

مدل سازی عددی فرایند جذب بخار آب در محلول ریزشی لیتیم بروماید - آب بر روی صفحه قائم

شهرام کریمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

بیژن فرهانیه (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

جاذب یکی از اجزاء مهم چیلرهای جذبی است و نقش به‌سزایی در بازده چیلر دارد. در این نوشتار نحوه‌ی مدل سازی عددی فرایند جذب بخار آب در محلول لیتیم بروماید - آب روی صفحه قائم، تحت شرایط رینولدز بین ۵ تا ۱۵۰، ارائه شده است. این کار با استفاده از فرضیه‌ی لایه‌ی مرزی برای معادلات انتقال حرارت، جرم و مقدار حرکت، و نیز روش تفاضلات محدود ضمنی برای حل معادلات مستخرج انجام شده است. تغییرات خواص محلول تحت تأثیر دما و غلظت، و تغییر ضخامت فیلم ناشی از جذب در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده قابلیت ارائه‌ی پروفیل های دما، غلظت، خواص محلول و نیز شار جرم جذبی و ضرایب انتقال حرارت و جرم را دارد. حل در شرایط مورد نظر^[۱]، به‌منظور مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.

واژگان کلیدی: جذب صفحه‌ی قائم، فرایند جذب، مدل سازی عددی، چیلر جذبی، لیتیم بروماید - آب.

bifa@sharif.edu
shahram.karami@alum.sharif.edu

مقدمه

بیشتر از صد سال است که برای ایجاد سرمایش از فناوری سرمایش جذبی استفاده می‌شود. با پیشرفت فناوری، اکنون می‌توان از سیستم‌های سرمایش جذبی به‌عنوان جایگزین مناسب و اقتصادی سیستم‌های تراکمی بخاری نام برد. مزیت‌هایی همچون کاهش مصرف برق و سازگاری با محیط زیست این سیستم‌ها را به کارآمدترین سیستم در مصارف خانگی و فعالیت‌های صنعتی دوران جدید بدل کرده است. سردکننده‌های جذبی به دلیل کارکردن با آب داغ، بخار و شعله‌ی مستقیم گاز طبیعی -- به جای برق -- در تپه‌ی مطبوع صنعتی کاربرد وسیعی یافته‌اند. این دستگاه در شرایط عادی متشکل است از: ژنراتور، جاذب، تبخیرکننده^۲ (که خود نیازمند یک برج خنک‌کن برای تخلیه‌ی حرارت به محیط است) و واحد کندانسور یا خنک‌کننده^[۱].

در بسیاری از پمپ‌های حرارتی جذبی، از آب به‌عنوان سرمازا و از یک نمک (مانند لیتیم بروماید) به‌عنوان جاذب استفاده می‌شود. به دلیل غیرفرار بودن لیتیم بروماید، وجود بخار آب خالص در غیاب گازهای جذب ناشدنی ممکن خواهد بود و به همین دلیل مقاومتی برای انتقال جرم در فاز بخار وجود ندارد. در پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال جرم، نوع رژیم جریان و هندسه‌ی جریان تأثیر به‌سزایی در نتایج حاصله دارد.^[۲]

در سال ۱۹۷۷ اقدامات قابل توجهی به‌منظور مدل‌کردن پدیده‌ی جذب انجام گرفت^[۳] که طی آنها یک فرایند دائمی با جریان لایه‌ی آرام و بدون حضور موج،

قابل اغماض است. به‌کارگیری این فرضیه‌ها، و نیز استفاده از روش جداسازی متغیرها و سری فوریه منجر به ارائه‌ی راه حلی شد که دست‌یابی به جواب آن مستلزم به‌دست آوردن مقادیر ویژه‌ی بسیاری است تا سری همگرا شود و از این طریق، برای دما و غلظت در طول

در سال ۱۹۷۷ اقدامات قابل توجهی به‌منظور مدل‌کردن پدیده‌ی جذب انجام گرفت^[۳] که طی آنها یک فرایند دائمی با جریان لایه‌ی آرام و بدون حضور موج،

فیلم توزیعی به دست آید. انتقال حرارت به دیوار، میزان بخار جذب شده، و غلظت متوسط نیز از این طریق حاصل می‌شود.

در سال ۱۹۹۰ یک مدل عددی برای بررسی فرایند جذب روی دیوار قائم با فرض جریان آرام ارائه شد که در آن پدیده‌های انتقال حرارتی و انتقال مقدار حرکت در فاز بخار نیز مورد بررسی قرار گرفته است.^[۵] مهم‌ترین فرضیه‌های به‌کار برده شده در این مدل عبارت‌اند از: ثابت بودن ضخامت فیلم؛ ثابت بودن دمای دیوار؛ محدود بودن غلظت آب در کاربرد قانون جذب فیک^۳. طراحان این مدل، بسیاری از عبارات معادلات را که توسط دیگران در نظر گرفته شده ناچیز در نظر گرفتند. آنها فرض کردند که گرادیان فشار در ایزوثر و تنش برشی بین دوفاز وجود داشته باشد اگرچه این مقادیر برای اعداد رینولدز فیلم، در حدود ۳۰ ناچیز است. آنها فرض کردند که گرادیان‌های سرعت، دما و غلظت در خارج ایزوثر صفر است. این نکته قابل ذکر است که آنها هیچ دلیلی برای فرضیات خود ارائه نکرده‌اند. معادلات به دست آمده با استفاده از روش ارائه شده‌ی قبلی^[۶] و نیز با افزایش چگالی گره‌ها در نزدیک فصل مشترک حل شده است. پروفیل‌های دما و غلظت در فیلم، و پروفیل دما در بخار رسم شده است. آنها نشان دادند که شدت جذب در ورودی جاذب بیشینه است و به صورت نمایی تغییر می‌کند، و اگر دمای فیلم در ورودی و دمای دیوار کاهش یابد شدت جذب جاذب افزایش می‌یابد. تأثیر پارامترهایی همچون غلظت فیلم ورودی، فشار جاذب، دمای دیوار بر شدت جذب نیز نمایش داده شده است. نتیجه‌ی حاصل بیان‌گر آن است که تغییرات دما در فاز بخار نمی‌تواند ناچیز باشد، و نیز نشان می‌دهد که غلظت‌های فصل مشترک بخار و محلول و دمای بالک فیلم با نتایج به دست آمده‌ی قبلی^[۷] هم‌خوانی خوبی دارد.

