

# پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت جوشی محلول‌های دوجزیی با استفاده از یک معادله جدید

سید محسن پیغمبرزاده<sup>۱\*</sup>، محمد جامی الاحمدی<sup>۲</sup>

۱- ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی

۲- اهواز، دانشگاه صنعت نفت، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: peyghambarzadeh@gmail.com

## چکیده

پدیده جوشش مدت‌هاست که به واسطه توانایی قابل ملاحظه در انتقال حرارت، نقش مهمی در بسیاری از صنایع ایفا می‌نماید. در طول ۳۰ سال گذشته، معادلات تجربی بسیاری در نتیجه تحقیقات دانشمندان در زمینه جوشش هسته‌ای ارائه شده است. در این مقاله، یک معادله جدید بر پایه معادله استفان-کرنر که یکی از موفق‌ترین معادلات تجربی در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت محلول‌ها می‌باشد، ارائه شده است. مقایسه پیش‌بینی معادله جدید با داده‌های آزمایشگاهی مؤید این مطلب است که با تغییرات اعمال شده، عملکرد معادله استفان-کرنر به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: جوشش، ضریب انتقال حرارت، رابطه تجربی جدید، معادله استفان-کرنر

## ۱- مقدمه

اعتقاد بر این است که انسان‌ها صدها سال پیش با پدیده جوشش آشنا شده‌اند. اما مطالعات علمی در زمینه جوشش و کاربردهای صنعتی آن به چند دهه اخیر برمی‌گردد. این تحقیقات از مقاله نوکی یاما<sup>[۱]</sup> آغاز گردید و تاکنون داده‌های بسیاری از مطالعات تجربی گوناگون که هر کدام شرایط انجام آزمایش متفاوتی داشته‌اند، جمع‌آوری شده است. در سال‌های اخیر، جوشش کاربردهای جدیدی پیدا کرده است

که از آن جمله می‌توان به جوشش در مقیاس‌های بسیار ریز، جوشش در گرانش کم و غیره اشاره نمود که درک کامل از این پدیده را به مسأله مهمی تبدیل نموده است. جوشش هسته‌ای به طور گسترده‌ای در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است به ویژه در صنایع هسته‌ای، تجهیزات الکترونیکی و موارد مشابه. دلیل این کاربرد وسیع به خاطر توانایی قابل ملاحظه انتقال حرارت جوشش هسته‌ای در مقایسه با دیگر سازوکارها مانند رسانش و همرفت می‌باشد. این توانایی

1. Nukiyama

بدون شک در اثر تغییر فاز و تولید حباب روی سطح انتقال حرارت شکل می‌گیرد. لذا هدف اصلی تحقیقات در زمینه جوشش یافتن رابطه مناسبی بین میزان انتقال حرارت و اختلاف دمای سطح و سیال می‌باشد [۲]. به دلیل پیچیدگی‌هایی که در بحث جوشش مایعات وجود دارد هنوز معادلات تجربی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوششی به کار می‌روند. اشکال عمده این معادلات محدوده اعتبار آنهاست. این معادلات فقط برای شرایطی که بسیار نزدیک به شرایط آزمایشی که از آن به دست آمده‌اند، جواب خوبی ارائه می‌نمایند. با در نظر گرفتن تعداد زیاد عواملی که بر انتقال حرارت جوششی تأثیر می‌گذارند می‌توان دریافت که برای داشتن معادله‌ای که بتواند تحت همه شرایط جواب دقیقی ارائه کند به آزمایش بسیاری نیاز خواهیم داشت.

$$(T_w - T_{sat}(x)) = \Delta T_I + \Delta T_E = \Delta T_I (I + \Theta) \quad (1)$$

