



## مطالعه‌ی آزمایشگاهی جوشش استخری محلول دوجزئی آب و اتانول

گوهرشاد حسینی<sup>۱\*</sup>، سید علی علوی فاضل<sup>۲</sup>، سمانه بورد<sup>۳</sup>

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 هسته‌ای 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 غلظت‌های متفاوت و در شار حرارتی ۵ تا ۱۰۳ کیلو وات بر مترمربع انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت با افزایش شار حرارتی برای آب خالص و اتانول خالص و نیز محلولی حاصل از ترکیب این دو مایع افزایش می‌یابد. 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 آزوتروپ 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<sup>1\*</sup>, Ali Alavi fazel<sup>2</sup>, Samaneh Bovard<sup>3</sup>

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

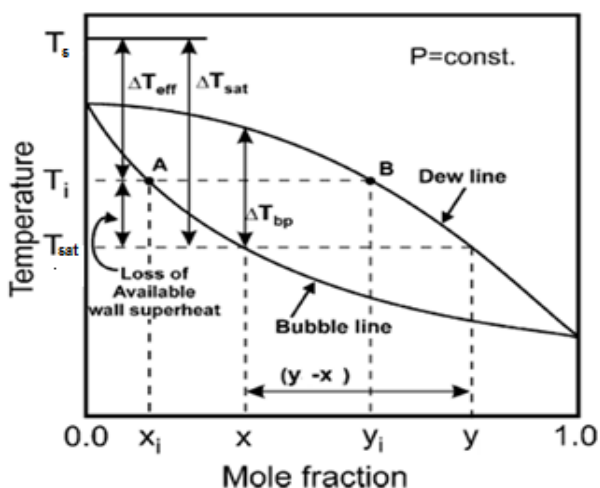
In this study, heat transfer coefficient and the bubble diameter during pool boiling of pure water, pure ethanol and water-ethanol solutions on a horizontal tube in an atmospheric pressure is examined. Experiments are accomplished for different mole fraction of ethanol in water and in heat flux of  $5-103 \frac{kW}{m^2}$ . 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

۱- مقدمه

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

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



شکل ۱: نمودار تعادلی برای جوشش هسته‌ای مخلوط دوجزئی بدون آزنوتروپ [۸].

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

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

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

که در آن،  $\varphi$  تابع متغیرهای ترمودینامیکی، شار حرارتی و خواص فیزیکی و انتقالی سیستم می‌باشد.  $\alpha_{id}$  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  $\alpha_i$ ، مبین ضریب انتقال حرارت جوشش اجزای خالص در همان شار حرارتی محلول می‌باشد. روش دیگر استفاده از روابط پیش‌بینی 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.

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

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

فرآیند جوشش به‌عنوان فرآیندی کاربردی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی از جمله 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 پیش‌بینی 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 داشته‌اند. 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 ویچک و همکاران [۷] اولین پژوهشگرانی بودند که فرآیند انتقال جرم را در حین رشد حباب در جوشش محلول‌های دوجزئی توضیح داده‌اند. برای محلول‌های بدون نقطه‌ی آزنوتروپ، غلظت جزء فرارتر در بخار،  $\gamma$ ، 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  $X_i$  کاهش یافته 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 آزنوتروپ غلظت جزء فرارتر در فاز بخار و مایع در سطح مشترک یکسان است و نمودار  $X$  و لا 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

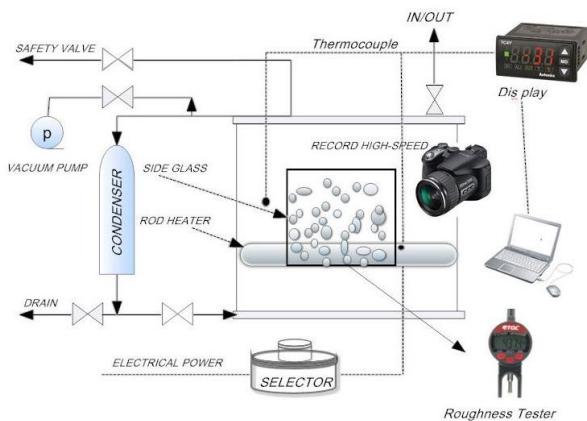
<sup>1</sup> Azeotrope

### ۳- روش آزمایشگاهی

#### ۳-۱- معرفی دستگاه آزمایش

در این مطالعه جهت جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌ها از دستگاه جوشش استخری (موسوم به گورنفلو<sup>۳</sup>) 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 فیلم‌برداری 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 ایجاد شده 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 می‌شود. 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.