در سال ۲۰۰۲^۲ محققین به بررسی تأثیر حضور گازهای غیر قابل جذب بر ظرفیت سردکننده‌ی جذبی پرداخته‌اند.^[۸] آنها تأثیر عوامل مختلف -- نظیر میزان حضور گازهای غیرقابل جذب ورودی، فشار جذب و دمای آب سرد ورودی -- را بر فرایند جذب بخار توسط محلول لیتیم بروماید بر روی لوله‌ی قائم مورد بررسی قرار داده‌اند، و نشان داده‌اند که تأثیر گازهای قابل جذب می‌تواند بسیار چشم‌گیر باشد. شرایط کارکرد در این آزمایشات عبارت است از: فشار جذب ۱۷۳ kpa، عدد رینولدز ۱۰۰، دمای آب سرد: ۳۵°C و غلظت لیتیم بروماید در ورودی ۶۲٪ است. این محققین در پایان بیان می‌کنند که چنانچه دمای آب سرد ورودی: ۳۵°C، و غلظت مولی ۲۰٪ هوا باشد، شار جرم جذبی در ورودی ۶۱٪ کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۳^۳ طراحی جدیدی برای جاذب تشریح شده است^[۹] که در آن جریان فیلم از نظر تماس با سطح جامد معکوس می‌شود. سطح جامد به وسیله‌ی لوله‌هایی که به‌طور افقی به آن متصل شده‌اند و به‌طور تناوبی سرد می‌شود. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که استفاده از تعداد زیادی از این معکوس‌کننده‌ها موجب افزایش شدت بخار جذبی می‌شود؛ همچنین مدل‌سازی آزمایشگاهی برای دو حالت فرایند جذب بر روی دسته لوله و طرح جدید صفحات معکوس شونده نشان می‌دهد که فرایند جذب در مدل جدید ۱۰۰٪ افزایش یافته است.

در ادامه، در سال ۲۰۰۵^۴ پدیده‌ی انتقال حرارت و انتقال جرم بر روی لوله قائم با استفاده از روش جدیدی مبتنی بر دمای متوسط لگاریتمی و اختلاف غلظت بررسی شد.^[۱۰] در آن مطالعه، با فرض توزیع خطی دمای آب سرد، توزیع خطی غلظت در داخل فیلم، و همچنین برقراری تعادل در فصل مشترک بخار و محلول نتایجی به دست آمد که مقایسه‌ی آنها با نتایج حاصل از حل عددی ارائه شده توسط دیگر محققین هم‌خوانی نسبتاً خوبی داشته است.

در این تحقیق با استفاده از روش عددی، هیدرودینامیک و فرایندهای انتقال حرارت و جرم در فیلم ریزشی محلول لیتیم بروماید بر روی یک صفحه‌ی قائم در

مجاورت بخار آب، و با در نظر گرفتن تغییرات خواص به صورت تابعی از دما و غلظت، تغییر ضخامت فیلم در اثر جذب بخار، حضور سرعت عمود بر راستای جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات حاکم بر فرایند جذب

در فیلم ریزشی بدون حضور امواج، که برای اغلب محاسبات مهندسی در طراحی مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، رینولدز جریان پائین و سطح فیلم بدون موج است. بنابراین می‌توان جریان فیلم را دائمی فرض کرد و با توجه به این که u از مرتبه‌ی بزرگی جریان ورودی u_{in} ، از مرتبه‌ی بزرگی طول صفحه L و y از مرتبه‌ی بزرگی ضخامت فیلم δ است، و با استفاده از معادله‌ی پیوستگی می‌توان به این نتیجه رسید که سرعت در راستای عمود بر جریان v دارای بزرگی $u_{in}\delta/L$ خواهد بود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مقیاسی و این که طول مشخصه‌ی جریان در جهت y بسیار کوچک‌تر از طول مشخصه‌ی جریان در جهت x است و در بسیاری از بررسی‌های تحلیلی صورت‌گرفته نشان داده شده است که $\delta/L < 0.1$ است، می‌توان از اثرات مقدار حرکت و فشار در مقایسه با نیروهای لزجت و نیروهای ثقلی صرف‌نظر کرد.^[۱۱] در این صورت معادلات هیدرودینامیک فیلم به روابط ۱ و ۲ ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\rho g \quad (2)$$

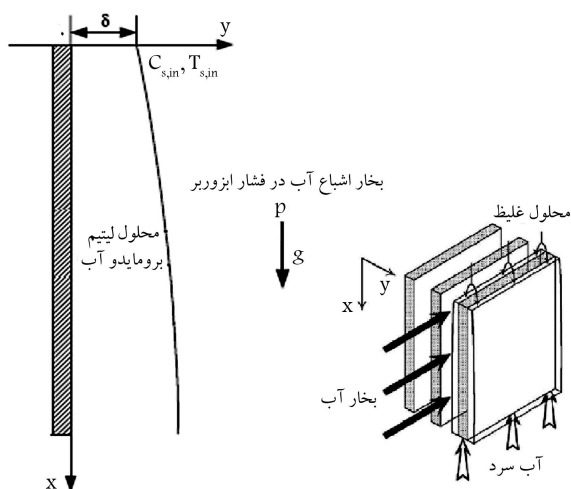
شرایط مرزی معادله‌ی ۲ با توجه به شکل ۱ عبارت است از: عدم لغزش بر روی صفحه و عدم حضور تنش برشی بر روی سطح تماس فیلم و بخار.

$$y = 0 \quad u = 0 \quad (3\text{الف})$$

$$y = \delta \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (3\text{ب})$$

با حل معادله‌ی ۲ و با استفاده از شرایط مرزی ۳الف و ۳ب، رابطه‌ی ۴ برای سرعت در راستای صفحه‌ی قائم به دست می‌آید:

$$u = \frac{g\delta^2}{2\nu} \left[2 \left(\frac{y}{\delta} \right) - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad (4)$$



شکل ۱. سیستم مختصات به‌کار رفته در این مدل‌سازی.