به علاوه، این مسأله نیز باید ذکر شود که ضرایب انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای محلول‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مواد خالص سازنده آنها با همان خواص فیزیکی می‌باشد و یا به طور مشابه از ضریب انتقال حرارتی که با درون‌یابی ضرایب انتقال حرارت اجزاء سازنده حاصل می‌شود، کمتر می‌باشد [۳]. جوشش محلول‌ها اساساً متفاوت از جوشش مواد خالص می‌باشد؛ زیرا در جوشش محلول‌ها انتقال حرارت به وسیله انتقال جرم تحت کنترل قرار می‌گیرد. بنابراین از آن جایی که سرعت نفوذ انتقال جرم در فاز مایع معمولاً بسیار کمتر از نفوذ حرارت می‌باشد، نرخ تبخیر به شدت کاهش می‌یابد [۴].

$$\Delta T_I = (I - x) \Delta T_A + x \Delta T_B \quad (2)$$

با توجه به مطالعات آزمایشگاهی و نظری صورت گرفته، استفان و کرنر [۵] پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را در جوشش هسته‌ای مواد خالص و محلول‌های دو جزئی ارزیابی کردند. این مسأله مورد تأیید قرار گرفته است که پدیده‌هایی در مقیاس بسیار کوچک می‌توانند برای درک و پیش‌بینی انتقال حرارت در مقیاس بزرگ حائز اهمیت باشند. در یک محلول دوجزئی، دمای تعادلی فاز به وسیله اختلاف شدید غلظت تحت تأثیر قرار داده می‌شود و لذا ضریب انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۵]. در سال ۱۹۶۹ استفان و کرنر روش ساده‌ای ارائه نمودند که با به کارگیری آن ضرایب انتقال حرارت سیستم‌های دوجزئی به وسیله ضرایب انتقال حرارت اجزای خالص قابل محاسبه بود. این روش، در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. نمودار قسمت بالایی این شکل، منحنی تعادل سیستم A و B را نشان می‌دهد که در آن کسر مولی جزء B در فاز بخار (y) بر

$$\Theta = A(y - x) \quad (3)$$

استفان و کرنر دریافتند که مقدار  $\Theta$  در معادله (۱) می‌تواند بر حسب بین ۱ تا ۱۰ بار از عبارت زیر برای محاسبه آن استفاده می‌شود:

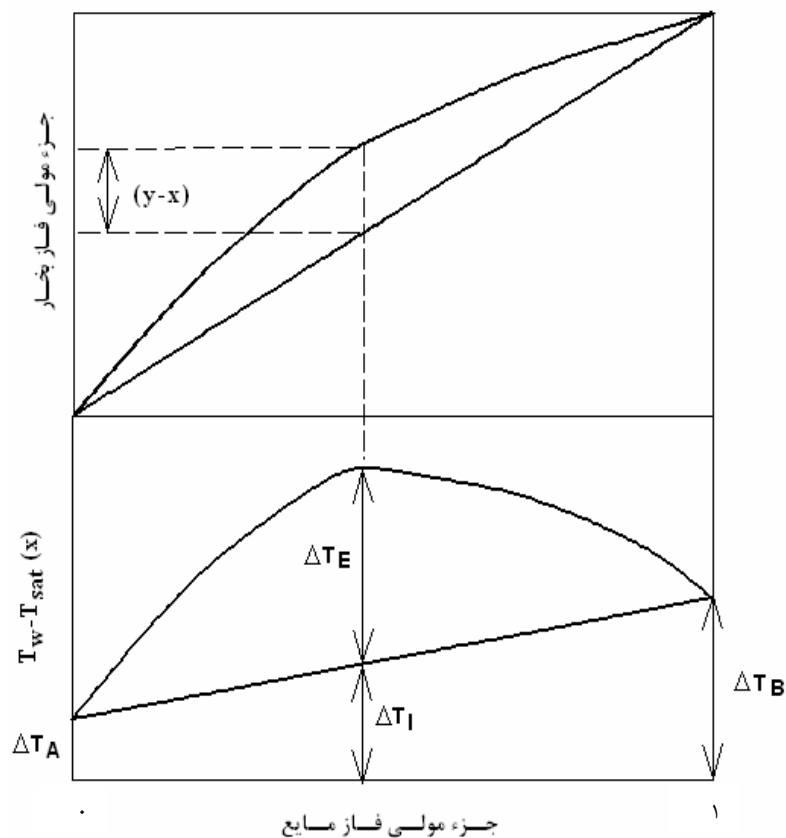
$$A = A_0(0.88 + 0.12P) \quad (4)$$

در معادله فوق P فشار سیستم بر حسب bar و  $A_0$  یک ثابت است که به محلول دوجزئی مورد مطالعه بستگی دارد. مقادیر  $A_0$  برای تعدادی سیستم دوجزئی در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار  $A_0$  برابر ۱/۵۳ برای هنگامی که هیچ داده آزمایشگاهی در اختیار نباشد، پیشنهاد شده است. این روش برای مواقعی که یکی از اجزاء به شدت فعال سطحی باشند، چندان مورد اطمینان نیست [۶].

حساب کسر مولی جزء B در فاز مایع (x) در فشار ثابت رسم شده است. نمودار قسمت پایین، اختلاف دمای بین سطح داغ  $T_w$  و دمای حباب محلول  $T_{sat}(x)$  متناسب با ترکیب درصد فاز مایع آن را نشان می‌دهد. منحنی  $(T_w - T_{sat}(x))$  از یک نقطه ماگزیمم که متناسب است با ماگزیمم مقدار (y-x) عبور می‌کند. مقدار  $(T_w - T_{sat}(x))$  به صورت زیر بیان می‌شود:

همه شرایط جواب دقیقی ارائه کند به آزمایش بسیاری نیاز خواهیم داشت. به علاوه، این مسأله نیز باید ذکر شود که ضرایب انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای محلول‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مواد خالص سازنده آنها با همان خواص فیزیکی می‌باشد و یا به طور مشابه از ضریب انتقال حرارتی که با درون‌یابی ضرایب انتقال حرارت اجزاء سازنده حاصل می‌شود، کمتر می‌باشد [۳]. جوشش محلول‌ها اساساً متفاوت از جوشش مواد خالص می‌باشد؛ زیرا در جوشش محلول‌ها انتقال حرارت به وسیله انتقال جرم تحت کنترل قرار می‌گیرد. بنابراین از آن جایی که سرعت نفوذ انتقال جرم در فاز مایع معمولاً بسیار کمتر از نفوذ حرارت می‌باشد، نرخ تبخیر به شدت کاهش می‌یابد [۴].

با توجه به مطالعات آزمایشگاهی و نظری صورت گرفته، استفان و کرنر [۵] پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را در جوشش هسته‌ای مواد خالص و محلول‌های دو جزئی ارزیابی کردند. این مسأله مورد تأیید قرار گرفته است که پدیده‌هایی در مقیاس بسیار کوچک می‌توانند برای درک و پیش‌بینی انتقال حرارت در مقیاس بزرگ حائز اهمیت باشند. در یک محلول دوجزئی، دمای تعادلی فاز به وسیله اختلاف شدید غلظت تحت تأثیر قرار داده می‌شود و لذا ضریب انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۵]. در سال ۱۹۶۹ استفان و کرنر روش ساده‌ای ارائه نمودند که با به کارگیری آن ضرایب انتقال حرارت سیستم‌های دوجزئی به وسیله ضرایب انتقال حرارت اجزای خالص قابل محاسبه بود. این روش، در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. نمودار قسمت بالایی این شکل، منحنی تعادل سیستم A و B را نشان می‌دهد که در آن کسر مولی جزء B در فاز بخار (y) بر



شکل ۱- تغییرات تفاضل جزء مولی فازهای بخار و مایع (شکل بالا) و همچنین تفاضل دمای سطح و دمای حباب محلول (شکل پایین) بر حسب جزء مولی فاز مایع در یک سیستم دوجزیبی [۶]