شکل ۲: نمای کلی از دستگاه جوشش استخری مورد استفاده در این پژوهش

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 فراتر،  $|y - x|$  رخ می‌دهد رابطه‌ی خود را ارائه داده‌اند. کالوس و رایس [۲۰]، به‌صورت کمی کاهش ضریب انتقال حرارت را به کاهش نرخ رشد حباب نسبت داده‌اند و رابطه‌ی را پیشنهاد دادند. کالوس و لئونیدوپولوس [۲۱]، یک رابطه‌ی کاملاً تجربی جهت محاسبه‌ی سوپرهیت، بر اساس مدلی که سکریون [۲۲] و ونستران [۲۳] برای رشد حباب پیشنهاد دادند، ارائه کردند. شولیندر [۲۴]، رابطه‌ی 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 فراتر ارائه داد. وی نشان داد که کاهش سوپرهیت ناشی از فرایند انتقال جرم توسط  $\Delta T_{bp}$  کنترل می‌شود. این رابطه از زمان ارائه تاکنون توسط محققان بسیاری برای محلول‌های متفاوت و شرایط مختلف اصلاح شد از جمله، 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 داده‌اند. همچنین جانگ و همکاران [۳۱] فاکتوری بدون بعد شامل شار حرارتی و خواص فیزیکی محلول ارائه داده‌اند. یونال [۳۲]، رابطه‌ی را بر اساس آنالیز ابعادی و در حضور داده‌های آزمایشگاهی از شش مرجع [۲۱-۲۵، ۳۳-۳۴، ۳۵-۳۶] شامل محلول‌های آبی و محلول‌های آلی ارائه داد. تومه و شکی<sup>۱</sup> [۳۷]، رابطه‌ی مبتنی بر این فرض که دمای جوش نزدیک سطح ثابت نیست ارائه داده‌اند. آن‌ها رابطه‌ی شولیندر را با اعمال دامنه‌ی نقطه‌ی جوشش اصلاح کردند تا تقریب بهتری از شیب دمای حباب به‌دست آورند. وینایاک راتو و بلاک 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 داده‌اند. در این مدل جدید، ضرایب نفوذ جرمی و حرارتی هم‌زمان دخالت می‌کنند. سرافراز<sup>۲</sup> [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 داده‌اند. 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 رابطه‌ی آزمایشگاهی جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جوششی ارائه گردید.

<sup>1</sup> Thome and Shakir

<sup>2</sup> Sarafraz

<sup>3</sup> Gorenflo

جدول ۱: مهم‌ترین مدل‌های موجود جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت مایعات خالص

مدل	محقق
$\alpha = 0.225 \left[ \frac{q C_{pl}}{A h_{fg}} \right]^{0.69} \left[ \frac{P K_l}{\sigma} \right]^{0.31} \left[ \frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right]^{0.33}$	مکنلی [۱۱]
$\alpha = 0.0047 p_c^{0.69} \left( \frac{q}{A} \right)^{0.7} \left[ 1.8 \left( \frac{P}{P_c} \right)^{0.17} + 4 \left( \frac{P}{P_c} \right)^{1.2} + 10 \left( \frac{P}{P_c} \right)^{10} \right]$	مویستنسکی [۱۲]
$\alpha = 0.082 \left( \frac{K_l}{I^*} \right) \left[ \frac{h_{fg} \left( \frac{q}{A} \right) \left( \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right)}{g T_{sat} K_l} \right]^{0.7} \left[ \frac{T_{sat} C_{pl} \sigma \rho_l}{h_{fg}^2 \rho_v^2 I^*} \right]^{0.33} P_r^{-0.45} \quad I^* = \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5}$	کروزیلین [۱۳]
$\alpha = 0.075 \left( 1 + 10 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right)^{0.67} \right) \left( \frac{k_l^2}{\sigma \vartheta_L T_{sat}} \right)^{0.33} \left( \frac{q}{A} \right)^{0.67}$	لابانتسوو [۱۴]
$\alpha = 0.23 \left( \frac{K_l}{D_b} \right) \left[ \frac{q D_b}{A K_l T_{sat}} \right]^{0.674} \left[ \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{0.297} \left[ \frac{h_{fg} D_b^2}{\hat{\alpha}_l^2} \right]^{0.371} \left[ \frac{\hat{\alpha}_l^2 \rho_l}{\sigma D_b} \right]^{0.35} \left[ \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l} \right]^{-1.73}$	استفان و عبدالسلام [۱۵]
$D_b = 0.0146 \phi \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$	
$\alpha = \frac{31.4 P_c^{0.2}}{M_w^{0.1} T_c^{0.9}} (8 R_p)^{0.2(1-P_r)} \frac{P_r^{0.23} \left( \frac{q}{A} \right)^{0.8}}{(1 - 0.99 P_r)^{0.9}}$	نیشیکاوا و همکاران [۱۶]
$\alpha = 55 P_r^{(0.12 - 0.443 R_p)} (-\log P_r)^{-0.55} M_w^{-0.5} \left( \frac{q}{A} \right)^{0.67}$	کوپر [۱۷]

جدول ۲: مدل‌های موجود جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت محلول‌های دو جزئی

مدل	محقق
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \exp(-0.027(T_{bo} - T_{bi}))$	پالن و سمال [۱۸]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + A_s  y_1 - x_1  (0.88 + 0.12 P(\text{bar}))}$	استفان و کورنر [۱۹]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{\left[ 1 +  y_{m1} - x_{m1}  \left( \frac{\hat{\alpha}_l}{D_{AB}} \right)^{0.5} \right]^{0.7}}$	کالوس و رایس [۲۰]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \left[ (y_{m1} - x_{m1}) \left( \frac{\hat{\alpha}_l}{D_{AB}} \right)^{0.5} \left( \frac{dT}{dx_m} \right) \frac{C_{pl}}{h_{fg}} \right]}$	کالوس و لئونیدوپولوس [۲۱]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{q}{A} \right) (y_1 - x_1) (T_{s2} - T_{s1}) \left\{ 1 - \exp \left( \frac{-B_0 \left( \frac{q}{A} \right)}{\beta_l \rho_l h_{fg}} \right) \right\}}$	شولیندر [۲۴]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}}}$	تومه [۲۵]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} \left( 0.45 \times 10^{-5} \left( \frac{q}{A} \right) + 0.25 \right)}$	اینویو و ماند [۲۶]
$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} \left( 1 - 0.75 \exp(-0.75 \times 10^{-5} \left( \frac{q}{A} \right)) \right)}$	اینویو و همکاران [۲۷]