و براساس قانون انتقال حرارت فیک در سطح تماس رابطی ۱۵ حاصل می‌شود.

$$x \geq x_i \quad \& \quad y = \delta \quad \dot{m} = \frac{\rho D}{\omega_{surf}} \frac{\partial \omega}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \quad (15)$$

حرارت تولیدشده ناشی از فرایند جذب بخار در سطح فیلم محلول لیتیم بروماید - آب برابر خواهد بود با:

$$q = \dot{m} h_{fg} \quad (16)$$

با توجه به این که ضخامت فیلم بسیار کوچک و جریان دارای رژیم آرام است، سازوکار اصلی انتقال حرارت در جهت y (انتقال انرژی از سطح تماس فیلم محلول لیتیم بروماید - آب و بخار آب به سطح لوله) سازوکار نفوذ است. بنابراین رابطی ۱۷ بر شار حرارتی حاکم خواهد بود:

$$x \geq x_i \quad \& \quad y = \delta \quad q = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \quad (17)$$

فیلم محلول لیتیم بروماید - آب با دما و غلظت مشخصی وارد محدوده‌ی جریان می‌شود. بنابراین شرایط ورودی جریان عبارت است از:

$$x = x_i \quad \& \quad 0 \leq y \leq \delta \quad T = T_{in}, \omega = \omega_{in} \quad (18)$$

برای تعیین توزیع دما و غلظت در میدان جریان، حل هم‌زمان معادلات انتقال حرارت و انتقال جرم ضرورت می‌یابد. به منظور ساده‌سازی روش حل معادلات فوق از هندسه‌ی منطبق بر فیزیک مسئله استفاده می‌شود. این تبدیل مختصات به منظور تبدیل محدوده‌ی محاسباتی نسبتاً پیچیده‌ی جریان در مختصات فیزیکی به یک محدوده‌ی محاسباتی عددی است. نحوه‌ی تعیین پارامترهای تبدیل عبارت است از:

$$\eta = \frac{y}{\delta(x)}, \quad \varepsilon = \frac{x}{L} \quad (19)$$

با استفاده از پارامترهای ارائه شده در رابطی ۱۹ معادلات انتقال حرارت و جرم و شرایط مرزی حاکم بر آنها در ناحیه‌ی محاسباتی تبدیل می‌شوند به:

$$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} + \left(\frac{\nu L}{u \delta} - \frac{\eta}{\delta} \frac{d\delta}{d\varepsilon} \right) \frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{\alpha L}{u \delta^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \varepsilon} + \left(\frac{\nu L}{u \delta} - \frac{\eta}{\delta} \frac{d\delta}{d\varepsilon} \right) \frac{\partial \omega}{\partial \eta} = \frac{\alpha L}{u \delta^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} \quad (21)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_i \quad \& \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad T = T_{in}, \omega = \omega_{in} \quad (22)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_i \quad \& \quad \eta = 0 \quad \begin{cases} T = T_w \\ \frac{\partial \omega}{\partial \eta} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_i \quad \& \quad \eta = 1 \quad \begin{cases} T = T_{surf}(\omega_{surf}, p) \\ \omega = \omega_{surf} \\ \dot{m} = \frac{\rho D}{\delta \omega_{surf}} \frac{\partial \omega}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} \\ q = \dot{m} h_{fg} = -\frac{k}{\delta} \frac{\partial T}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} \end{cases} \quad (24)$$

و نیز میدان سرعت در ناحیه‌ی محاسباتی تبدیل می‌شود به:

$$u = \left(\frac{9 \Gamma^2 g}{\mu \rho} \right)^{1/2} \left[\eta - \frac{1}{2} \eta^2 \right] \quad (25)$$

$$\nu = - \left(\frac{1}{2 \rho L} \right) \eta^2 \frac{d\Gamma}{d\varepsilon} \quad (26)$$

با استفاده از معادله‌ی بقاء جرم، مؤلفه‌ی عمودی سرعت نیز طبق رابطی ۵ به دست می‌آید:

$$\nu = - \int \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad (5)$$

با قراردادن u (از معادله‌ی ۴) در معادله‌ی ۵ و انتگرال‌گیری از آن، رابطی ۶ حاصل می‌شود:

$$\nu = - \frac{g y^2}{2 \nu} \frac{d\delta}{dx} \quad (6)$$

دبی جرمی جریان فیلم ریزشی از رابطی ۷ به دست می‌آید:

$$\Gamma = \int_0^\delta \rho u(x, y) dy \quad (7)$$

با قرار دادن u از معادله‌ی ۴ در معادله‌ی ۷ و انتگرال‌گیری از آن، رابطی ۸ برای دبی جرمی استخراج خواهد شد:

$$\Gamma = \frac{\rho^2 g \delta^3}{3 \mu} \quad (8)$$

می‌توان از رابطی ۸ برای به دست آوردن ضخامت فیلم استفاده کرد:

$$\delta = \left(\frac{3 \Gamma \nu}{g \rho_s} \right)^{1/2} \quad (9)$$

عدد رینولدز جریان ریزشی فیلم نیز به صورت رابطی ۱۰ تعریف می‌شود:

$$Re_f = \frac{\rho \Gamma}{\mu} \quad (10)$$

از اتلاف ناشی از لزجت سیال و نرخ تولید حرارت و جرم در واحد حجم صرف نظر می‌شود. از آنجا که جریان فیلم ثقلی آرام وابسته به زمان نیست و جملات نفوذ در جهت x نسبت به بقیه‌ی جملات قابل اغماض اند، معادلات نهایی مطابق رابطی ۱۱ و ۱۲ خلاصه می‌شوند:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (11)$$

$$u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \nu \frac{\partial \omega}{\partial y} = D \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \quad (12)$$

با توجه به غیر قابل نفوذ بودن سطح دیوار و مشخص بودن دمای آن، شرط مرزی در مجاورت دیوار عبارت خواهد بود از:

$$x \geq x_i \quad \& \quad y = 0 \quad \begin{cases} T = T_w \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

دمای سطح فیلم توسط شرایط اشباع در غلظت سطح آزاد و فشار جاذب تعیین می‌شود. بنابراین شرایط مرزی سطح آزاد فیلم چنین خواهد بود:

$$x \geq x_i \quad \& \quad y = \delta \quad \begin{cases} T = T_{surf}(\omega_{surf}, p) \\ \omega = \omega_{surf} \end{cases} \quad (14)$$