جدول ۱- مقادیر  $A_0$  برای استفاده در معادله (۳) و (۴) جهت تخمین ضرایب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای محلول‌های دوجزیبی [۶]

$A_0$	سیستم دوجزیبی
۰/۷۵	استون- اتانول
۱/۱۸	استن- بوتانول
۱/۴۰	استن- آب
۰/۴۲	اتانول- بنزن
۱/۳۱	اتانول- سیکلوهگزان
۱/۲۱	اتانول- آب
۱/۴۴	بنزن- تولوئن
۱/۰۸	متانول- بنزن
۳/۲۹	پروپانول- آب
۱/۴۷	آب- گلاکلی
۱/۵۰	آب- گلیسرین
۳/۵۶	آب- پیریدین

## ۲- توسعه مدل جدید

همه معادلات تجربی که بر مبنای اختلاف غلظت جزء سبک در فازهای بخار و مایع توسعه یافته‌اند، یک پارامتر قابل تنظیم در آنها وجود دارد که از طریق آزمایش تعیین می‌گردد. در مورد رابطه استفان و کرنر این پارامتر قابل تنظیم  $A_0$  است. برای یافتن مقدار این پارامتر، مراحل زیر را دنبال می‌کنیم.

$$\frac{h}{h_{id}} = \frac{I}{I + A_0(y - x)(0.88 + 0.12P)} \quad (5)$$

در آزمایش‌هایی که برای توسعه مدل جدید انتخاب شده‌اند، فشار کل برابر ۱ bar است. لذا مقدار عبارت  $(0.88 + 0.12P)$  برابر واحد خواهد بود. لذا خواهیم داشت:

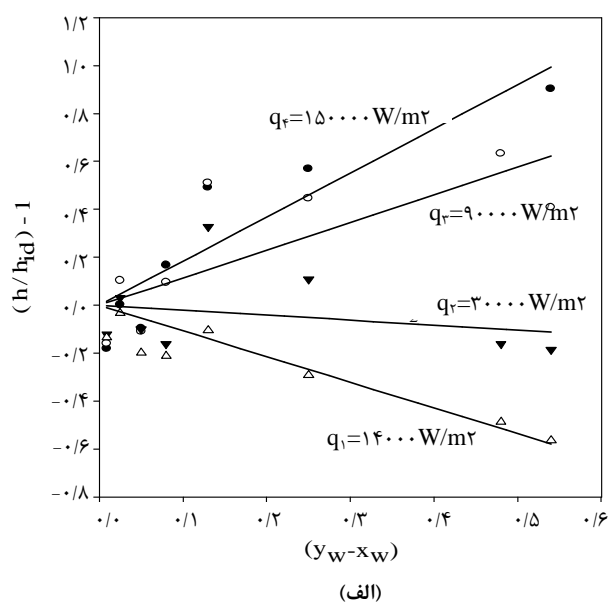
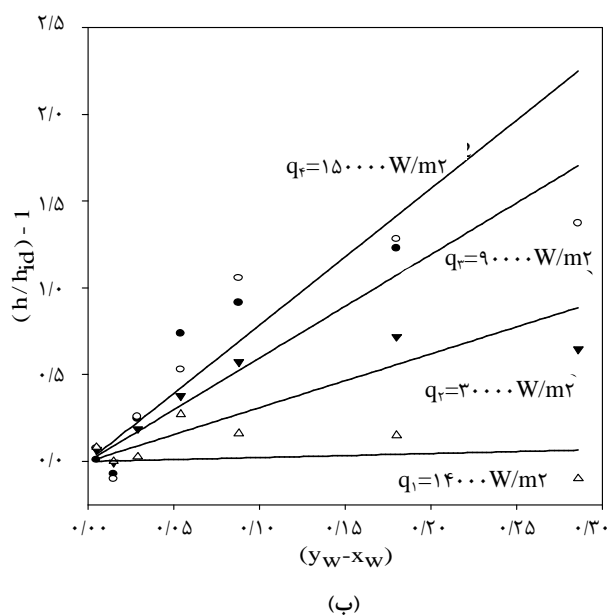
$$\frac{h_{id}}{h} - I = A_0(y - x) \quad (6)$$

