محلول‌ها به‌صورت رابطه‌ی عمومی (۱) می‌باشد

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \varphi\,(x, y, T, P, \left(\frac{q}{A}\right)^n, h_{fg}, D_{AB}, \rho, \mu, C_P, \dots) \qquad (1)$$

که در آن، φ تابع متغیرهای ترمودینامیکی، شار حرارتی و خواص فیزیکی و انتقالی سیستم می‌باشد. α_{id}، ضریب انتقال حرارت جوشش ایده‌آل می‌باشد که ضریب انتقال حرارت جوشش یک سیال خالص فرضی با خواص محلول با شرایط یکسان تعریف می‌شود و محاسبه‌ی آن به دو صورت انجام می‌شود: روش اصلی استفاده از قاعده‌ی اختلاط خطی، رابطه‌ی(۲)، می‌باشد که در آن α_i ، مبین ضریب انتقال حرارت جوشش اجزای خالص در همان شار حرارتی محلول می‌باشد. روش دیگر استفاده از روابط پیش بینی کننده‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش برای مایعات خالص، با همان خواص فیزیکی محلول می‌باشد[۱۰]. در جدول (۱) مهم‌ترین روابط جهت محاسبه‌ی انتقال حرارت مایعات خالص[۱۱-۱۷]. آورده شده است.

$$\frac{1}{\alpha_{id}} = \sum \frac{x_i}{\alpha_i} \qquad (2)$$

اولین رابطه‌ی پیش‌بینی کننده‌ی ضریب انتقال حرارت در جوشش محلول‌ها توسط پالن و سمال [۱۸]در سال ۱۹۶۴ ارائه شده است. در این

[1] *Azeotrope*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

مدل، ضریب انتقال حرارت تابعی از درجه حرارت فرض شده است و تابعیت آن به‌صورت تابع‌نمایی در نظر گرفته شده است. استفان و کورنر [۱۹]با استفاده از این ایده که حداکثر سوپرهیت دیواره در حداکثر اختلاف غلظت بین مایع و بخار جزء فرارتر، $|y-x|$، رخ می‌دهد رابطه‌ی خود را ارائه داده اند. کالوس و رایس [۲۰]، به‌صورت کمی کاهش ضریب انتقال حرارت را به کاهش نرخ رشد حباب نسبت داده اند و رابطه‌ای را پیشنهاد دادند. کالوس و لئونیدوپلوس [۲۱]، یک رابطه‌ی کاملاً تجربی جهت محاسبه‌ی سوپرهیت، بر اساس مدلی که سکریون [۲۲] و ونسترالن [۲۳] برای رشد حباب پیشنهاد داداند، ارائه کردند. شولیندر [۲۴]، رابطه‌ای نیمه تجربی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت برای جوشش محلول‌های دوجزئی بر مبنای تئوری فیلم در انتقال جرم ارائه داد. شولیندر فاکتوری به نام B_0 در رابطه‌اش معرفی کرد که مبین کسری از حرارت انتقال‌یافته توسط گرمای نهان تبخیر به کل حرارت انتقال‌یافته است. شولیندر این فاکتور را برابر واحد در نظر گرفت، به این معنا که همه‌ی انتقال حرارت از سطح گرمایی در جوشش هسته‌ای به شکل گرمای نهان عبور می‌کند. تومه [۲۵]، یک رابطه برای جوشش استخری محلول‌ها با استفاده از داده‌های تعادل فازی و بر مبنای افزایش محلی دمای اشباع ناشی از تبخیر انتخابی جزء فرارتر ارائه داد. وی نشان داد که کاهش سوپرهیت ناشی از فرایند انتقال جرم توسط ΔT_{bp} کنترل می‌شود. این رابطه از زمان ارائه تاکنون توسط محققان بسیاری برای محلول‌های متفاوت و شرایط مختلف اصلاح شد ازجمله ، اینویو و همکاران [۲۶-۲۷]، فوجیتا و تسوتسوی [۲۸] و علوی فاضل و همکاران [۲۹] یک فاکتور اصلاح بر مبنای شار حرارتی به دست آوردند. سان و همکاران [۳۰] فاکتور اصلاحی با توجه شار حرارتی ، فشار سیستم و غلظت محلول ارائه داده اند. همچنین جانگ و همکاران [۳۱] فاکتوری بدون بعد شامل شار حرارتی و خواص فیزیکی محلول ارائه داده اند. یونال [۳۲]، رابطه‌ای را بر اساس آنالیز ابعادی و در حضور داده-های آزمایشگاهی از شش مرجع [۲۱-۲۵ -۳۳- ۳۴- ۳۵-۳۶]شامل محلول‌های آبی و محلول‌های آلی ارائه داد. تومه و شکیر[1] [۳۷]، رابطه‌ی مبتنی بر این فرض که دمای جوش نزدیک سطح ثابت نیست ارائه داده اند. آن‌ها رابطه‌ی شولیندر را با اعمال دامنه‌ی نقطه‌ی جوشش اصلاح کردند تا تقریب بهتری از شیب دمای حباب به‌دست آورند. ویناياک رائو و بالاک ریشنان [۳۸]، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جوشش محلول‌های شامل استون، ایزوپروپانل، متیل اتیل کتون و آب، یک مدل جدید برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در محلول‌ها ارائه داده اند. در این مدل جدید، ضرایب نفوذ جرمی و حرارتی هم‌زمان دخالت می‌کنند .سرافراز[2][۳۹]رابطه‌ی اصلاح‌شده‌ای بر مبنای رابطه‌ی استفان و کورنر ارائه داد. علوی فاضل و محبوب پور [۴۰] با بررسی دینامیک حباب به صورت آزمایشگاهی مدلی نیمه تئوری ارائه داده اند. در جدول (۲) مدل‌های ذکر شده ارائه شده است. در این تحقیق جوشش استخری محلول آب و اتانول در غلظت‌های مختلف و اجزای خالص شان بر روی یک سطح استوانه‌ای در فشار اتمسفری مورد بررسی قرار گرفته است و رابطه‌ای آزمایشگاهی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جوششی ارائه گردید.

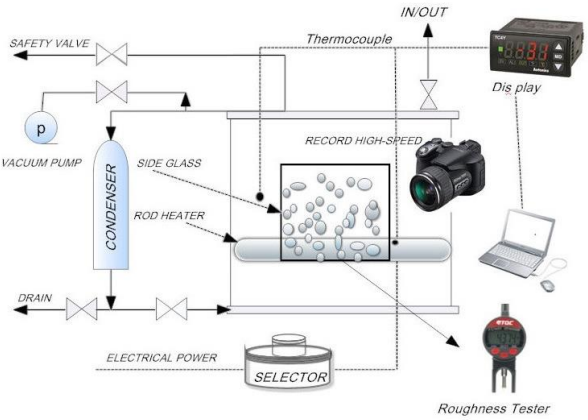
[1] *Thome and Shakir*
[2] *Sarafraz*

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- معرفی دستگاه آزمایش

در این مطالعه جهت جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌ها از دستگاه جوشش استخری(موسوم به گورنفلو[3]) استفاده شده است. این دستگاه دارای یک ظرف شیشه‌ای از جنس سکوریت با ابعاد مشخص می‌باشد که تمامی قسمت‌های آن به‌استثنای قسمتی که جهت مشاهده، عکس‌برداری و فیلم-برداری موردنیاز می‌باشد، عایق‌بندی شده است.