ارائه‌ی روش حل

سیستم معادلات پارابولیک فوق با استفاده از روش تفاضلات محدود ضمنی و با دقت مرتبه ۱ در راستای جریان و مرتبه ۲ در راستای عمود بر جریان حل می‌شود. از آنجا که معادلات انتقال حرارت و جرم وابسته به هم هستند (این وابستگی توسط رابطه‌ی ۲۴ ارائه شده است) برای حل نیاز به استفاده از یک روش سعی و خطا است. الگوریتم حل بدین ترتیب است که ابتدا جرم جذبی m_{abs} در مقطع i حدس زده می‌شود، سپس با استفاده از رابطه‌ی دبی جرمی و ضخامت فیلم، ابتدا ضخامت فیلم محلول، و سپس میدان‌های سرعت محاسبه می‌شوند. بعد از محاسبه‌ی میدان‌های سرعت، معادله‌ی حاکم بر میدان دما حل، و سپس با استفاده از رابطه‌ی تعادلی محلول لیتیم بروماید در فصل مشترک بخار و محلول، غلظت محلول در فصل مشترک محاسبه می‌شود. با استفاده از این شرط مرزی، معادله‌ی حاکم بر توزیع غلظت حل می‌شود. با به دست آوردن توزیع غلظت و رابطه‌ی فیک میزان جرم جذبی جدید (m'_{abs}) به دست می‌آید که به منظور کنترل میزان جرم جذبی شرط همگرایی $|m'_{abs} - m_{abs}|/m_{abs}$ در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که این مقدار کم‌تر از 10^{-6} باشد، یا تعداد تکرارها از مقدار 200 بیشتر و میزان معیار همگرایی فوق کم‌تر از 10^{-2} باشد حل برای مقطع جدید آغاز خواهد شد، اما اگر هیچ‌یک از این دو شرط برقرار نباشد مقدار جرم جذبی حدسی m_{abs} جایگزین مقدار $\alpha m'_{abs} + (1 - \alpha)m_{abs}$ می‌شود (α ضریب اصلاحی جرمی است).

تأثیر شبکه بندی بر حل

اولین گام برای ارائه‌ی نتایج مسئله‌ی بی که با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شود، بررسی تأثیر شبکه بر نتایج است -- رسیدن به شبکه‌ی مناسب که تأثیری بر نتایج نداشته باشد و اصطلاحاً مسئله مستقل از شبکه شود. در این مسئله نیز با ایجاد N گره در راستای x و M گره در راستای y به بررسی این مهم پرداخته شده است.

به منظور بررسی تأثیر شبکه بر نتایج، جرم جذبی که در واقع حساس‌ترین پارامتر مسئله است و بقیه‌ی پارامترهای مسئله (نظیر توزیع دما، غلظت و سرعت) که مستقیماً یا غیر مستقیم بر آن اثر دارند، به عنوان ابزار کنترلی منظور شده‌اند. به همین منظور شبکه‌بندی‌های 10×50 ، 20×100 ، 40×200 ، 80×400 ، 160×800 ،

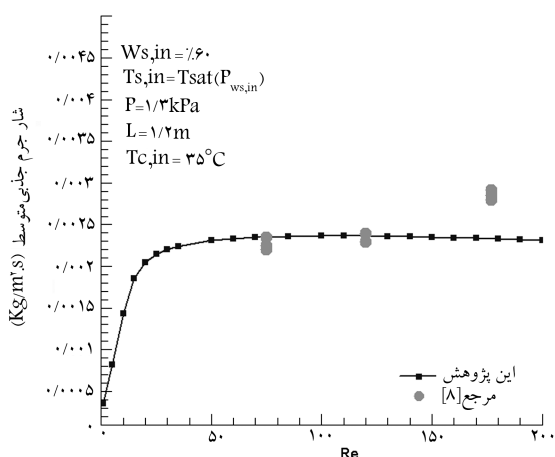
320×1600 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجا که جرم جذبی در شبکه‌بندی 160×800 از شبکه مستقل می‌شود (شکل ۲)، برای حل مسئله از این شبکه‌بندی استفاده شده است.

مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود

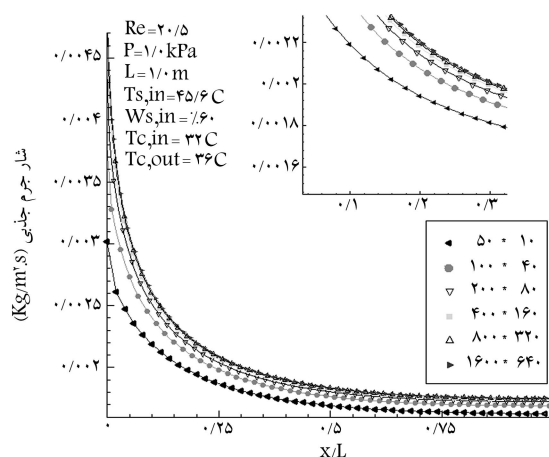
پس از بررسی تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج حاصل از حل و انتخاب شبکه‌بندی مناسبی که نتایج را مستقل از شبکه سازد، نوبت مقایسه‌ی نتایج با نتایج تجربی موجود است تا میزان اعتبار حل ارائه‌شده و درصد صحت فرضیات در نظر گرفته شده تعیین شود. به همین منظور نتایج به دست آمده از حل عددی را تحت شرایط: طول میبدل 1.75 متر، فشار جاذب 1.3 kPa ، دمای محلول ورودی دمای اشباع در شرایط غلظت ورودی 60% و فشار جذب و دمای سیال خنک‌کننده‌ی ورودی 35°C مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). چنان‌که مشاهده می‌شود در رینولدزهای بالای 150 ، به علت ایجاد امواج و عدم اعتبار فرض جریان آرام نتایج عددی و تجربی مطابقت لازم را ندارند، ولی در اعداد رینولدز پایین‌تر از 150 فرض جریان آرام قابل قبول بوده و این نتایج به خوبی با هم مطابقت دارند.

در اعداد رینولدز پایین انتقال هدایتی حرارت بر جابه‌جایی برتری دارد. با افزایش عدد رینولدز تأثیر جابه‌جایی افزایش می‌یابد تا جایی که انتقال حرارت به صورت جابه‌جایی به طور کامل بر انتقال حرارت هدایتی غالب می‌شود. چنان‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در اعداد رینولدز بالا افزایش عدد رینولدز بر فرایند جذب بی تأثیر می‌شود. این نکته را می‌توان چنین توضیح داد که در اعداد رینولدز پایین -- چنان که پیش‌تر هم اشاره شد -- انتقال حرارت به واسطه‌ی هدایت غالب است و غلظت و دمای فصل مشترک مجال نفوذ تا نزدیک دیوار را خواهد داشت. با افزایش عدد رینولدز پدیده‌ی جابه‌جایی مولکول‌ها در جهت جریان مانع از نفوذ مولکولی در جهت عمود بر جریان شده و تغییرات غلظت در نوار باریکی در ناحیه‌ی فصل مشترک محلول و بخار آب محدود می‌شود. این امر باعث تثبیت میزان جرم جذبی می‌شود.