اکنون اگر عبارت سمت چپ معادله (۶) را در هر شار حرارتی به صورت جداگانه برحسب  $(y-x)$  رسم کنیم، شیب خطوطی که با روش رگرسیون خطی به این داده‌ها برازش می‌شود، مقدار  $A_0$  در هر شار حرارتی را می‌دهد. این مسأله در شکل (۲) برای داده‌های آزمایشگاهی

ضریب انتقال حرارت محلول دوجزیبی آب- منواتانول آمین و آب- دی‌اتانول آمین به طور جداگانه به نمایش در آمده است. اگرچه داده‌های فراوانی برای برازش مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما فقط داده‌های مربوط به چهار شار حرارتی مختلف به همراه خطوط رسم شده به روش رگرسیون خطی (حداقل مربعات خطا) در این شکل نشان داده شده‌اند.

از آن جایی که مقدار  $A_0$  در معادله استفان-کرنر با شار حرارتی تغییر می‌کند، می‌توان با رسم نقاطی که نشان‌دهنده تغییرات  $A_0$  بر حسب شار حرارتی می‌باشند و برازش خط به این نقاط، معادله تغییرات  $A_0$  با شار حرارتی را محاسبه نمود. این مسأله در شکل (۳) برای محلول‌های دو جزیبی آب- منواتانول آمین و آب- دی‌اتانول آمین نمایش داده شده است و معادلاتی که از این روش به دست آمده است برای هر کدام به طور جداگانه در داخل شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. بنابراین با جایگزین نمودن مقدار جدید  $A_0$  در شکل قبلی، معادله استفان-کرنر در مورد محلول دوجزیبی آب- منواتانول آمین، معادله استفان-کرنر به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\frac{h}{h_{id}} = \frac{I}{I + (0.0117q - 0.5894)(0.88 + 0.12P)(y - x)} \quad (7)$$



شکل ۲- نمودار  $(h/h_{id}) - I$  بر حسب  $(y_w - x_w)$  جهت محاسبه  $A_0$  ثابت معادله استفان-کرنر

الف) برای محلول آب- منواتانول آمین ب) برای محلول آب- دی‌اتانول آمین

$$E_{Rms} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_{exp,i} - h_{cal,i}}{h_{exp,i}} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (9)$$

داده‌های جدول (۲) نشان می‌دهد که وقتی  $A_0=1/53$ ، بیشترین میزان خطا در پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌گردد. این عدد توسط استفان و کرنر برای مواقعی پیشنهاد شده است که هیچ داده تجربی در اختیار نباشد [۶]. اما اگر داده آزمایشگاهی موجود باشد و  $A_0$  را مطابق رابطه جدید که به صورت معادلات (۷) و (۸) نمایش داده شده است، تابعی از شار حرارتی در نظر بگیریم، میزان خطای حاصل شده کمتر از حالتی خواهد بود که  $A_0$  برای هر محلول دوجزیی ثابت در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، در این تحقیق بهترین مقدار  $A_0$  برای این دو زوج محلول مورد بررسی محاسبه شده است که با به کارگیری آنها کمترین میزان خطا در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت به وجود خواهد آمد. مقدار  $A_0$  برای محلول آب-منواتانول آمین برابر  $1/25$  و برای محلول آب-دی اتانول آمین برابر  $1/7$  خواهد بود. این دو عدد به دست آمده را می‌توان به جدول (۱) که محصول مطالعات تجربی دانشمندان مختلف است و توسط استفان و کرنر گردآوری شده است، اضافه نمود.