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

فوجیتا و تسوتسوی [۲۸]

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} (1 - \exp(-1.646 \times 10^{-6} \left(\frac{q}{A}\right))}$$

علوی فاضل و همکاران [۲۹]

سان و همکاران [۳۰]

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

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T_{bp}}{\Delta T_{id}} (y_1 - x_1)^{-0.367} \left(\frac{\theta_l}{\hat{\alpha}_l}\right)^{0.640} \left(0.1 \left(\frac{q}{A}\right) \frac{d_b}{T_s k_l}\right)^{(0.44 P_r^{-0.0475})}}$$

جانگ و همکاران [۳۱]

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

یونال [۳۲]

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

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

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

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

$$\frac{\alpha}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1 + \Delta T_{bp} \frac{\alpha_{id}}{\left(\frac{q}{A}\right)} (1 - \exp\left(\frac{-B_0 \left(\frac{q}{A}\right)}{\beta_l \rho_l h_{fg}}\right))^{0.5}}$$

تومه و شکیر [۳۷]

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

وینایاک رائو و بالاک ریشنان

[۳۸]

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

سرافراز [۳۹]

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

علوی فاضل و محبوب پور

[۴۰]

تا مایع موردنظر به نقطه‌ی جوش برسد و شروع به جوشش نماید. دمای بالک را کنترل نموده تا جایی که دما تغییر نکند. این دما به‌عنوان دمای اشباع مایع ثبت می‌شود. به کمک اتو ترانس، ولتاژ عبوری از سیستم از ولتاژ ۲۱۰ ولت تا ۱۵ ولت به‌صورت کاهشی بافاصله‌ی ۱۵ ثانیه‌ی تغییر داده می‌شود. آمپر عبوری حاصل از اعمال ولتاژ توسط مولتی‌متر خوانده و ثبت می‌شود. در هر اعمال ولتاژ، پنج دقیقه مکث کرده تا شرایط انجام آزمایش پایدار شود. سپس دمای ۴ ترموکوپل از نمایشگرها ثبت می‌شود. میانگین چهار دمای ثبت‌شده پس از اصلاح با استفاده از قانون هدایت یک بعدی به‌عنوان دمای سطح در نظر گرفته می‌شود. در هر ولتاژ، یک فیلم

### ۳-۲- شرح آزمایش

در ابتدا آب خالص، اتانول خالص و محلول آب و اتانول در غلظت‌های مولی (بر حسب غلظت اتانول) ۰/۰۴۲، ۰/۰۸۶، ۰/۲۴، ۰/۴۷، ۰/۷۲ و ۰/۸۹ آماده می‌شوند. (خواص فیزیکی غلظت‌های محلول آماده‌شده در جدول (۳) آمده است). پس از آماده‌سازی دستگاه و پر کردن مخزن از مایع موردنظر، المنت کمکی وارد مدار می‌شود تا سیال گرم شود. در نزدیکی نقطه‌ی جوش، المنت اصلی وارد مدار و المنت کمکی از مدار خارج می‌شود. با تنظیم رگلاتور مربوط به اتو ترانس، ابتدا ولتاژ ۲۴۰ را اعمال کرده

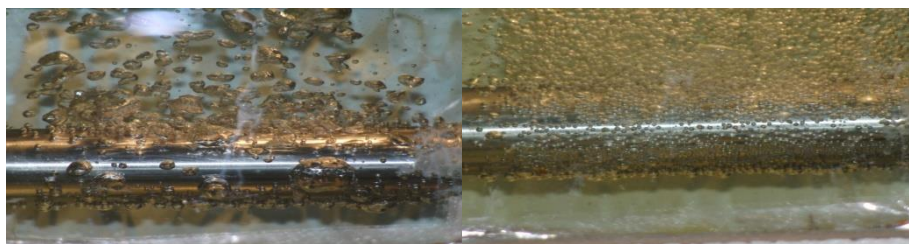
(رابطه‌ی ۳) ضریب انتقال حرارت محاسبه می‌شود. در شکل (۳) دو نمونه از عکس‌های گرفته شده نشان داده شده است.  

$$q'' = \alpha(T_s - T_{sat}) \quad (3)$$

یک ثانیه‌ای با کیفیت ۱۲۰۰ فریم در ثانیه و حداقل 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