آزمایش‌ها بر روی یک هیتر استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ که به‌صورت افقی درون محفظه‌ی شیشه‌ای تعبیه‌شده است انجام می‌شود. در مرکز این میله‌ی استوانه‌ای گرمکن اصلی آزمایش قرار دارد که در نزدیکی نقطه جوش وارد عمل شده و پدیده جوشش استخری به کمک این گرمکن انجام می‌پذیرد. این گرمکن بصورت سری به منبع تغذیه(اتو ترانس) و آمپرسنج متصل می‌باشد. اتو ترانس، جریان برق عبوری از گرمکن را با اعمال ولتاژی بین ۲۱۰-۱۵ تأمین می‌سازد. در فاصله‌ی ۲ میلی‌متر از سطح میله، چهار سوراخ به طور متقارن ایجادشده است که محل تعبیه‌ی ترموکوپل‌ها می‌باشد. برای کاهش مقاومت تماس حرارتی میان ترموکوپل و سوراخ‌های روی گرمکن استوانه‌ای از خمیر سیلیکون استفاده می‌گردد. این ترموکوپل‌ها به نمایشگرهایی متصل می‌باشند که دما را نمایش می‌دهند. در هر لحظه میانگین حسابی دمای این چهار ترموکوپل پس از تصحیح، نشان‌دهنده دمای سطح استوانه می‌باشد همچنین یک کندانسور جهت بازگردانی بخارات ناشی از فرایند جوشش در بالای آن تعبیه شده است. به‌منظور اندازه‌گیری مقدار زبری سطح استوانه‌ای از زبری سنج مدل(TQC RNG/CTG2000) استفاده شده است. هم‌چنین به جهت ثبت داده‌های مربوط به دینامیک حباب از یک دوربین دیجیتال EX-FI مجهز به پردازشگر پرسرعت LSI و زوم اپتیکال ۱۲ برابر استفاده می شود. این دوربین قابلیت فیلم‌برداری ۱۲۰۰ فریم در ثانیه و قابلیت عکس‌برداری ۶۰ فریم در ثانیه را دارد. شماتیک کلی دستگاه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل۲: نمای کلی از دستگاه جوشش استخری مورداستفاده در این پژوهش

[3] *Gorenflo*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

جدول۱: مهم‌ترین مدل‌های موجود جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مایعات خالص

محقق	مدل
مک‌نلی [۱۱]	$\alpha = 0.225\left[\frac{qC_{Pl}}{Ah_{fg}}\right]^{0.69}\left[\frac{PK_l}{\sigma}\right]^{0.31}\left[\frac{\rho_l}{\rho_v}-1\right]^{0.33}$
مویستنسکی [۱۲]	$\alpha = 0.0047p_c{}^{0.69}(\frac{q}{A})^{0.7}\left[1.8\left(\frac{P}{P_c}\right)^{0.17}+4(\frac{P}{P_c})^{1.2}+10(\frac{P}{P_c})^{10}\right]$
کروژیلین [۱۳]	$\alpha = 0.082\left(\frac{K_l}{I^*}\right)\left[\frac{h_{fg}\left(\frac{q}{A}\right)}{gT_{sat}K_l}\left(\frac{\rho_v}{\rho_l-\rho_v}\right)\right]^{0.7}\left[\frac{T_{sat}C_{Pl}\sigma\rho_l}{h_{fg}{}^2\rho_v{}^2I^*}\right]^{0.33}Pr^{-.45}\qquad I^*=\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}\right]^{0.5}$
لابانتسوو [۱۴]	$\alpha = 0.075\left(1+10\left(\frac{\rho_v}{\rho_l-\rho_v}\right)^{0.67}\right)\left(\frac{k_l{}^2}{\sigma\vartheta_L T_{sat}}\right)^{0.33}(\frac{q}{A})^{0.67}$
استفان و عبدالسلام [۱۵]	$\alpha = 0.23\left(\frac{K_l}{D_b}\right)\left[\frac{qD_b}{AK_lT_{sat}}\right]^{0.674}\left[\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]^{0.297}\left[\frac{h_{fg}D_b{}^2}{\hat{\alpha}_l{}^2}\right]^{0.371}\left[\frac{\hat{\alpha}_l{}^2\rho_l}{\sigma D_b}\right]^{0.35}\left[\frac{(\rho_l-\rho_v)}{\rho_l}\right]^{-1.73}$ $D_b = 0.0146\phi\sqrt{\frac{2\sigma}{g\,(\rho_l-\rho_v)}}$
نیشیکاوا و همکاران [۱۶]	$\alpha = \frac{31.4P_c{}^{0.2}}{M_w{}^{0.1}T_c{}^{0.9}}(8R_p)^{0.2(1-P_r)}\frac{P_r{}^{0.23}\,(\frac{q}{A})^{0.8}}{(1-0.99P_r)^{0.9}}$
کوپر [۱۷]	$\alpha = 55P_r{}^{(0.12-0.443R_p)}(-log\,P_r)^{-0.55}\,M_w{}^{-0.5}\,(\frac{q}{A})^{0.67}$

جدول۲: مدل‌های موجود جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت محلول‌های دو جزیی

محقق	مدل
پالن و سمال [۱۸]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = exp(-0.027(T_{bo}-T_{bi}))$
استفان و کورنر[۱۹]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+A_\circ\lvert y_1-x_1\rvert(0.88+0.12P(bar))}$
کالوس و رایس[۲۰]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{\left[1+\lvert y_{m1}-x_{m1}\rvert\left(\frac{\hat{\alpha}_l}{D_{AB}}\right)^{0.5}\right]^{0.7}}$
کالوس و لئونیدوپلوس [۲۱]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+\left[(y_{m1}-x_{m1})(\frac{\hat{\alpha}_l}{D_{AB}})^{0.5}\,(\frac{dT}{dx_m})\frac{C_{pl}}{h_{fg}}\right]}$
شولیندر[۲۴]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+\frac{\alpha_{id}}{(\frac{q}{A})}(y_1-x_1)(T_{s2}-T_{s1})\left\{1-exp\left(\frac{-B_0(\frac{q}{A})}{\beta_l\rho_l h_{fg}}\right)\right\}}$
تومه [۲۵]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}}$
اینویو و ماند[۲۶]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}\left(0.45\times10^{-5}\left(\frac{q}{A}\right)+0.25\right)}$
اینویو و همکاران [۲۷]	$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}(1-0.75exp(-0.75\times10^{-5}(\frac{q}{A})))}$

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

فوجیتا و تسوتسوی [۲۸]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}\left(1-0.75exp\left[\left(\frac{-60\frac{q}{A}}{\rho_v h_{fg}}\right).\left(\frac{{\rho_v}^2}{\sigma g(\rho_l-\rho_v)}\right)^{\frac{1}{4}}\right]\right)}$$

علوی فاضل و همکاران[۲۹]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}\left(1-exp(-1.646\times10^{-6}\left(\frac{q}{A}\right)\right)}$$

سان و همکاران[۳۰]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{1+\left(\frac{1}{\Delta T_{id}}(y_1-x_1)^{-0.1}{\Delta T_{bp}}^{0.9}\left(\frac{P(Pa)}{10^5}\right)^{-0.04}\right)\left[1-0.85\,exp\left(-\frac{\left(\frac{q}{A}\right)}{3\times10^5)}\right)\right]}$$

جانگ و همکاران [۳۱]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{1+\frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}\ (y_1-x_1)^{-o.367}\ (\frac{\vartheta_l}{\widehat{\alpha}_l})^{0.640}\left(0.1\frac{\left(\frac{q}{A}\right)d_b}{T_s k_l}\right)^{(0.44{P_r}^{-0.0475})}}$$

یونال [۳۲]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{[1+(b_2+b_3)(1+b_4)][1+b_5]}$$

$$b_2=(1-x_1)ln\frac{1.01-x_1}{1.01-y_1}+x_1 ln\frac{x_1}{y_1}+|y_1-x_1|^{1.5}$$

$$if\ \ x_1=y_1=0\rightarrow\ \frac{x_1}{y_1}=1$$

$$b_3=0\ \ for\ x_1\geq0.1\ ;\ \ b_3=\left(\frac{y_1}{x_1}\right)^{0.1}-1\ \ for\ x_1<0.01$$

$$b_4=152{P_r}^{3.9};\ b_5=0.92|y_1-x_1|^{0.001}{P_r}^{0.66}$$

تومه و شکیر [۳۷]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=\frac{1}{1+\Delta T_{bp}\frac{\alpha_{id}}{(\frac{q}{A})}(1-exp(\frac{-B_0(\frac{q}{A})}{\beta_l\rho_l h_{fg}}))}$$

وینایاک رائو و بالاک ریشنان [۳۸]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}}=1-\sum_{i=1}^{n-1}\left(|y_i-x_i|\sqrt{\frac{(\overline{D})^{\frac{1}{n-1}}}{\widehat{\alpha}_{mix}}}\right)^{0.5}$$