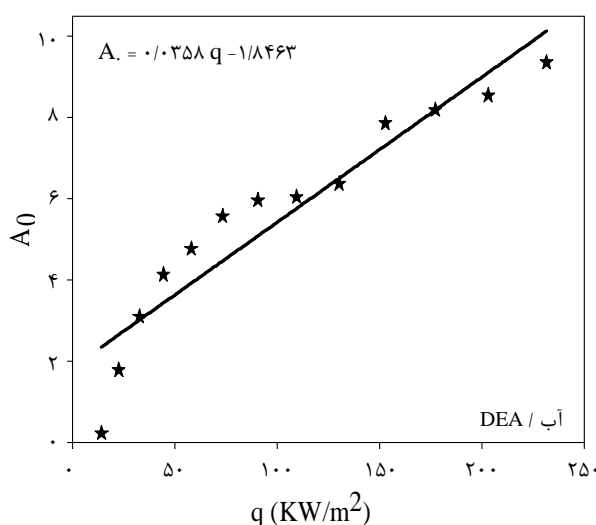
و برای محلول دو جزیی آب-دی اتانول آمین شکل زیر را خواهد داشت:

$$\frac{h}{h_{id}} = \frac{1}{1 + (0.0358q - 1.8463)(0.88 + 0.12P)(y - x)} \quad (8)$$

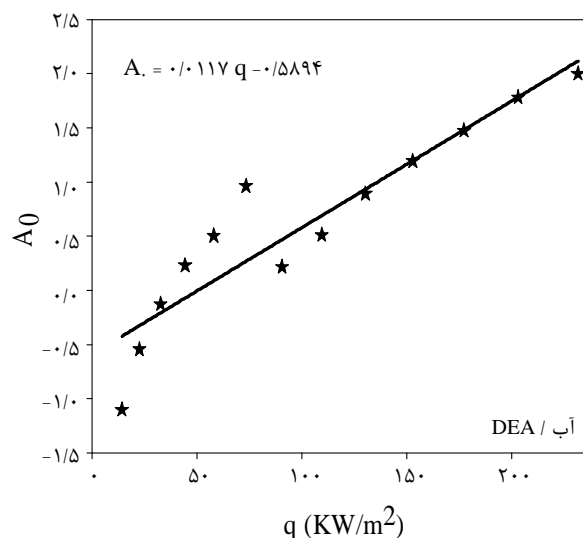
بنابراین در معادله جدید ثابت  $A$  به طور هم زمان تابعی از شار حرارتی و فشار خواهد بود.

### ۳- مقایسه نتایج

ضرایب انتقال حرارت محلول‌های دوجزیی آب-منواتانول آمین و آب-دی اتانول آمین به صورت آزمایشگاهی در محدوده وسیعی از شار حرارتی و غلظت محلول اندازه‌گیری گردید [۷] و این نتایج آزمایشگاهی با سه حالت مختلف معادله استفان-کرنر مقایسه گردید و میزان ریشه دوم مربعات خطای این سه روش - که به صورت معادله (۹) تعریف شده است- در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت محلول‌های مذکور در جدول (۲) ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳- تغییرات  $A_0$  در معادله استفان-کرنر برحسب شار حرارتی