جدول ۳: خواص فیزیکی محلول آب و اتانول در دمای اشباع و فشار یک اتمسفر

۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۷۲	۰/۴۶	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۰	غلظت مولی (بر حسب غلظت مولی اتانول)
۷۸/۳۴	۷۸/۱۵	۷۸/۵۱	۸۰/۰۲	۸۲/۵۱	۸۷/۵۰	۹۲/۳۰	۱۰۰	دمای اشباع °C
۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۸۵۱۷	۰/۰۲۰۳۲۲	۰/۰۲۴۳۶۳	۰/۰۳۲۵۴۹	۰/۰۳۸۸۱۳	۰/۰۵۶	کشش سطحی $(\frac{N}{m})$
۰/۰۰۰۴۴۰	۰/۰۰۰۴۳۰	۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۰۰۰۳۸۲	۰/۰۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۲۸	ویسکوزیته (Pa.s)
۷۳۴/۷	۷۶۰	۸۰۱	۸۵۸	۹۱۰	۹۴۶	۹۵۳	۹۵۸/۲۰	دانسیته مایع $(\frac{kg}{m^3})$
۱/۵۹۷	۱/۴۹۵	۱/۳۲	۱/۰۸۳	۰/۸۴۰	۰/۶۹۰	۰/۶۴۰	۰/۵۸۸	دانسیته بخار $(\frac{kg}{m^3})$
۰/۱۵۵	۰/۱۷۵	۰/۱۹۲	۰/۲۴۲	۰/۳۵۴	۰/۵۱۶	۰/۵۸۹	۰/۶۷۷	ضریب هدایتی $(\frac{W}{m.K})$
۸۴۸۴۰۰	۱۵۲۰۶۱۰	۱۶۵۴۷۸۰	۱۸۱۸۱۱۲	۱۹۵۹۷۸۹	۲۰۷۶۸۵۹	۲۱۳۸۸۳۱	۲۲۵۷۰۰۰	گرمای نهان تبخیر $(\frac{j}{kg})$
۲۹۴۱	۳۲۹۲	۳۳۴۲	۳۵۳۱	۳۷۷۵	۴۰۲۹	۴۰۹۲	۴۲۱۹	ظرفیت حرارتی $(\frac{j}{kg.K})$
.....	$۸/۹۳ \times 10^{-9}$	$۸/۲۲ \times 10^{-9}$	$۷/۵۵ \times 10^{-9}$	$۷/۳۰ \times 10^{-9}$	$۷/۱۰ \times 10^{-9}$	$۶/۹۰ \times 10^{-9}$	.....	ضریب نفوذ $(\frac{m^2}{s})$



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

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

شکل ۳: تصاویری از عکس‌های ثبت شده در حین فرآیند جوشش

مقدار  $\pm 0/2$  کلورین تخمین زده می‌شود. بیشترین میزان خطای در هر شار حرارتی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\Delta(\frac{q}{A})}{\Delta(\frac{q}{A})_{best\ value}} = \left(\frac{\Delta I}{I}\right) + \left(\frac{\Delta V}{V}\right) = \left(\frac{0.1}{1.1}\right) + \left(\frac{1}{50}\right) \cong 0.11 \quad (4)$$

### ۳-۳- تحلیل خطا

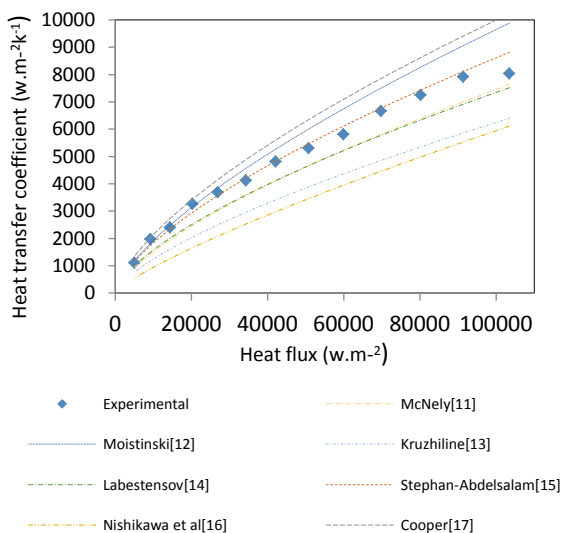
در این مطالعه از تجهیزاتی نظیر ولت‌متر، آمپر متر و میلی ولت‌متر استفاده شده است که میزان خطای آن به ترتیب به مقدار  $\pm 1$  ولت ،  $\pm 0/1$  آمپر و  $\pm 0/1$  میلی ولت می باشند. همچنین میزان خطا در اندازه‌گیری دما به

ضریب انتقال حرارت ایده آل 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 ۰/۹۹۷-۰/۹۲۵ منو اتیلن گلیکول، از ضریب انتقال حرارت ایده آل بیشتر می‌باشد.

نمودار شار حرارتی بر حسب ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی آزنوتروپ نمودار شار حرارتی بر حسب ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ی آزنوتروپ یعنی غلظت مولی ۰/۸۹، نزدیک به نمودار اجزای خالص و تقریباً روی نمودار اتانول می‌باشد. علت آن را می‌توان این گونه بیان کرد که در نقطه‌ی آزنوتروپ غلظت جزء فرارتر در فاز بخار و لایه‌ی مایع در سطح مشترک یکسان می‌باشد، در نتیجه انتقال جرم معکوسی صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین می‌توان گفت جوشش در نقطه‌ی آزنوتروپ، حالت ایده آل را از نظر 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 به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص با روابط مک‌نلی [۱۱]، موستنسکی [۱۲]، کروژیلین [۱۳]، لایانتسو [۱۴]، استفان و عبدالسلام [۱۵]، نیشیکاوا و همکاران [۱۶] و کوپر [۱۷] مقایسه شد. نتیجه به صورت 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 شده است.

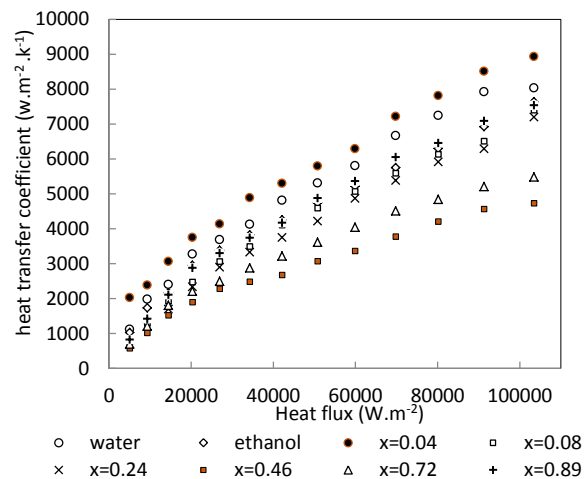


نمودار ۲: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت آب خالص با روابط موجود

#### 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 خالصشان مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی بررسی شد.