سرافراز [۳۹]

$$\alpha=(\frac{{\alpha_{id}}^{0.5}}{1.09987+1.5(1-x)})^{2.041}$$

علوی فاضل و محبوب پور [۴۰]

$$\alpha=\alpha_c+\left(2\sqrt{\pi K_l\rho_l C_{pl}f}-\alpha_c\right)\left(\frac{N}{A}\right)(\frac{\pi{d_b}^2}{4})$$

۳-۲- شرح آزمایش

در ابتدا آب خالص، اتانول خالص و محلول آب و اتانول در غلظت‌های مولی (بـر حسـب غلظـت اتـانول) ۰/۰۴۲، ۰/۰۸۶، ۰/۲۴، ۰/۴۷، ۰/۷۲ و ۰/۸۹ آماده می شوند. (خواص فیزیکی غلظت‌های محلول آمـاده‌شـده در جـدول (۳) آمده است). پس از آمـاده‌سـازی دسـتگاه و پـر کـردن مخـزن از مـایع موردنظر، المنت کمکی وارد مدار می‌شود تا سیال گـرم شـود. در نزدیکـی نقطه‌ی جوش، المنت اصلی وارد مدار و المنت کمکی از مـدار خـارج مـی-شود. با تنظیم رگلاتور مربوط به اتو ترانس، ابتدا ولتاژ ۲۴۰ را اعمال کـرده تا مایع موردنظر به نقطه‌ی جوش برسد و شروع بـه جوشـش نمایـد. دمـای بالک را کنترل نموده تا جایی که دما تغییر نکند. این دما بـه‌عنـوان دمـای اشباع مایع ثبت می‌شود. به کمک اتو تـرانس، ولتـاژ عبـوری از سیسـتم از ولتاژ ۲۱۰ ولت تا ۱۵ ولت به‌صورت کاهشی بافاصله‌ی ۱۵تـایی تغییـر داده می‌شود. آمپر عبوری حاصل از اعمال ولتاژ توسط مولتی‌متر خوانده و ثبـت می‌شود. در هر اعمال ولتاژ، پنج دقیقه مکث کرده تا شرایط انجام آزمـایش پایدار شود. سپس دمای ۴ ترموکوپل از نمایشگرها ثبت می‌شود. میـانگین چهار دمای ثبت‌شده پس از اصلاح با استفاده از قانون هـدایت یـک بعـدی به‌عنوان دمای سـطح در نظـر گرفتـه مـی‌شـود. در هـر ولتـاژ، یـک فـیلم

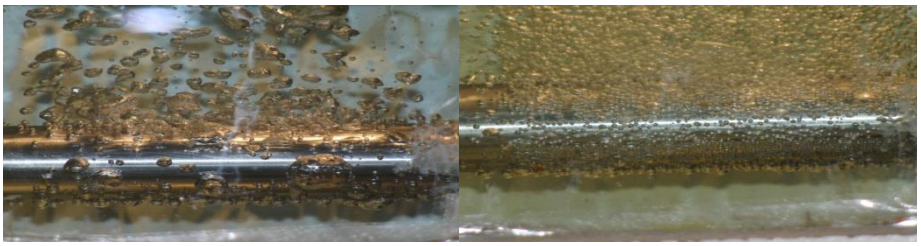
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

یک‌ثانیه‌ای با کیفیت ۱۲۰۰ فریم در ثانیه وحداقل پنج عکس با دوربین پیشرفته‌ای که توضیح داده شد، گرفته می‌شود. این مراحل برای تمامی غلظت‌ها تکرار می‌شود. در نهایت با به‌کارگیری قانون سرمایش نیوتن (رابطه‌ی ۳) ضریب انتقال حرارت محاسبه می‌شود. در شکل (۳) دو نمونه از عکس های گرفته شده نشان داده شده است.

$$q'' = \alpha(T_s - T_{sat}) \quad (۳)$$

جدول۳: خواص فیزیکی محلول آب و اتانول در دمای اشباع و فشار یک اتمسفر

غلظت مولی (بر حسب غلظت مولی اتانول)	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۲۴	۰/۴۶	۰/۷۲	۰/۸۹	۱/۰۰
دمای اشباع °C	۱۰۰	۹۲/۳۰	۸۷/۵۰	۸۲/۵۱	۸۰/۰۲	۷۸/۵۱	۷۸/۱۵	۷۸/۳۴
کشش سطحی $(\frac{N}{m})$	۰/۰۵۶	۰/۰۳۸۸۱۳	۰/۰۳۲۵۴۹	۰/۰۲۴۳۶۳	۰/۰۲۰۳۲۲	۰/۰۱۸۵۱۷	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۷۵
ویسکوزیته $(Pa.s)$	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۳۸۲	۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۰۰۰۴۳۰	۰/۰۰۰۴۴۰
دانسیته مایع $(\frac{kg}{m^3})$	۹۵۸/۲۰	۹۵۳	۹۴۶	۹۱۰	۸۵۸	۸۰۱	۷۶۰	۷۳۴/۷
دانسیته بخار $(\frac{kg}{m^3})$	۰/۵۸۸	۰/۶۴۰	۰/۶۹۰	۰/۸۴۰	۱/۰۸۳	۱/۳۲	۱/۴۹۵	۱/۵۹۷
ضریب هدایتی $(\frac{W}{m.K})$	۰/۶۷۷	۰/۵۸۹	۰/۵۱۶	۰/۳۵۴	۰/۲۴۲	۰/۱۹۲	۰/۱۷۵	۰/۱۵۵
گرمای نهان تبخیر $(\frac{j}{kg})$	۲۲۵۷۰۰۰	۲۱۳۸۸۳۱	۲۰۷۶۸۵۹	۱۹۵۹۷۸۹	۱۸۱۸۱۱۲	۱۶۵۴۷۸۰	۱۵۲۰۶۱۰	۸۴۸۴۰۰
ظرفیت حرارتی $(\frac{j}{kg.K})$	۴۲۱۹	۴۰۹۲	۴۰۲۹	۳۷۷۵	۳۵۳۱	۳۳۴۲	۳۲۹۲	۲۹۴۱
ضریب نفوذ $(\frac{m^2}{s})$	.....	۶/۹۰×۱۰^{۹}	۷/۱۰×۱۰^{۹}	۷/۳۰×۱۰^{۹}	۷/۵۵×۱۰^{۹}	۸/۲۲×۱۰^{۹}	۸/۹۳×۱۰^{۹}	.....



آب خالص در شار حرارتی $\frac{W}{m^2}$ ۲۶۹۸۷ — اتانول خالص در شار حرارتی $\frac{W}{m^2}$ ۲۶۹۸۷

شکل۳: تصاویری از عکس های ثبت شده در حین فرآیند جوشش

۳-۳- تحلیل خطا

در این مطالعه از تجهیزاتی نظیر ولت‌متر، آمپرمتر و میلی ولت‌متر استفاده شده است که میزان خطای آن به ترتیب به مقدار۱± ولت ، ۰/۱± آمپر و ۰/۰۱± میلی ولت می باشند. همچنین میزان خطا در اندازه‌گیری دما به مقدار۰/۲ ± کلوین تخمین زده می‌شود. بیشترین میزان خطای در هر شار حرارتی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

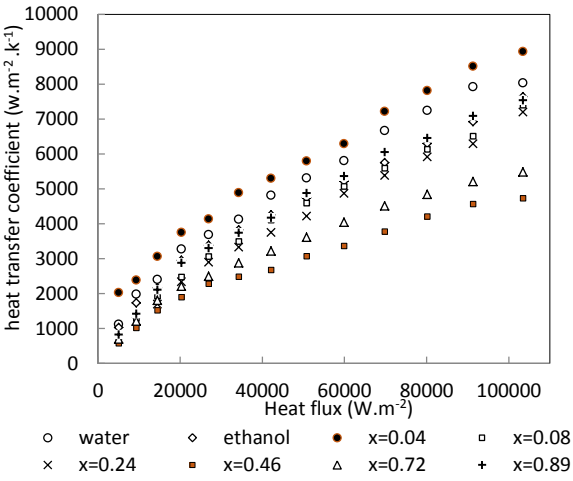
$$\frac{\Delta\left(\frac{q}{A}\right)}{\Delta\left(\frac{q}{A}\right)_{best\ value}} = \left(\frac{\Delta I}{I}\right) + \left(\frac{\Delta V}{V}\right) = \left(\frac{0.1}{1.1}\right) + \left(\frac{1}{50}\right) \cong 0.11 \quad (۴)$$

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

۴- نتایج آزمایشگاهی

جوشش محلول آب و اتانول در غلظت‌های مولی (بر حسب غلظت اتانول) ۰/۰۴۲، ۰/۰۸۶، ۰/۲۴، ۰/۴۷، ۰/۷۲ و ۰/۸۹ و اجزای خالص مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی بررسی شد.