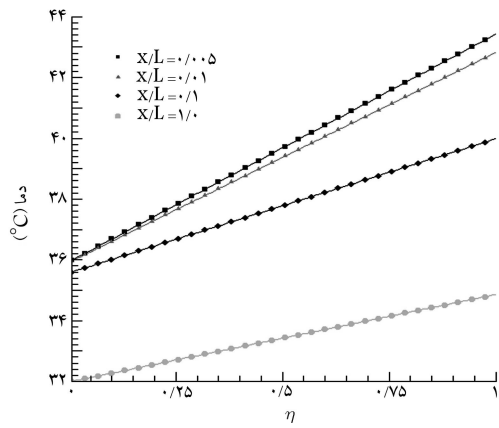
شار جرم جذبی نیز به صورت تابعی از دمای سیال خنک‌کننده‌ی ورودی با نتایج تجربی موجود [۸] مقایسه شده است. چنان‌که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نتایج تجربی با نتایج عددی به خوبی همخوانی دارند و این بیان‌گر این نکته است که



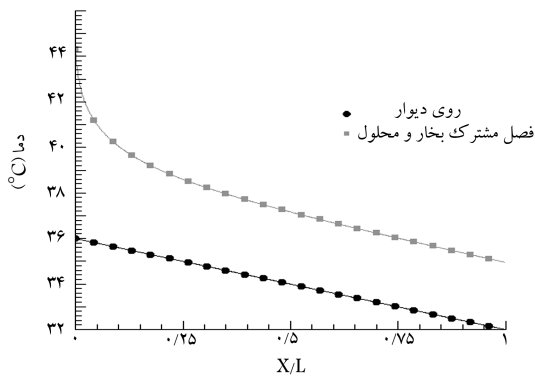
شکل ۳. بررسی تأثیر رینولدز محلول بر فلاکس جرم جذبی و مقایسه با نتایج تجربی ارائه‌شده در مرجع [۸].



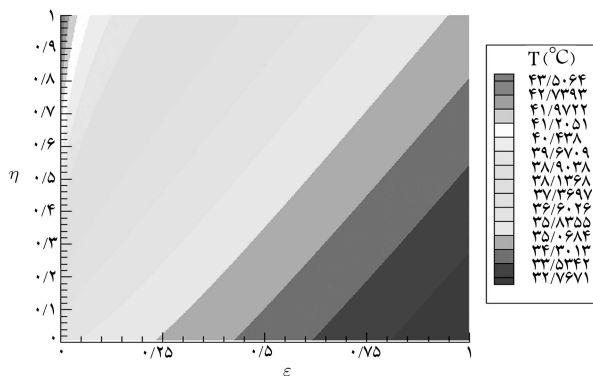
شکل ۴. بررسی تأثیر شبکه بر نتایج به منظور رسیدن به شرایط استقلال نتایج از شبکه بندی.



شکل ۵. پروفیل دما در مقاطع مختلف در راستای جریان فیلم.



شکل ۶. پروفیل دما در فصل مشترک و سطح دیوار.

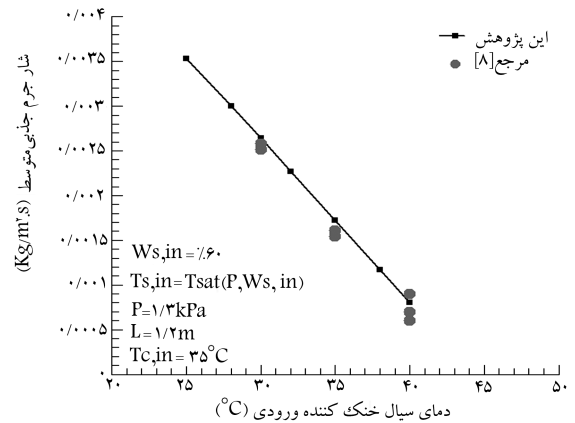


شکل ۷. توزیع دما در محلول لیتیم بروماید و آب تحت شرایط $Re = 20/5$.

در شکل ۶ دمای سطح دیوار و فصل مشترک فیلم با بخار نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، بالابودن اختلاف دما در ورودی عامل مؤثری در انتقال حرارت است. ضریب انتقال حرارت محلی در ورودی بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۱۴). توزیع دما در فیلم ریزشی محلول (شکل ۷) مؤید مطالب ارائه شده فوق است.

پروفیل و کانتور غلظت در محلول لیتیم بروماید و آب

در شکل ۸ پروفیل غلظت محلول لیتیم بروماید و آب در مقاطع مختلف رسم شده



شکل ۴. بررسی تأثیر دمای سیال خنک‌کننده در ورودی بر شار جرم جذبی و مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۸].

فرضیه‌هایی که به منظور ساده کردن معادلات حاکم بر انتقال مقدار حرکت و انتقال حرارت و جرم در نظر گرفته شده دور از واقعیت نبوده و با خطای بسیار ناچیزی قابل قبول است. همچنین نتایج حاصل از این روش عددی را می‌توان در طراحی این‌گونه مبدل در جاذب به‌کار برد.

بررسی و تفسیر نتایج در حالت خاص

به منظور بررسی نتایج، شرایطی که از آن به عنوان محتمل‌ترین نقطه‌ی کاری جاذب نام برده می‌شود [۱۱-۱۳] به عنوان شرایط ورودی مسئله در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

پروفیل و کانتور دما در محلول لیتیم بروماید و آب

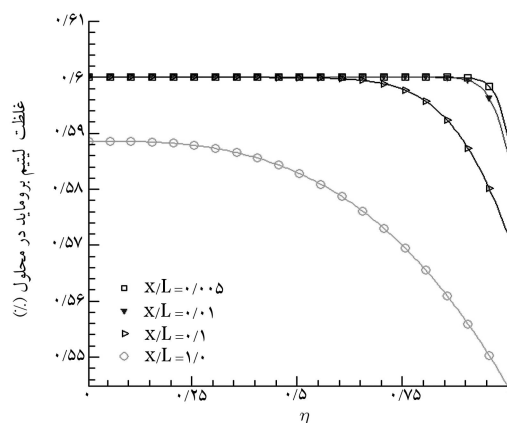
شکل ۵ پروفیل دما در مقاطع عرضی مختلف را نمایش می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود در محدوده‌ی عملکرد ارائه شده در جدول ۱ توزیع دما خطی است و این بیان‌گر این واقعیت مهم است که تحت این شرایط انتقال حرارت هدایتی بر جابه‌جایی غالب است و فرضیه‌های مورد نظر محققین پیشین در ارتباط با در نظر گرفتن پروفیل خطی و استفاده از روش پروفیل حدسی در شرایطی که عدد رینولدز جریان پایین باشد [۱۳] در از واقعیت نیست و می‌توان از جابه‌جایی در مقابل هدایت در اعداد رینولدز پایین چشم‌پوشی کرد. [۱۲]