نتایج در نمودار (۱) نشان داده شده است.



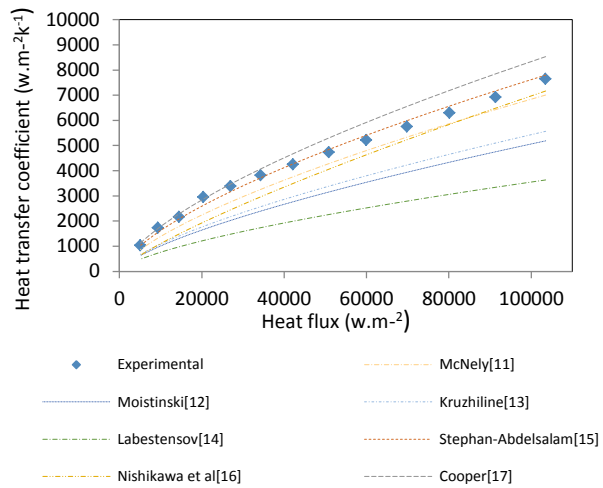
نمودار ۱: تغییرات ضریب انتقال حرارت محلول آب و اتانول با شار حرارتی در غلظت‌های مختلف

در توضیح نمودار (۱) می‌توان گفت: که در تمامی غلظت‌های محلول و اجزای خالص در محدوده‌ی مورد بررسی، 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 به صورت مجزا امکان‌پذیر نمی‌باشد.

همان‌طور که مشخص است هیچ ترتیب خاصی برای غلظت‌های مورد بررسی 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 مورد بررسی 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]. به این علت 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، ۰/۴۲، از ضریب انتقال حرارت اجزای خالص و به تبع از

[۲۰]، شولیندر [۲۴]، تومه [۲۵]، یونال [۳۲]، تومه و شکیب [۳۷]، فوجیتا و تسوتسوی [۲۸] وینایاکرائو و بلاک‌ریشن [۳۸]، علوی فاضل و همکاران [۲۹]، سان و همکاران [۳۰]، مقایسه شد. نتایج به صورت نمودار (۴) تا نمودار (۹) نشان داده شده است. در توضیح می‌توان گفت: مقادیر ضریب انتقال حرارت به دست آمده از روابط، خود باهم تفاوت دارند. با توجه به این‌که پدیده جوشش طیف وسیعی از مایعات و مخلوطها را در برمی‌گیرد، 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 به دست آمده 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 به دست آمده 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، ۰/۸۰، ۰/۲۴ و ۰/۴۶ در شار حرارتی زیر  $20 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$  رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. در نقطه‌ی آزنوتروپ، تمامی روابط، به استثنای 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 آزنوتروپ مقدار ضریب انتقال حرارت با مقدار ضریب انتقال حرارت ایده‌آل یکسان می‌باشد و آزمایش‌های انجام شده، نیز تقریباً با خطای حدود ۶ درصد همین نتیجه را نشان می‌دهد. مقادیر خطای روابط نسبت به داده‌های 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



نمودار ۳: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت اتانول خالص با روابط موجود

در همه‌ی روابط با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، خطای روابط برای آب خالص و اتانول خالص باهم متفاوت می‌باشند. رابطه‌ی استفان و عبدالسلام با مقدار خطای حدود ۴ درصد، کم‌ترین مقدار خطا را با داده‌های آزمایشگاهی آب و اتانول خالص دارد. این رابطه یکی از دقیق‌ترین روابط 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 ماده) به دست آمده است.

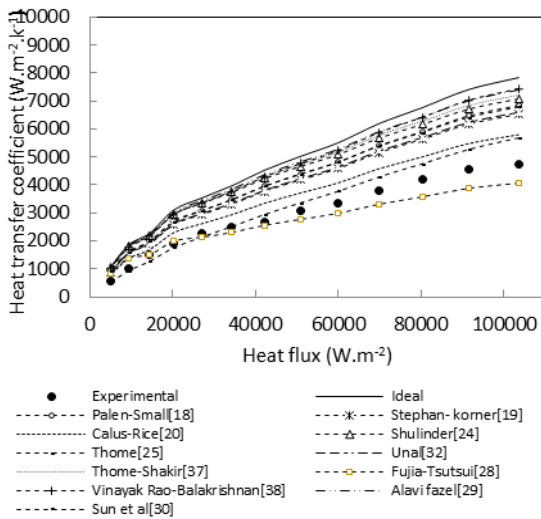
#### ۴-۲ - مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت محلول آب و اتانول با روابط موجود

ضریب انتقال حرارت به دست آمده 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 شمال [۱۸]، استفان و کورنر [۱۹]، کالوس و رایس