نتایج در نمودار (۱) نشان داده‌شده است.



نمودار ۱: تغییرات ضریب انتقال حرارت محلول آب و اتانول با شار حرارتی در غلظت‌های مختلف

در توضیح نمودار(۱) می‌توان گفت: که در تمامی غلظت‌های محلول و اجزای خالص در محدوده‌ی موردبررسی، با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت آب خالص از اتانول خالص بیش‌تر می‌باشد. شاید علت آن را باید در خواص فیزیکی متفاوت آن‌ها در حین فرآیند جوشش جستجو کرد؛ اما از آنجا که جوشش تابعی پیچیده از گستره‌ی وسیعی از خواص فیزیکی می‌باشد، توجیه این مسئله با بررسی یک خاصیت فیزیکی به‌صورت مجزا امکان‌پذیر نمی‌باشد.

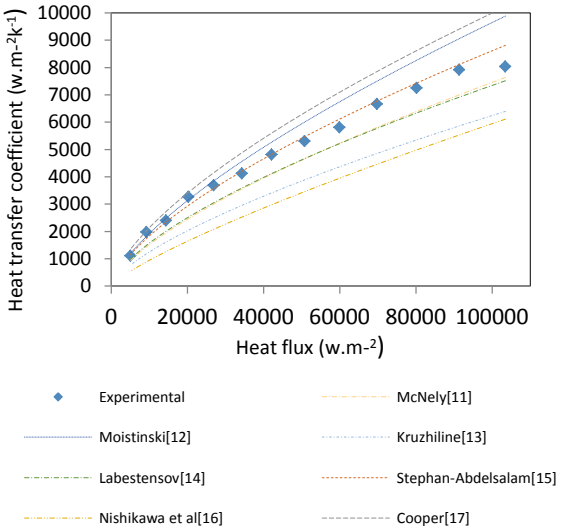
همان‌طور که مشخص است هیچ ترتیب خاصی برای غلظت‌های موردبررسی روی نمودار وجود ندارد. طبق مطالعات گذشته اگر حباب تمام سطح انتقال حرارت را بپوشاند، می‌توان گفت با کاهش اختلاف غلظت مولی فاز مایع و بخار جزء فرارتر، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. زمانی تمام سطح از حباب پوشانده می‌شود که شار حرارتی بسیار بالا باشد که این شرط در محدوده‌ی شار حرارتی موردبررسی وجود ندارد.

مطالعات تئوری و تجربی مختلف گویای آن است که در اکثر موارد، ضریب انتقال حرارت محلول کم‌تر از مقدار آن برای اجزای خالص همان محلول در شار حرارتی یکسان می‌باشد. عمده‌ترین علت آن را تبخیر انتخابی جزء فرارتر در محلول که موجب گرادیان معکوس غلظت و نهایتاً انتقال جرم معکوس می‌گردد دانسته‌اند [20-21] و [24-28]. به‌این‌علت که انتقال جرم معکوس، مقداری از حرارت را صرف خود می‌کند؛ اما مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد مقدار ضریب انتقال حرارت در غلظت مولی خیلی پایین اتانول، ۰/۰۴۲، از ضریب انتقال حرارت اجزای خالص و به‌تبع از ضریب انتقال حرارت ایده‌آل بیشتر می‌باشد. مشابه این مورد برای جوشش محلول آب/منو اتیلن گلیکول در فشار اتمسفر بر روی سطح یک گرمگن استوانه‌ای شکل توسط علوی فاضل و محبوب پور[۴۰] مشاهده شد. طبق آزمایش‌های این محققان مشخص شد ضریب انتقال حرارت در محدوده‌ی غلظت مولی ۰/۹۲۵-۰/۹۹۷ منو اتیلن گلیکول، از ضریب انتقال حرارت ایده‌آل بیشتر می‌باشد.

نمودار شار حرارتی برحسب ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی آزئوتروپ یعنی غلظت مولی ۰/۸۹، نزدیک به نمودار اجزای خالص و تقریباً روی نمودار اتانول می‌باشد. علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نقطه‌ی آزئوتروپ غلظت جزء فرارتر در فاز بخار و لایه‌ی مایع در سطح مشترک یکسان می‌باشد، درنتیجه انتقال جرم معکوسی صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین می‌توان گفت جوشش در نقطه‌ی آزئوتروپ، حالت ایده‌آل را ازنظر ضریب انتقال حرارت از خود نشان می‌دهد و تقریباً مانند اجزای خالص رفتار می‌کند.

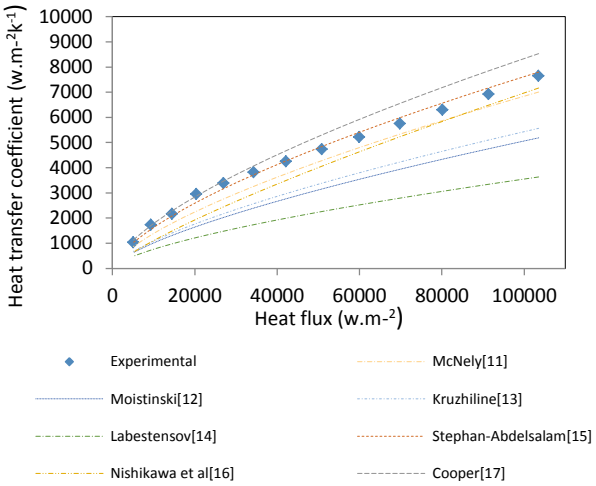
۴-۱ - مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت آب خالص و اتانول خالص با روابط موجود

ضریب انتقال حرارت به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص با روابط مک‌نلی [۱۱]، مویستنسکی [۱۲]، کروژیلین [۱۳]، لابانتسوو [۱۴]، استفان و عبدالسلام [۱۵]، نیشیکاوا و همکاران [۱۶] و کوپر [۱۷] مقایسه شد. نتیجه به‌صورت تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی در نمودار (۲) و (۳) مشاهده می‌شود. همچنین مقدار خطای روابط نسبت به داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص در جدول (۴) ارائه شده‌است.



نمودار ۲: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت آب خالص با روابط موجود

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]



نمودار۳: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت اتانول خالص با روابط موجود

در همه‌ی روابط با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افـزایش مـی-یابد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، خطای روابط برای آب خـالص و اتانول خالص باهم متفاوت مـی‌باشـند. رابطـه‌ی اسـتفان و عبدالسـلام بـا مقـدار خطـای حـدود ۴ درصـد، کـم‌تـرین مقـدار خطـا را بـا داده‌هـای آزمایشگاهی آب و اتانول خالص دارد. این رابطه یکی از دقیـق‌تـرین روابـط پیش بینی ضریب انتقال حرارت جوشش مایعات خالص می‌باشد. این رابطه با استفاده از رگرسیون چندگانه، با بهره‌گیری از حجم عظیمی از داده‌های آزمایشگاهی(بیش از ۵۰۰ داده) به‌دست آمده‌است.