(الف) برای محلول آب-منواتانول آمین (ب) برای محلول آب-دی اتانول آمین

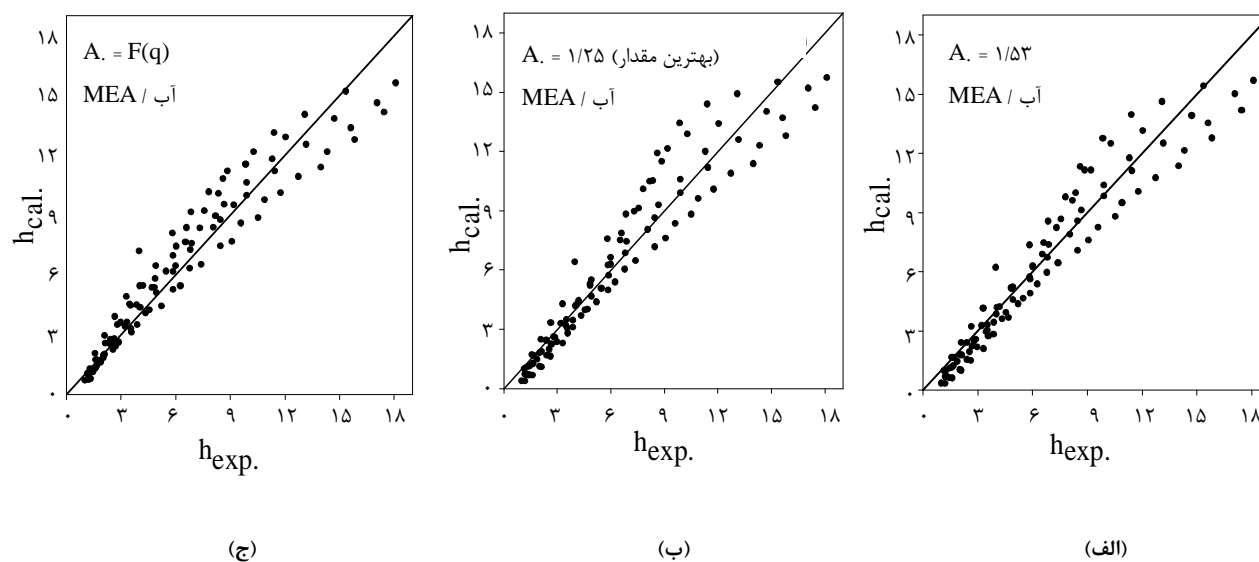
جدول ۲- میزان خطای پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای محلول‌ها توسط

سه حالت مختلف به کارگیری معادله استفان-کرنر

تعداد داده‌های آزمایشگاهی [۷]	معادله جدید $A_0=f(q)$	بهترین ثابت $A_0$	$A_0=1/53$	محلول دوجزیبی
۱۰۱	۱۸/۷٪	۲۳/۶٪	۲۳/۸٪	آب- منواتانول آمین
۸۷	۱۴/۵٪	۱۷/۰٪	۳۶/۸٪	آب- دی اتانول آمین

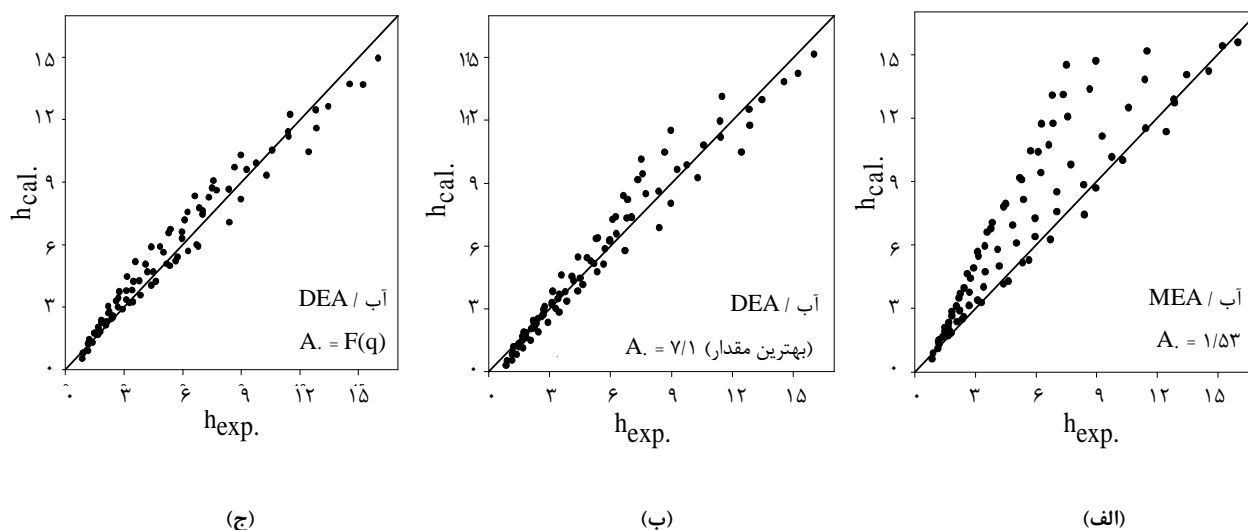
این معادلات کاهش می‌یابد؛ زیرا مطابق آنچه در مقالات اشاره شده است میزان دانش ما از سازوکار جوشش در شارهای حرارتی زیاد تا نقطه شار حرارتی بحرانی بسیار ناقص‌تر از جوشش در شارهای حرارتی کم می‌باشد [۸].