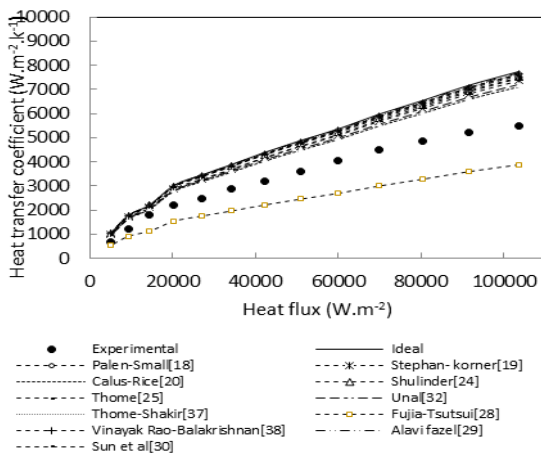
جدول ۴: درصد خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی آب خالص و اتانول خالص

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

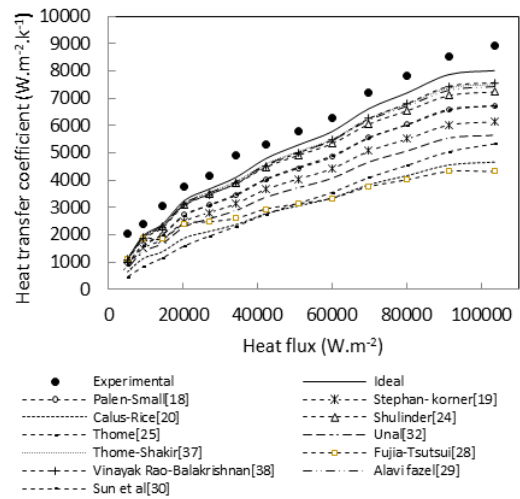
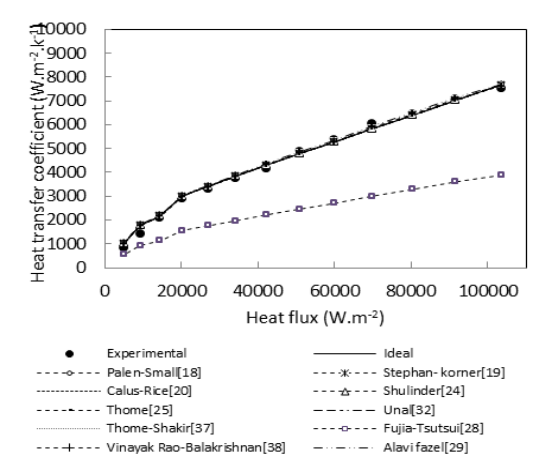
نمودار ۶: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت ۰/۲۴ محلول آب و اتانول با روابط موجود



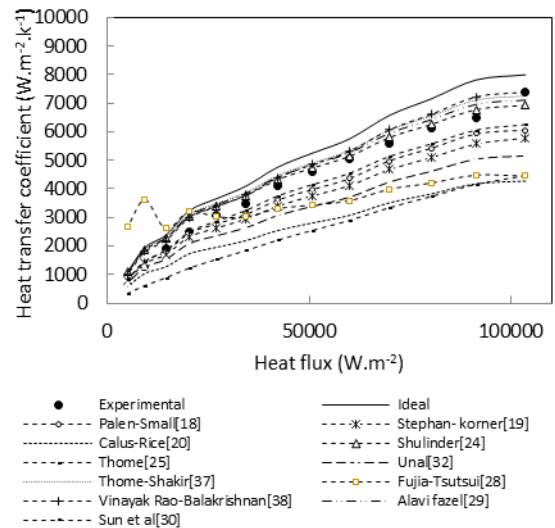
نمودار ۷: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۴۶ محلول آب و اتانول با روابط موجود



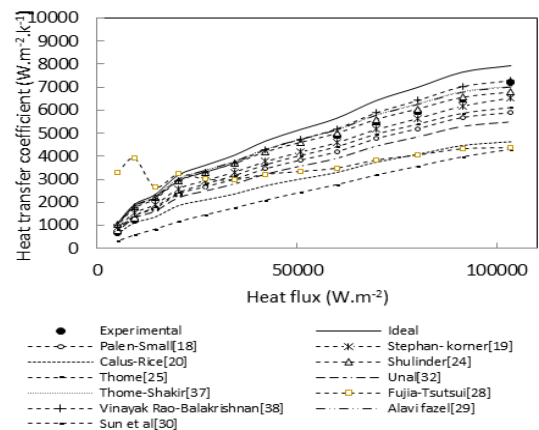
نمودار ۸: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت مولی ۰/۷۲ محلول آب و اتانول با روابط موجود



نمودار ۴: 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



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

جدول ۵: 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 شمال [۱۸]	۲۸/۰۶	۱۱/۰۱	۱۰/۴۸	۴۶/۱۴	۳۵/۳۹	۵/۹۲	۲۴/۵۱
استفان و کورنر [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 شکر [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 رانو 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- مدل سازی

### ۵-۱- الگوریتم ژنتیک

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 پارامترهای موثر در تخمین ضریب انتقال حرارت در محلول های دو جزئی می باشد. سپس با استفاده از تئوری پاکینگهام<sup>۲</sup> پارامترهای موثر بی بعد سازی می شوند. جهت تخمین دقیق توان اعداد بدون بعد، با استفاده از داده های آزمایشگاهی جوشش استخری محلول آب و اتانول در غلظت های 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 می گردد.

$$Nu = \frac{\alpha l^*}{K_l} = (Le^{-1})^{0.281} We^{0.302} Me^{0.130} \quad (5)$$

در این رابطه،  $Le$  عدد بدون بعد لوئیس<sup>۳</sup> می باشد که نشان دهنده ی میزان نفوذ حرارتی نسبت به نفوذ مولکولی می باشد.