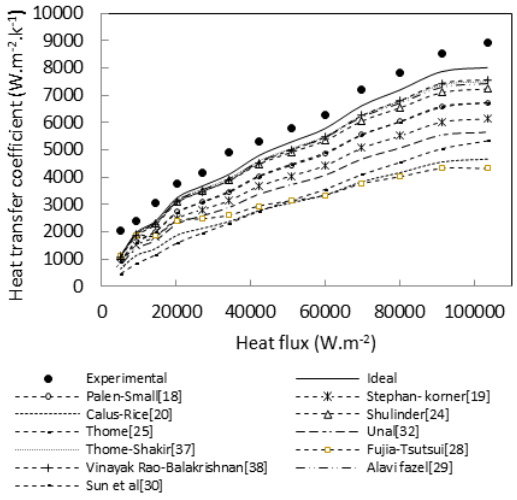
۴-۲ - مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حـرارت محلـول آب و اتانول با روابط موجود

ضریب انتقال حرارت به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی محلول آب و اتانول در غلظت‌های مولی اتانول ۰/۰۴۲، ۰/۰۸۶، ۰/۲۴، ۰/۴۶، ۰/۷۲ و ۰/۸۹ با روابط پالن و سمال [۱۸]، استفان و کورنر [۱۹]، کالوس و رایس [۲۰]، ، شولیندر [۲۴]، تومه [۲۵]، یونال [۳۲]، تومه و شکیر [۳۷]، فوجیتا و تسوتسوی [۲۸] وینایاک‌رائو و بالاک‌ریشنان [۳۸]، علوی فاضل و همکاران [۲۹]، سان و همکاران [۳۰]، مقایسه شد. نتایج به‌صورت نمودار (۴) تا نمودار (۹) نشان داده‌شده است. در توضیح می‌توان گفت: مقادیر ضریب انتقال حرارت به‌دست‌آمده از روابط، خود باهم تفاوت دارند. با توجه به این‌که پدیده جوشش طیف وسیعی از مایعات و مخلوط‌ها را در برمی-گیرد، بنابراین پیش بینی ضریب انتقال حرارت همه‌ی این مخلوط‌ها و مایعات، توسط یک مدل تجربی واحد تاکنون امری تقریباً ناممکن بوده است. اکثر روابط بر پایه‌ی خواص فیزیکی محلول مورد آزمایش به‌دست‌آمده است و یا فرضیات خاصی بر آن حاکم است که ممکن است این مدل‌ها تنها برای محلول‌هایی با ویژگی‌ها و یا شرایط خاص صدق نماید. با توجه به توضیحات، مشخص است که مقادیر به‌دست‌آمده از هر یک از روابط موجود نیز دارای میزان انحراف متفاوتی از داده‌های آزمایشگاهی باشند. مقدار خطای یک رابطه‌ی مشخص برای غلظت‌های مختلف نیز باهم متفاوت می‌باشند. در همه‌ی روابط همانند نتایج آزمایشگاهی با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد جز در رابطه‌ی فوجیتا و تسوتسوی [۲۸] که در غلظت‌های مولی ۰/۰۴، ۰/۰۸۰، ۰/۲۴ و ۰/۴۶ در شار حرارتی زیر ۲۰ $\frac{kW}{m^2}$ رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد.در نقطه‌ی آزئوتروپ، تمامی روابط، به‌استثنای رابطه‌ی فوجیتا و تسوتسوی [۲۸]خطای یکسانی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کنند. علت آن است که اکثر روابط گویای آن است که در نقطه‌ی آزئوتروپ مقدار ضریب انتقال حرارت با مقدار ضریب انتقال حرارت ایده‌آل یکسان می‌باشد و آزمایش‌های انجام‌شده، نیز تقریباً با خطای حدود ۶ درصد همین نتیجه را نشان می‌دهد. مقادیر خطای روابط نسبت به داده-های آزمایشگاهی در هر غلظت در جدول (۵) مشاهده می‌شود. بیش‌ترین میزان خطا را رابطه‌ی فوجیتا [۲۸] با خطای حدود ۴۰ درصد و کم‌ترین میزان خطا را رابطه‌های استفان و کورنر و با خطای حدود ۲۲ درصد نسبت داده شده است

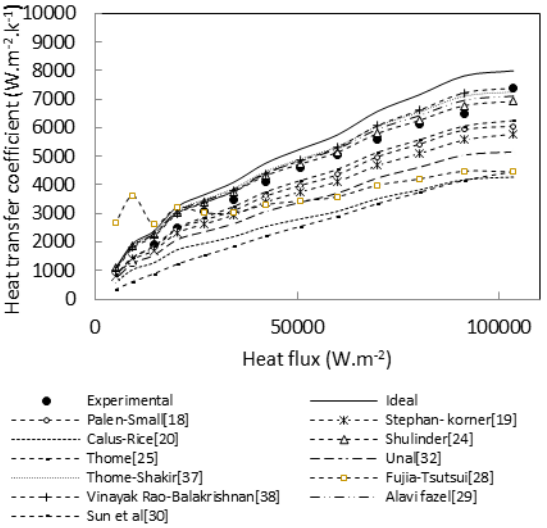
جدول۴: درصد خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص

	مک‌نلی [۱۱]	مویستنسکی [۱۲]	کروژیلین [۱۳]	لابانتسوو [۱۴]	استفان و عبدالسلام [۱۵]	نیشیکاوا و همکاران [۱۶]	کوپر [۱۷]
آب	۱۸/۲۵	۱۰/۲۳	۴۲/۲۶	۱۶/۹۶	۴/۳۷	۶۷/۹۰	۱۴/۰۰
اتانول	۱۶/۱۱	۵۸/۰۴	۴۷/۰۰	۱۱۷/۰۶	۴/۸۹	۲۹/۰۰	۹/۰۱

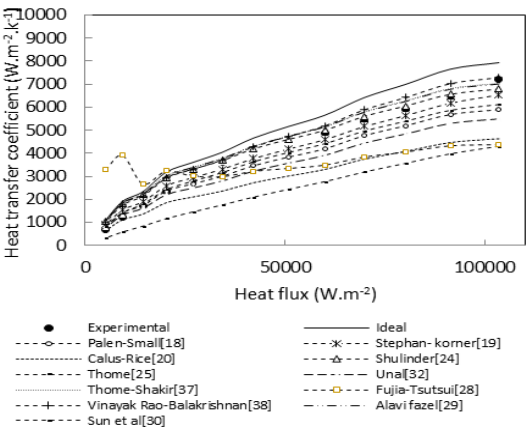
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]



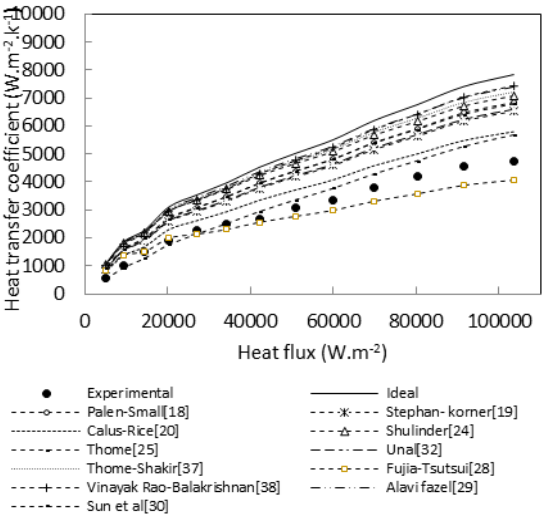
نمودار۴: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۰۴ محلول آب و اتانول با روابط موجود



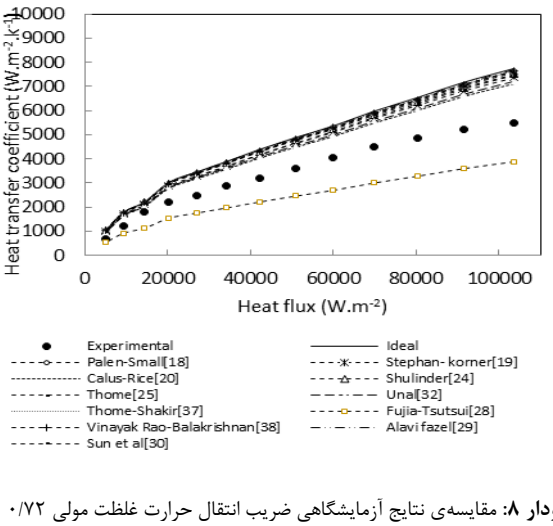
نمودار ۵: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۰۸ محلول آب و اتانول با روابط موجود



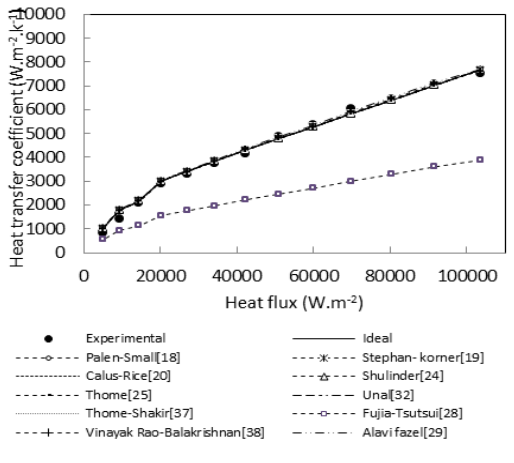
نمودار۶: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت ۰/۲۴ محلول آب و اتانول با روابط موجود