جدول ۱. شرایط عملکرد جاذب صفحه‌ی قائم. [۱۱-۱۳]

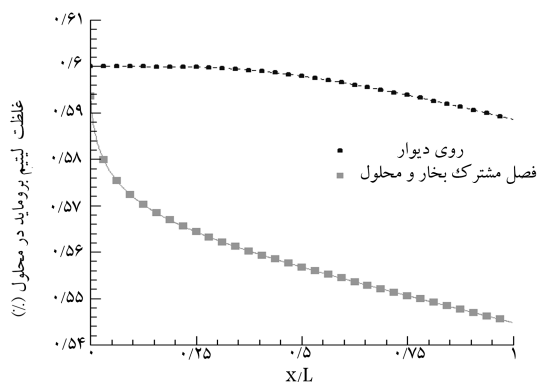
مقدار کمیت	پارامتر
$1/0$	طول صفحه (m)
$1/0$	فشار عملکرد جاذب (kpa)
$45/6$	دمای محلول ورودی $T_{s,in} [^{\circ}C]$
$0/60$	غلظت محلول در ورودی $\omega_{s,in}$
32	دمای سیال خنک‌کننده ورودی $T_{c,in} [^{\circ}C]$
36	دمای سیال خنک‌کننده خروجی $T_{c,out} [^{\circ}C]$
$20/5$	رینولدز محلول در ورودی Re_f

در نظر گرفتن تغییرات خواص و دیگری فرایند جذب که باعث افزایش دبی جریان متناسب با فرایند جذب (که در ورودی بیشترین مقدار را دارد) می‌شود. این عامل در ورودی تأثیر زیادی دارد و به تدریج اثر آن ناچیز می‌شود، ولی عامل اول -- وابستگی تغییرات خواص به توزیع دما و غلظت -- تأثیر پیچیده‌تری بر سرعت دارد. سرعت در راستای عمود بر صفحه (چنان‌که از روابط استخراج شده مشاهده می‌شود) فقط وابسته به جرم جذبی است؛ به همین دلیل در ورودی بیشترین مقدار خود را اتخاذ می‌کند.

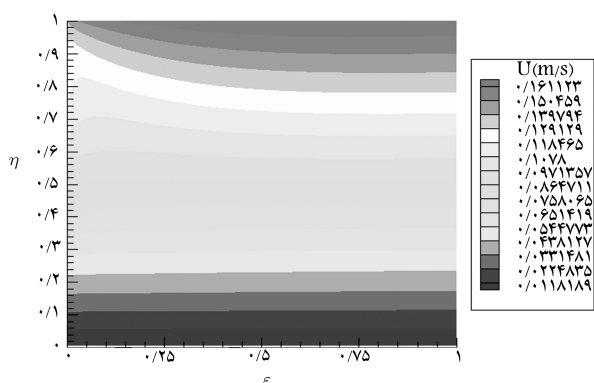
از مقایسه‌ی دو کانتور سرعت استخراج شده (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت در راستای جریان به‌طور متوسط حدود 10° برابر بزرگ‌تر



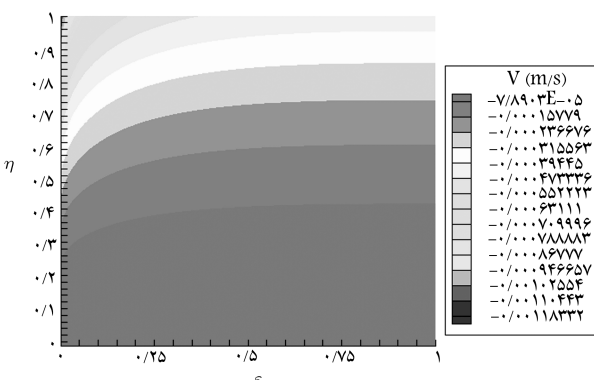
شکل ۸. پروفیل غلظت در مقاطع مختلف در راستای جریان فیلم.



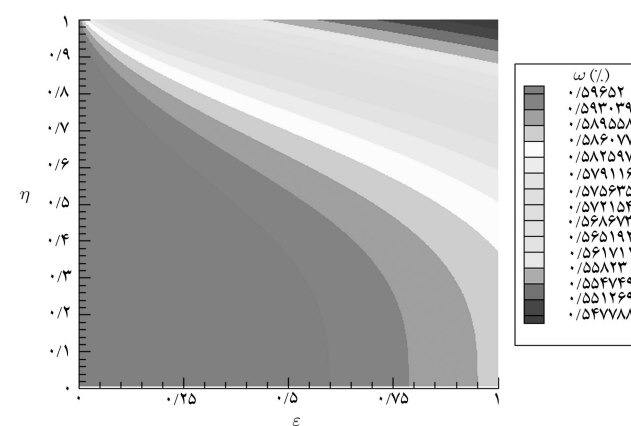
شکل ۱۰. پروفیل غلظت در فصل مشترک و سطح دیوار.



شکل ۱۱. توزیع سرعت در راستای جریان u در محلول لیتیم بروماید و آب تحت شرایط $Re = 20.5$.



شکل ۱۲. توزیع سرعت در راستای عمود بر جریان v در محلول لیتیم بروماید و آب تحت شرایط $Re = 20.5$.

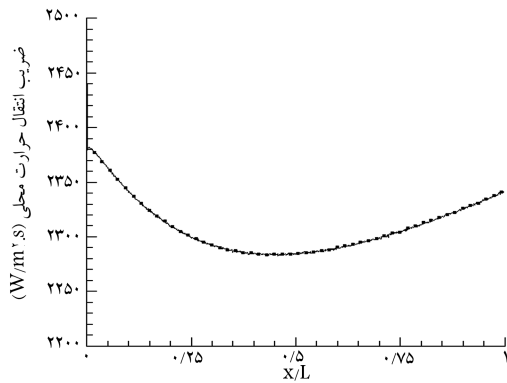


شکل ۹. توزیع غلظت در محلول لیتیم بروماید و آب تحت شرایط $Re = 20.5$.