$$Le = \frac{\hat{\alpha} l}{D_{AR}} \quad (6)$$

$We$  عدد بدون بعد وبر است که در دینامیک سیالات، نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی شناخته می شود و در مواردی که جسم بسیار بزرگ است این عدد بسیار کوچک و قابل چشم پوشی است.

$$We = \frac{\rho_l u^2 l^*}{\sigma} \quad (7)$$

در این رابطه  $l^*$  شاخص طول می باشد که محققان بسیاری از آن جهت محاسبه ی شاخص طول استفاده کرده اند.  $u$  نیز سرعت می باشد و به صورت رابطه ی (۹) تعریف می شود.

$$l^* = \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$u = \frac{\left( \frac{g}{A} \right)}{h_{fg} \rho_v} \quad (9)$$

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که می توان در طبقه بندی ها، از آن به عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه ی آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی اختراع شده است. قانون تکامل طبیعی<sup>۱</sup> بدین صورت است که تنها گونه هایی از یک جمعیت ادامه نسل می دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آن هایی که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طی زمان از بین می روند [۴۱]. الگوریتم ژنتیک به طور موثری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می کند، راه حل های بالقوه ی یک مسئله را در قالب کروموزوم های ساده ای کد می کند و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها اعمال می کند تا حل های جدید و بهبود یافته را ایجاد کند [۴۲].

در این پژوهش، با به کارگیری الگوریتم ژنتیک مدلی جهت محاسبه ی 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 داده ی 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 می سازد. می دانیم که ضریب انتقال حرارت تابعی از خواص فیزیکی سیال و نیز خواص بین سطحی سیال و هیتر می باشد.

$$Y = f \{ \rho_L, \rho_V, C_p, h_{fg}, \sigma, \dots \} \quad (9)$$

<sup>۱</sup> Natural Selection

<sup>۲</sup> Buckingham

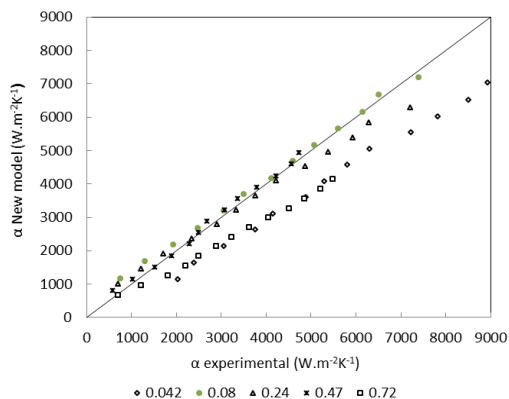
<sup>۳</sup> Lewis

حرارت ایده آل استفاده می شود و نیازی به مدل سازی نمی باشد. همان طور که در مقدمه بیان شد، ضریب انتقال حرارت ایده آل از رابطه ی اختلاط خطی قابل محاسبه می باشد.

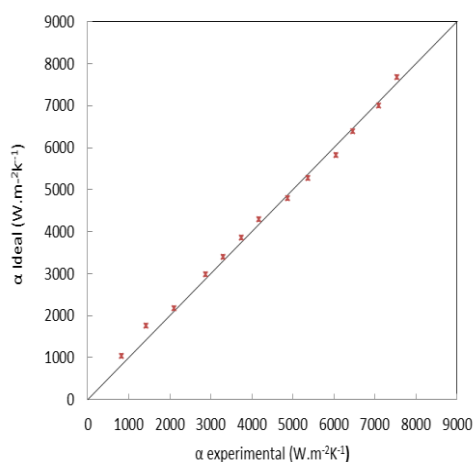
جدول ۶: درصد خطای روابط ضریب انتقال حرارت با نتایج آزمایشگاهی محلول آب و اتانول

غلظت مولی	۰/۰۴۲	۰/۰۸۶	۰/۱۲۴	۰/۱۶۲	۰/۲۰۰	خطای کلی
رابطه ی جدید	۱۴/۳۷	۱۵/۷۸	۱۷/۷۲	۶/۱۱	۸/۶۸	۱۲/۵۳

نمودار (۱۳) مقایسه ی بین نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت غلظت آزنوتروپ با ضریب انتقال حرارت ایده آل را نشان می دهد. از آنجاکه رابطه ی استفان و عبدالسلام [۲۴]، با مقادیر ضریب انتقال حرارت آزمایشگاهی آب خالص و هم چنین اتانول خالص خطای بسیار کمی - حدود ۴ درصد- ایجاد می کند، در صورت نداشتن مقادیر آزمایشگاهی اجزای خالص، این رابطه جهت محاسبه ی ضریب انتقال حرارت ایده آل پیشنهاد می شود.



نمودار ۱۲: مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت با رابطه ی جدید

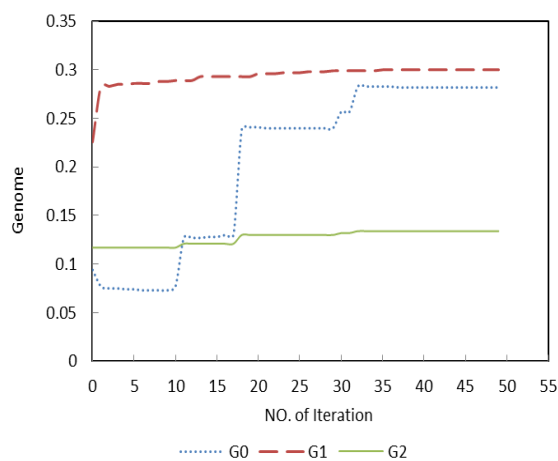


نمودار ۱۳: مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت نقطه ی آزنوتروپ با ضریب انتقال حرارت ایده آل (رابطه ی ۲)