دقت تغییراتی که در معادله استفان-کرنر ایجاد شد را می‌توان در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب برای محلول‌های آب- منواتانول آمین و آب- دی اتانول آمین مشاهده نمود. در این نمودار، ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از این سه روش مختلف برای محلول‌های مذکور بر حسب مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه رسم شده است. دقت در این نتایج نشان می‌دهد که در شارهای حرارتی بالاتر توان پیش‌بینی



شکل ۴- حالت‌های مختلف معادله استفان-کرنر در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت آزمایشگاهی محلول آب- منواتانول آمین

(الف)  $A_0=1/53$  (ب)  $A_0=1/25$  (بهترین مقدار ثابت ج)  $A_0=f(q)$  ، معادله جدید



شکل ۵- حالت‌های مختلف معادله استفان-کرنر در پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت آزمایشگاهی محلول آب-دی اتانول آمین با

الف)  $A_0 = 1/53$  (ب)  $A_0 = 7/1$  (بهترین مقدار ثابت ج)  $A_0 = f(q)$ ، معادله جدید

- [4] Jamialahmadi, M. Helalizadeh, A. Muller-Steinhagen, H. "Pool boiling heat transfer to electrolyte solutions", International Journal of Heat and Mass Transfer 47, pp. 729-742, (2004).
- [5] Stephan, P. Kern, J. "Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling", International Journal of Heat and Fluid Flow 25, pp. 140-148, (2004).
- [6] Stephan, K. and Körner, M. "Calculation of Heat Transfer in Evaporative Binary Liquid Mixtures", Chem. Ing. Tech., vol. 41(7), pp. 409-717, (1969).
- [7] Peyghambarzadeh, S. M. "Experimental study on pool boiling heat transfer to amine solutions", M. Sc. Thesis, Petroleum University of Technology, (2006).
- [8] Auracher, H. Marquardt, W. "Heat transfer characteristics and mechanisms along entire boiling curves under steady-state and transient conditions", International Journal of Heat and Fluid Flow 25, pp. 223-242, (2004).

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل جدید بر پایه معادله استفان-کرنر برای پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای محلول‌های دوجزبی ارائه شده است. در معادله استفان-کرنر مقدار ثابت A تابع فشار عملیاتی و محلول دوجزبی مورد مطالعه می‌باشد؛ اما در این تحقیق مقدار A علاوه بر دو پارامتر فوق تابع شار حرارتی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با این تغییر عملکرد معادله استفان-کرنر بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

#### مراجع

- [1] Nukiyama, S. "The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure", J. Jpn. Soc. Mech. Engrs. 37, pp. 367-374, (1934).
- [2] Shoji, M. "Studies of boiling chaos: a review", International Journal of Heat and Mass Transfer 47, pp. 1105-1128, (2004).
- [3] Fujita, Y. Tsutsui, M. "Experimental investigation in pool boiling heat transfer of ternary mixture and heat transfer correlation", Experimental Thermal and Fluid Science 26, pp. 237-244, (2002).