نمودار ۷: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۴۶ محلول آب و اتانول با روابط موجود



نمودار ۸: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۷۲ محلول آب و اتانول با روابط موجود



[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

نمودار ۹: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۸۹ محلول آب و اتانول با روابط موجود

جدول۵: درصد خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی محلول آب و اتانول

غلظت مولی(بر حسب غلظت اتانول)	۰/۰۴۲	۰/۰۸۶	۰/۲۴	۰/۴۶	۰/۷۲	۰/۸۹	خطای کلی
پالن و سمال[۱۸]	۲۸/۰۶	۱۱/۰۱	۱۰/۴۸	۴۶/۱۴	۳۵/۳۹	۵/۹۲	۲۴/۵۱
استفان وکورنر[۱۹]	۳۴/۳۹	۱۴/۴۱	۱۱/۱۱	۳۷/۴۸	۳۰/۴۹	۵/۹۲	۲۲/۲۹
کالوس و رایس[۲۰]	۵۰/۴۱	۳۴/۳۰	۲۵/۰۸	۲۲/۰۴	۲۶/۰۶	۵/۹۲	۲۷/۳۰
شولیندر[۲۴]	۱۹/۸۹	۱۳//۳۸	۱۷/۳۵	۵۴/۵۸	۳۴/۳۴	۵/۹۲	۲۴/۲۴
تومه[۲۵]	۵۱/۶۳	۴۵/۸۵	۴۵/۲۴	۱۱/۰۱	۲۹/۴۸	۵/۹۲	۳۱/۵۲
یونال[۳۲]	۳۹/۵۸	۲۰/۷۳	۱۳/۹۴	۳۸/۸۸	۲۷/۷۶	۵/۹۲	۲۴/۴۷
تومه و شکیر[۳۷]	۱۶/۵۰	۱۷/۷۸	۲۱/۶۰	۵۹/۹۳	۳۶/۶۹	۵/۹۲	۲۶/۴۰
فوجیتا و تسوتسوی[۲۸]	۴۳/۳۸	۴۳/۶۰	۶۸/۸۶	۱۴/۲۳	۳۰/۳۹	۴۷/۷۴	۴۳/۴۰
وینایاک رائو و بالاکریشنان[۳۸]	۱۸/۹۱	۱۳/۵۴	۱۷/۷۳	۵۶/۶۰	۳۵/۲۴	۵/۹۲	۲۴/۶۶
سان و همکاران[۳۰]	۸/۱۹	۸/۵۴	۲۸/۱۸	۴۳/۰۸	۳۴/۴۳	.....	۲۴/۴۵
علوی فاضل و همکاران[۲۹]	۱۸/۳۴	۱۵/۱۱	۱۹/۶۲	۵۹/۳۸	۳۶/۷۵	۵/۹۲	۲۵/۸۵

۵- مدل‌سازی

۵-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها، از آن به‌عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه‌ی آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده‌شده در تکامل طبیعی اختراع شده‌است. قانون تکامل طبیعی[۱] بدین‌صورت است که تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آن‌هایی که این خصوصیات را نداشته باشند به‌تدریج و در طی زمان از بین می‌روند [۴۱].

الگوریتم ژنتیک به‌طور موثّری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند، راه‌حل‌های بالقوه‌ی یک مسئله را در قالب کروموزوم‌های ساده‌ای کد می‌کند و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها اعمال می‌کند تا حل‌های جدید و بهبودیافته را ایجاد کند [۴۲].

در این پژوهش، با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مدلی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت محلول دو جزئی آب و اتانول ارائه شده است.

۵-۲- مدل پیشنهادی جدید

اساس تخمین و محاسبه مدل تجربی، داده های آزمایشگاهی است که در این مطالعه، بانک اطلاعاتی بالغ بر ۱۲۰ داده‌ی آزمایشگاهی در شرایط قید شده در مقاله گردآوری شده است. این بانک اطلاعاتی ما را قادر به ارائه مدل تجربی جهت تخمین ضریب انتقال حرارت در محلول های دو جزئی می‌سازد. می دانیم که ضریب انتقال حرارت تابعی از خواص فیزیکی سیال و نیز خواص بین سطحی سیال و هیتر می باشد.

$$Y = f\{\rho_L, \rho_V, C_P, h_{fg}, \sigma, \dots\} \quad (۴)$$

در ابتدا با استفاده از تکنیک الگوریتم ژنتیک بر اساس بانک اطلاعاتی داده های آزمایشگاهی جمع آوری شده، میزان اثرگذاری هر پارامتر به صورت توان ارزش گذاری می شود، که اقدامی موثر و حائز اهمیت در بی بعد سازی پارامتر های موثر در تخمین ضریب انتقال حرارت در محلول های دو جزئی می باشد. سپس با استفاده از تئوری باکینگهام[۲] پارامترهای موثر بی بعد سازی می شوند. جهت تخمین دقیق توان اعداد بدون بعد، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جوشش استخری محلول آب و اتانول در غلظت‌های مختلف و نیز الگوریتم ژنتیک که بدین منظور کد نویسی شده است، استفاده می شود. در نهایت رابطه ذیل جهت تخمین ضریب انتقال حرارت در محلول های دو جزئی ارائه می‌گردد.

$$Nu = \frac{\alpha I^*}{K_l} = (Le^{-1})^{0.281} We^{0.302} Me^{0.130} \quad (۵)$$

در این رابطه، Le عدد بدون بعدلوئیس[۳] می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی میزان نفوذ حرارتی نسبت به نفوذ مولکولی می‌باشد.

$$Le = \frac{\hat{\alpha}_l}{D_{AB}} \quad (۶)$$

We عدد بدون بعد وبر است که در دینامیک سیالات، نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی شناخته می‌شود و در مواردی که جسم بسیار بزرگ است این عدد بسیار کوچک و قابل‌چشم‌پوشی است.

$$We = \frac{\rho_l u^2 I^*}{\sigma} \quad (۷)$$

در این رابطه I^* شاخص طول می‌باشد که محققان بسیاری ازآن‌جهت محاسبه‌ی شاخص طول استفاده کرده‌اند . u نیزسرعت می‌باشد و به‌صورت رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود.

$$I^* = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}\right]^{0.5} \quad (۸)$$

$$u = \frac{(\frac{q}{A})}{h_{fg}\rho_v} \quad (۹)$$

[1] Natural Selection

[2] *Buckingham*

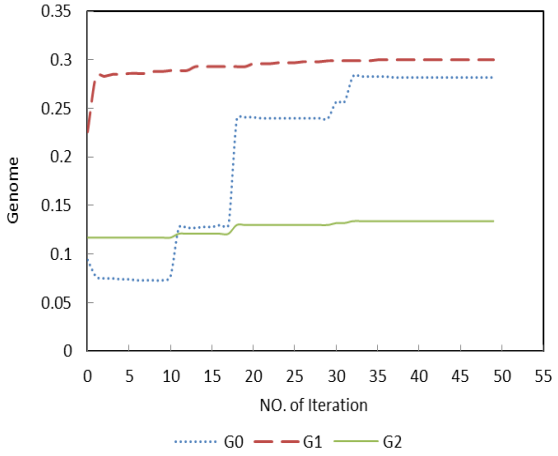
[3] *Lewis*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

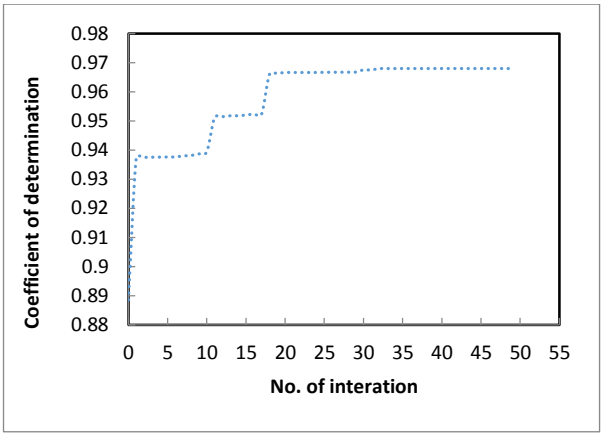
Me یک عدد بدون بعد به‌دست‌آمده از تئوری باکینگهام می‌باشد که از رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید.

$$Me = \frac{h_{fg} l^{*2}}{\hat{a}_l^{\,2}} \qquad (۱۰)$$

روند محاسبه‌ی توان های مجهول مدل که خروجی برنامه‌ی نوشته‌شده با الگوریتم ژنتیک می باشند در نمودار(۱۰) نشان داده شده است. تعداد دفعات تکرار[1]، ژنوم[2] یا همان مقدار توان‌های تابع در تکرارهای مختلف می‌باشد.همچنین روند بهبود ضریب همبستگی مدل پس از جایگذاری توان‌های به دست آمده در مدل و سپس حل آن، به‌صورت نمودار(۱۱) به دست آمده است.