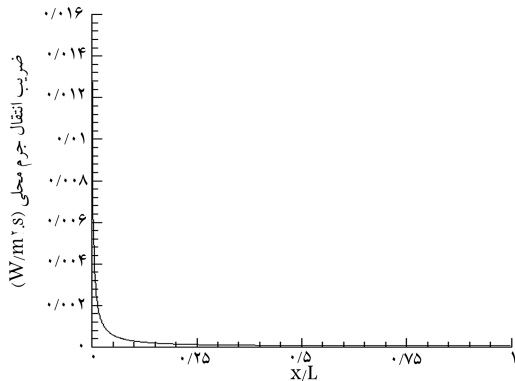
است. چنان‌که مشاهده می‌شود و قابل پیش‌بینی است، با دور شدن از ورودی تغییرات غلظت نفوذ بیشتری در فیلم خواهد داشت تا آنجا که تغییرات غلظت به سطح دیوار نیز نفوذ کرده است. این موضوع را می‌توان به‌وضوح در پروفیل غلظت ارائه‌شده در شکل ۹ مشاهده کرد. یکی از تفاوت‌های میدل حرارتی صفحه‌ی تخت قائم و لوله‌ی افقی در این مطلب است که در لوله‌ی افقی به‌علت کوتاه‌بودن مسیر پیمایش محلول، تغییرات غلظت به سطح دیوار نفوذ نمی‌کند (این تغییرات محدود به ناحیه‌ی بسیار کوچکی از سطح تماس محلول لیتیم بروماید و بخار آب است) ولی در میدل صفحه‌ی قائم تغییرات غلظت تا سطح دیوار نفوذ می‌کند. همین نکته ممکن است یکی از دلایل افزایش انتقال حرارت در سطح، در میانه‌های صفحه باشد. از آنجا که خواص تابعی از دما و غلظت هستند، تغییرات غلظت باعث تغییر در خواص می‌شود که خود می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر تغییرات پارامترهای فرایند جذب باشد. در شکل ۸ پروفیل غلظت در مقاطع مختلف، و در شکل ۱۰ تغییرات غلظت سطح تماس محلول لیتیم بروماید و بخار و سطح دیوار نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود اختلاف تدریجاً کاهش می‌یابد.

کانتورهای سرعت در محلول لیتیم بروماید و آب

از معادلات استخراج شده برای سرعت در راستای صفحه چنین درمی‌یابیم که سرعت فقط تابعی از y بوده و مستقل از x است؛ ولی چنان‌که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود سرعت به راستای x نیز وابسته است که از دو عامل نشأت می‌گیرد: یکی



شکل ۱۴. ضریب انتقال حرارت محلی تحت شرایط $Re = 2075$.



شکل ۱۵. ضریب انتقال جرم محلی تحت شرایط $Re = 2075$.

ضریب انتقال جرم جذبی محلی

به منظور بررسی ضریب انتقال جرم جذبی محلی از رابطه‌ی ۲۹ استفاده می‌شود:

$$h_m = \frac{-D \frac{\partial \omega}{\partial y} \Big|_{y=\delta}}{\omega_w - \omega_b} = \frac{-\dot{m}_{abs}}{\rho(\omega_w - \omega_b)} \quad (29)$$

که در آن غلظت بالک در هر مقطع چنین تعریف می‌شود:

$$\omega_b = \int_{y=0}^{\delta} u \omega dy \Big/ \int_{y=0}^{\delta} u dy \quad (30)$$

تحت شرایط ارائه شده در جدول ۱، تغییرات ضریب انتقال جرم جذبی محلی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. چنان که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود جرم جذبی در منطقه‌ی ورودی بیشترین مقدار خود را اتخاذ می‌کند و در طول صفحه کاهش می‌یابد. از آنجا که ضریب انتقال جرم جذبی محلی تابعی از جرم جذبی است مطابق انتظار، ضریب جذب محلی بخار نیز در ورودی بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد ولی در طول میبدل به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۱۵). این نکته از این حقیقت نشأت می‌گیرد که محلول لیتیم بروماید و آب در ورودی بیشتری تمایل -- و به عبارت دیگر بیشترین پتانسیل جذب -- را دارد و رفته رفته با انجام فرایند جذب این پتانسیل، و متقابلاً جرم جذبی و ضریب انتقال جرم جذبی محلی نیز کاهش می‌یابد.

از سرعت جریان در راستای عمود بر صفحه است، و این بیان‌گر این مطلب بسیار مهم است که در رینولدزهای پایین می‌توان از سرعت در راستای عمود بر صفحه با خطای ناچیز در نتایج چشم پوشید، ولی این خطا با افزایش رینولدز فیلم افزایش می‌یابد.

شار جرم جذبی

به علت تمایل بالای محلول لیتیم بروماید و آب غلیظ به جذب بخار آب، میزان جذب در ورودی بیشترین مقدار را دارد (شکل ۱۳) و گرادیان در راستای جریان جذب بخار در این ناحیه بسیار بالا است. هرچه فاصله از ورودی بیشتر می‌شود این گرادیان کاهش می‌یابد که دلیل آن تمایل پایین محلول رقیق به جذب بخار است.

با بررسی دقیق معادله‌ی استخراج شده برای سرعت در راستای جریان (معادله‌ی ۴)، مشاهده می‌شود که دو عامل باعث متفاوت بودن پروفیل سرعت در هر مقطع از مقطع دیگر است: ۱. ضخامت فیلم که در هر موقعیت در راستای x مقدار مشخصی دارد؛ ۲. خواص محلول که در موقعیت وابسته به دما و غلظت است. ترکیب این دو عامل باعث می‌شوند که پروفیل سرعت تابعی از موقعیت مکانی x باشد (شکل ۱۱).

ضریب انتقال حرارت محلی

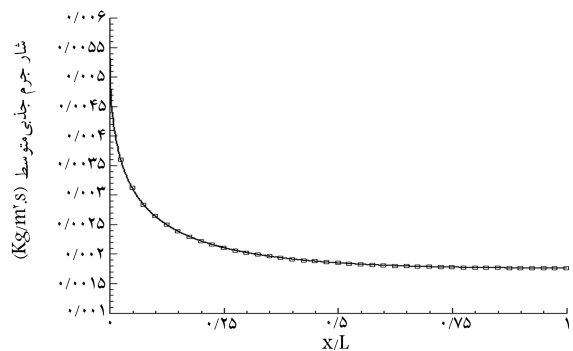
به منظور بررسی ضریب انتقال حرارت جذبی محلی از رابطه‌ی ۱۷ استفاده می‌شود:

$$h_t = \frac{k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=0}}{T_b - T_w} = \frac{\dot{q}_{wall}}{T_b - T_w} \quad (27)$$

که در آن دمای بالک چنین تعریف می‌شود:

$$T_b = \int_{y=0}^{\delta} u T dy \Big/ \int_{y=0}^{\delta} u dy \quad (28)$$

تحت شرایط ارائه شده در جدول ۱، به دلیل بالابودن اختلاف دما بین سیال در ورودی و دیوار که در واقع نشان‌گر پتانسیل انتقال حرارت است، ضریب انتقال حرارت در ورودی دارای بیشترین مقدار است ولی رفته رفته کاهش می‌یابد و در محلی که دمای سطح مشترک به سطح دیوار نفوذ می‌کند روندی صعودی به خود می‌گیرد (شکل ۱۴).