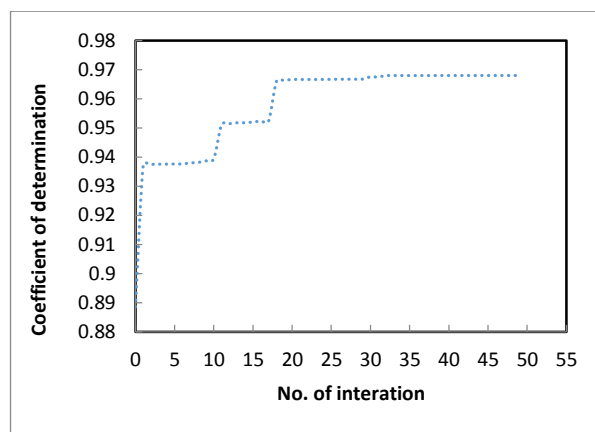
$Me$  یک عدد بدون بعد به دست آمده از تئوری باکینگهام می باشد که از رابطه ی (۱۰) به دست می آید.

$$Me = \frac{h_{fg} \rho^{*2}}{\alpha_l^2} \quad (10)$$

روند محاسبه ی توان های مجهول مدل که خروجی برنامه ی نوشته شده با الگوریتم ژنتیک می باشند در نمودار (۱۰) نشان داده شده است. تعداد دفعات تکرار<sup>۱</sup>، ژنوم<sup>۲</sup> یا همان مقدار توان های تابع در تکرارهای مختلف می باشد. همچنین روند بهبود ضریب همبستگی مدل پس از جایگذاری توان های به دست آمده در مدل و سپس حل آن، به صورت 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) مقایسه ی بین نتایج آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت محلول با رابطه ی جدید را نشان می دهد. داده های آزمایشگاهی با رابطه ی جدید خطایی حدود ۱۳ درصد ایجاد می کند. از آنجاکه طبق مشاهدات آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در نقطه ی آزنوتروپ، خطای بسیار کمی حدود ۶ درصد را با ضریب انتقال حرارت ایده آل ایجاد می کند، لذا برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت در این غلظت، از رابطه ی ضریب انتقال

<sup>1</sup> Iteration  
<sup>2</sup> Genome

$K$	$\frac{W}{m \cdot K}$	ضریب هدایتی
$Le$	...	عدد لوییس
$M$	Kg	جرم
$M_w$	$\frac{kg}{kmol}$	جرم مولکولی
$P$	Pa	فشار
$Pr$	...	عدد پراتل
$q''$	$\frac{W}{m^2}$	شار حرارتی
$q$	W	آهنگ حرارتی
$r$	m	شعاع
$R$	$\frac{j}{mol \cdot K}$	ثابت جهانی گازها
$R_p$	$\mu m$	زبری
$S$	$\frac{j}{K}$	آنتروپی
$T$	K	دما
$v$	$m^3$	حجم
$V$	$\frac{m^3}{kmol}$	حجم مولی
$x$	...	کسر مولی مایع
$y$	...	کسر مولی بخار
$Z$	...	ضریب تراکم پذیری

حروف یونانی

$\alpha$	$\frac{w}{m^2 \cdot k}$	ضریب انتقال حرارت
$\hat{\alpha}$	$\frac{m^2}{m^2}$	ضریب پخشندگی
$\sigma$	$\frac{N}{m}$	کشش سطحی
$\beta_l$	$\frac{s}{m}$	ضریب انتقال جرم
$\vartheta$	$\frac{s}{m^2}$	ویسکوزیته سینماتیکی
$\mu$	$\frac{s}{Pa}$	ویسکوزیته دینامیکی
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	دانسیته
$\gamma$	...	ضریب فعالیت
$\omega$	...	ضریب بی مرکزی، کسر جرمی
$\phi$	...	زاویه تماس
$\Delta$	...	تفاضل
		زیرنویس ها
$avg$		میانگین
$az$		آزئوتروپ
$b$		جوش
$bp$		اختلاف نقطه‌ی شبنم و حباب
$c$		بحرانی

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  $5 \frac{kW}{m^2}$  الی  $10.3$  نتایج 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  $0.04$  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 و اتانول، 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	
$A$	$m^2$ مساحت
$Ar$	...
$B_o$	...
$C_p$	$\frac{j}{kg \cdot K}$ ظرفیت حرارتی
$D$	M قطر
$D_{AB}$	$\frac{m^2}{s}$ ضریب نفوذ
$g$	$\frac{m}{s^2}$ شتاب گرانش
$h$	$\frac{j}{kg}$ آنتالپی
$h_{fg}$	$\frac{j}{kg}$ گرمای نهان تبخیر
$ja$	...
	عدد ژاکوب

[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 Transfer*, 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 transfer in nucleate 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

<i>e</i>	مازاد
<i>id</i>	ایده آل
<i>i</i>	جزء فرارتر
<i>j</i>	جزء غیر فرارتر
<i>l</i>	مایع
<i>Mix</i>	مخلوط
<i>n</i>	نرمال
<i>r</i>	کاهش یافته
<i>s</i>	سطح
<i>sat</i>	اشباع
<i>v</i>	بخار

#### 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. Naess, 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<sub>2</sub> 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.

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 Blasenverdampfung 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<sub>6</sub> and CF<sub>3</sub>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