نمودار ۱۰: نمایشی از خروجی برنامه کد نویسی شده مدل ارائه شده



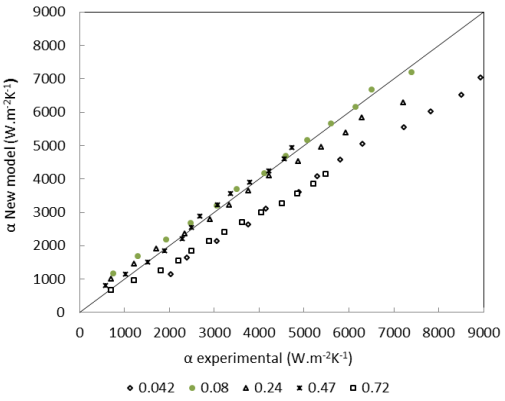
نمودار ۱۱:روند بهبود ضریب همبستگی مدل ارائه شده

نمودار (۱۲) مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت محلول با رابطه‌ی جدید را نشان می‌دهد. داده‌های آزمایشگاهی با رابطه‌ی جدید خطایی حدود ۱۳ درصد ایجاد می‌کند. ازآنجاکه طبق مشاهدات آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی آزئوتروپ، خطای بسیار کمی حدود ۶ درصد را با ضریب انتقال حرارت ایده‌آل ایجاد می‌کند، لذا برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت در این غلظت، از رابطه‌ی ضریب انتقال حرارت ایده‌آل استفاده می‌شود و نیازی به مدل‌سازی نمی‌باشد. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، ضریب انتقال حرارت ایده‌آل از رابطه‌ی اختلاط خطی قابل محاسبه می‌باشد.

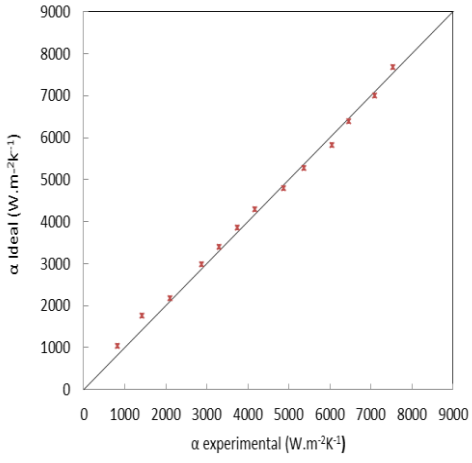
جدول۶: درصد خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی محلول آب و اتانول

غلظت مولی	۰/۰۴۲	۰/۰۸۶	۰/۲۴	۰/۴۶	۰/۷۲	خطای کلی
رابطه ی جدید	۱۴/۳۷	۱۵/۷۸	۱۷/۷۲	۶/۱۱	۸/۶۸	۱۲/۵۳

نمودار (۱۳) مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت آزئوتروپ با ضریب انتقال حرارت ایده‌آل را نشان می‌دهد. از آنجاکه رابطه‌ی استفان و عبدالسلام [۲۴]، با مقادیر ضریب انتقال حرارت آزمایشگاهی آب خالص و هم‌چنین اتانول خالص خطای بسیار کمی– حدود ۴ درصد– ایجاد می‌کند، در صورت نداشتن مقادیر آزمایشگاهی اجزای خالص،این رابطه جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت ایده‌آل پیشنهاد می‌شود.



نمودار ۱۲: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت با رابطه‌ی جدید



نمودار ۱۳: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت نقطه‌ی آزئوتروپ با ضریب انتقال حرارت ایده آل (رابطه‌ی۲)

[1] Iteration
[2] Genome

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

۶- نتیجه‌گیری

با مطالعه‌ی آزمایشگاهی جوشش استخری محلول آب و اتانول و اجزای خالص در فشار اتمسفری بر روی هیتر افقی از جنس فولاد ضدزنگ، در گستره‌ی شار حرارتی $\frac{kW}{m^2}$ ۵ الی ۱۰۳نتایج ذیل به دست آمده‌است:

۱- با افزایش شار حرارتی در محلول آب و اتانول و اجزای خالص، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۲- ضریب انتقال حرارت محلول آب و اتانول - جز در غلظت مولی خیلی پایین ۰/۰۴ اتانول - کم‌تر از مقدار آن برای اجزای خالص در شار حرارتی یکسان می‌باشد.

۳- ضریب انتقال حرارت آب خالص، از مقدار آن برای اتانول خالص در شار حرارتی یکسان بزرگ‌تر می‌باشد.

۴- ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی آزئوتروپ (با خطای حدود ۶ درصد) تقریباً برابر با ضریب انتقال حرارت ایده‌آل می‌باشد.

۵- تغییرات ضریب انتقال حرارت به‌صورت تابعی از غلظت، در جوشش محلول آب و اتانول، از روند کاملاً مشخصی تبعیت نمی‌کند.

۶- رابطه‌ی استفان و عبدالسلام [۱۵] با مقدار خطای حدود ۴ درصد، برای اجزای خالص آب و اتانول و رابطه استفان و کورنر [۱۹] و با خطای حدود ۲۲ درصد، برای محلول آب واتانول، کم‌ترین خطا را با داده‌های آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت نشان می‌دهند.

۷- با استفاده از الگوریتم ژنتیک و داده‌های موجود، رابطه‌ای جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت محلول دوجزئی ارائه شده است که خطایی در حدود ۱۳ درصد با داده‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کند.

فهرست علائم و اختصارات

حروف لاتین

مساحت	m^2	A
عدد ارشمیدس	...	Ar
عدد جوش	...	B_o
ظرفیت حرارتی	$\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{kg}.\mathrm{K}}$	C_P
قطر	M	D
ضریب نفوذ	$\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$	D_{AB}
شتاب گرانش	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	g
آنتالپی	$\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{kg}}$	h
گرمای نهان تبخیر	$\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{kg}}$	h_{fg}
عدد ژاکوب	...	ja
ضریب هدایتی	$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}.\mathrm{K}}$	K
عدد لوییس	...	Le
جرم	Kg	M
جرم مولکولی	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kmol}}$	M_w
فشار	Pa	P
عدد پرانتل	...	Pr
شار حرارتی	$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$	q''
آهنگ حرارتی	W	q
شعاع	m	r
ثابت جهانی گازها	$\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{mol}.\mathrm{K}}$	R
زبری	μm	R_p
آنتروپی	$\frac{\mathrm{j}}{\mathrm{K}}$	S
دما	K	T
حجم	m^3	v
حجم مولی	$\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kmol}}$	V
کسر مولی مایع	...	x
کسر مولی بخار	...	y
ضریب تراکم‌پذیری	...	Z

حروف یونانی

ضریب انتقال حرارت	$\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{m}^2.\mathrm{k}}$	α
ضریب پخشندگی	$\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$	$\hat{\alpha}$
کشش سطحی	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	σ
ضریب انتقال جرم	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	β_l
ویسکوزیته سینماتیکی	$\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$	ϑ
ویسکوزیته دینامیکی	Pa.s	μ
دانسیته	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	ρ
ضریب فعالیت	...	γ
ضریب بی مرکزی، کسر جرمی	...	ω
زاویه تماس	...	ϕ
تفاضل	...	Δ

زیرنویس‌ها

میانگین	avg
آزئوتروپ	az
جوش	b
اختلاف نقطه‌ی شبنم و حباب	bp
بحرانی	c

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

مازاد	e
ایده آل	id
جزء فرارتر	i
جزء غیر فرارتر	j
مایع	l
مخلوط	Mix
نرمال	n
کاهش‌یافته	r
سطح	s
اشباع	sat
بخار	v

۷- منابع

[1] R.J. Benjamin, A.R. Balakrishnan, Nucleate boiling heat transfer of binary mixtures at low to moderate heat fluxes, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 365-375, 1999.