شکل ۱۳. تغییرات شار جرم جذبی در طول جاذب.

بحث و نتیجه‌گیری

در پایان نتایج به دست آمده را می‌توان چنین خلاصه کرد:

- در اعداد رینولدز پایین توزیع دما در محلول خطی است و می‌توان از پروفیل حدسی خطی برای حل معادله‌ی انتقال حرارت استفاده کرد.
- هرچه فاصله از ورودی بیشتر می‌شود تغییرات غلظت در محلول بیشتر نفوذ می‌کند تا جایی که تغییر غلظت در سطح دیوار هم مشاهده می‌شود و این یکی از دلایل افزایش ضریب انتقال حرارت در نواحی میانی صفحه است.
- توزیع سرعت در راستای جریان در دو جهت مختصاتی تغییر می‌کند که علت آن تغییرات خواص و افزایش ضخامت فیلم محلول است.
- سرعت عمود بر راستای جریان به دلیل بیشینه‌ی تغییرات جرم جذبی در ناحیه‌ی ورودی در این ناحیه بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد.
- در ضریب انتقال جرم و شار جرم جذبی در راستای جریان به دلیل کاهش پتانسیل جذب بخار افت نسبتاً شدیدی مشاهده می‌شود.
- ضریب انتقال حرارت به دلیل نفوذ تغییرات غلظت تا سطح دیوار در نواحی میانی صفحه به بعد روند صعودی دارد. با توجه به نتایج حاصله، و مطابقت نتایج مدل‌سازی و تجربی درمی‌یابیم که این مدل را می‌توان با قابلیت اطمینان خوبی در طراحی جاذب صفحه تخت استفاده کرد.

- T : دمای محلول ($^{\circ}C$)
 P : فشار ایزریشن (Pa)
 Γ : شدت جریان فیلم ($kg/m.s$)
 m_{abs} : شار جرم جذبی ($kg/m^2.s$)
 M_{abs} : شار جرم جذبی متوسط ($kg/m^2.s$)
 q : شار حرارتی (W/m^2)
 k : ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$)
 D : ضریب نفوذ جرمی (m^2/s)
 h_{fg} : گرمای جذب در واحد جرم (J/kg)
 L : طول صفحه (m)
 M : تعداد گره‌ها در جهت ε
 N : تعداد گره‌ها در جهت η
 ε : محور بدون بعد در راستای x
 H : محور بدون بعد در راستای y
 ω : غلظت نمک لیتیم برروماید در محلول (%)
 δ : ضخامت فیلم محلول (m)
 ρ : چگالی محلول (kg/m^3)
 μ : گرانروی محلول ($kg/m.s$)
 α : ضریب نفوذ حرارتی محلول (m^2/s)

علائم

- x : محور در جهت جریان (m)
 y : محور در جهت عمود بر جریان (m)
 u : سرعت در جهت x (m/s)
 v : سرعت در جهت y (m/s)
 g : شتاب جاذبه (m/s^2)

زیر نویس‌ها

- in : ورودی
 w : دیوار
 $surf$: سطح تماس فیلم و بخار آب
 e : تعادل
 abs : جاذب
 s : محلول

پانویس

1. chiller
2. evaporator
3. fick

منابع

1. Kevin, D., and Rafferty, P. *Absorption refrigeration, Geo-Heat Center*, chapter 13, pp. 300-330 (2003).
2. killion, J.D., and Garimella, S. "A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption", *International Journal of Refrigeration*, **29**, pp. 755-797 (2001).
3. Nakoryakov, V.E., and Grigoreva, N.I. "Combined heat and mass transfer during absorption in drops and film", *Journal of Engineer Physics*, **32**(3), pp. 243-247 (1977).
4. Grigoreva, N.I., and Nakoryakov, V.E. "Exact solution combined heat and mass transfer problem during film absorption", *Journal of Engineer Physics*, **33**(5), pp. 1349-1353 (1977).
5. Habib, H.M., and Wood, B.D. "Simultaneous heat and mass transfer for a falling film absorber- the two phase flow problem, solar energy engineering", *Proceedings of the 12th Annual International Solar Energy Conference*, ASME, pp. 61- 67 (1990).
6. Patankar, S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*, New York, Hemisphere Publication Corp. (1980).
7. Andberg, J.W., and Vlient, G.C. "Nonisothermal absorption of gases in to falling liquid films", ASME-JSME

- Thermal Engineering Joint Conference Proceedings*, **2**, pp. 423-431 (1983).
8. Medrano, M.; Bourouis, M., and Coronas, A.L. "Absorption of water vapor in the falling film of water -lithium bromide inside a vertical tube at air-cooling thermal conditions", *International Journal of Thermal Science*, **41**, pp. 891- 898 (2002).
 9. Rasul Islam, M.D.; Wijesundera, N.E., and Ho, J.C. "Performance study of the falling film absorber with a film - inverting configuration", *International Journal of Refrigeration*, **26**, pp. 909-917 (2003).
 10. Fujita, I., and Hihara, E. "Heat and mass transfer coefficients of falling-film absorption process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**, pp. 2779-2786 (2005).
 11. Yang, R., and Wood, B.D. "A numerical modeling of an absorption process a liquid falling", *Solar Energy*, **48**(3), pp. 195-198 (1992).
 12. Babadi, F., and Farhsanieh, B. "Characteristics of heat and mass transfer in vapor absorption of falling film on a horizontal tube", *International communication in heat and mass transfer*, **32**, pp. 1253-1265 (2005).
 13. Rogdakis, E.D.; Papaefthimou, V.D., and Karampinos, D.C. "A realistic approach to model LiBr-H₂O smooth falling film absorption on a vertical tube", *Journal of Applied thermal engineering*, **23**, PP. 2269-2283 (2003).