[2] Ch. Zhao, M.Q. Gong , L. Ding, X. Zou, G.F. Chen, J.F. Wu, An experimental investigation on the entire pool boiling curve of R14 under 0.1 MPa pressure, *international journal of refrigeration*, Vol. 41, pp. 164-170, 2014.

[3] K. G. Rajulu, R. Kumar , B. Mohanty, H. K. Varma, Enhancement of nucleate pool boiling heat transfer coefficient by reentrant cavity surfaces, Heat and Mass Transfer , Vol. 41, pp. 127–132, 2004.

[4] Z. Nahra, E. Næss, Heat transfer in pool boiling of binary and ternary non-azeotropic mixtures, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 951-958, 2009.

[5] M. M. Sarafraz, F. Hormozi, S. M. Peyghambarzadeh, E. Salari, Experimental study on the influence of SO_2 gas injection to pure liquids on pool boiling heat transfer coefficients, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 747–757, 2014.

[6] Ch. D. Henry, J. Kim, A study of the effects of heater size, subcooling, and gravity level on pool boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 262–273, 2004.

[7] W. R. Van Wijk, A. S. Vos, J.D. Van Stralen, Heat transfer to boiling binary liquid mixtures, *Chemical Engineering Science*, Vol. 5, pp. 68–80, 1956.

[8] D. Jung, K. Song, K. Ahn, J. Kim, Nucleate boiling heat transfer coefficients of mixtures containing HFC32, HFC125 and HFC134a, *Refrigeration*, Vol. 26, pp. 764–771, 2003.

[9] B. Quing, *Heat transfer and CHF nucleate boiling of binary mixture*, Ph.D. thesis, Engineering Kyushu University, Fukuoka ,1995.

[10] S. M. Bajorek, *An experimental investigation of multicomponent pool boiling on smooth and finned surface*, Ph.D. Theses, Michigan State University, Michigan State, 1988.

[11] M.J. McNelly, A Correlation of rates of heat transfer to nucleate boiling of liquids, *Imperial Chemical Engineering Society*, Vol. 7, pp. 18–34, 1953.

[12] I. L. Mostinski, Application of the rule of corresponding states for calculation of heat transfer and critical heat flux, *Teploenergetik*, Vol. 10(4), pp. 66-71, 1963.

[13] Kruzhilin, B., Heat Transfer and Hydraulic Resistance during Condensation of Steam in a Horizontal Tube and in a Bundle of Tubes, *Heat and Mass Tansfer,* Vol. 10, pp. 361-734, 1967.

[14] Labuntsov, D. A., Heat Transfer Problems with Nucleate Boiling of Liquids, *Thermal Engineering*, Vol. 19, pp. 21-28, 1972.

[15] K. Stephan, M. Abdelsalam, Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 73-87, 1980.

[16] K. Nishikawa, Y. Fujita, H. Ohta, S., Hidaka, Effects of system pressure and surface roughness on nucleate boiling heat transfer, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol. 42(2), PP 95–111, 1982.

[17] M.G. Cooper, Saturation Nucleate Pool Boiling a Simple Correlation, *IChemESym posium Series*, Vol. 86, pp. 786-793, 1984.

[18] J.W. Palen, W. Small, A New Way to Design Kettle and Internal Reboiler, *Hydrocarbon Processing*, Vol 43(11), pp. 199-208, 1964.

[19] K. Stephan, M. Korner, Calculation of heat transfer in evaporating binary liquid mixtures, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 41(7), pp. 409–417, 1969.

[20] Calus, W.F., Rice, P., Pool boiling-binary liquid mixtures, *Chemical Engineering Science*, Vol. 27, pp. 1687-1697, 1972.

[21] W.F. Calus, D., Leonidopoulos, Pool boiling binary Liquid Mixture, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 17, 249-255, 1974.

[22] L.E. Scriven, On the Dynamics of Phase Growth, *Chemical Engineering Science*, Vol. 10, pp. 1-13, 1959.

[23] Van Stralen, S. J. D., Bubble growth rates in boiling binary mixtures, *Chemical Engineering* , Vol. 12(3), pp. 390-394, 1967.

[24]E. U. Schlunder, Heat transferin nucleat boiling of mixture, *Chemical Engineering*, Vol. 23(4), pp. 589-599, 1983.

[25] J. R. Thome, Prediction of binary mixture boiling heat transfer coefficients using only phase equilibrium data, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 965–974, 1983.

[26] T. Inoue, M. Monde, "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Binary Mixtures, *Thermo and Fluid Dynamics* , Vol. 29,171-180, 1994.

[27] T. Inoue, N. Kawae, M. Monde, Characteristics of heat transfer coefficient during nucleate pool boiling of binary mixtures, Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp. 337–344, 1998.

[28] Y. Fujita, M. Tsutsui, Predictive methods of heat transfer coefficient and critical heat flux in mixture boiling, *Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 2, pp. 831-841, 1997.

[29] S. A. Alavi Fazel, A. A. Safekordi, M. Jamialahmadi, boiling heat transfer in water/Amines solutions, *IJE Transactions*, Vol. 21(2), pp. 113-131, 2008.

[30] Z. Sun, M. Gong, Zh. Li, J. Wu, Nucleate pool boiling heat transfer coefficients of Pure HFC134a, HC290, HC600 and their

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]

binary and ternary mixtures, *J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 94-104, 2007.

[31] D. Jung, K. Song, K. Ahn, J. Kim, Nucleate boiling heat transfer coefficients of mixtures containing HFC32, HFC125, and HFC134a, *International Journal of Refrigeration* , Vol. 26, pp. 764–771, 2003.

[32] H.C. Unal, Prediction of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Coefficients for Binary Mixtures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 637-640, 1986.

[33] M. Korner, *Beitrag zum Wlrmeilbergang bei der Blasenverdampfimg binlrer Gemische*, Ph.D. thesis, Technical University of Aachen, 1967.

[34] K. Stephan, P. Preusser, Heat transfer and critical heat flux in pool boiling of binary and ternary mixtures, *Ger. Chem. E Nana*, Vol. 2, pp. 161-169, 1979.

[35] V. N. Filatkin, Boiling heat transfer to water-ammonia mixtures. In *Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Two-Phase Media*, edited by S. S. Kutateladze, pp. 131-136. Pergamon Press, Oxford , 1969.

[36] K. Bier, J. Schmadl and D. Gorenflo, Pool boiling heat transfer to mixtures of SF, and CF,Br at elevated saturation pressures. In *Heat Transfer 1982*, edited by U. Grigull et al., Vol. 4, pp. 35-40. Hemisphere, Washington, DC, 1982.

[37] J. R. Thome, S. Shakir, A new correlation for nucleate pool boiling of aqueous mixtures, *AIChE Symp. Ser.* , Vol. 83(257), pp. 46–51, 1987.

[38] G. Vinayak Rao, A. R. Balakrishnan, Heat transfer in nucleate pool boiling of multicomponent mixtures, J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, pp. 87–103, 2004.

[39] M. M. Sarafraz, Nucleate pool boiling of aqueous solution of citric acid on a smoothed horizontal cylinder, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 611–619, 2012.

[40] S. A. Alavi Fazel, M. Mahboobpour, Pool boiling heat transfer in monoethyleneglycol aqueous solutions, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 48, pp. 177–183, 2013.

[41] M. Esfahlan, M., The use of evolutionary algorithms to analyze the problem and microwave antennas, Tehran University, pp. 14-34, 1386.

[42] Z. Razzaghi, Study of genetic algorithm for solving bioinformatics, Tehran University, pp. 21-47, 1383

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-11]