

## مدل سازی سه بعدی بستر چیلرهای جذب سطحی سیلیکاژل-آب به منظور بررسی تأثیر دمای آب گرم ورودی

مهدی مهدوی خواه<sup>1</sup>، حمید نیازمند<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> کارشناس ارشد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

mmahdavikhah@yahoo.com

<sup>2</sup> استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

niazmand@um.ac.ir

دریافت مقاله: 91/2/9 اصلاحیه: 91/8/4

پذیرش مقاله: 91/12/27

**چکیده:** استفاده از منابع حرارتی به جای انرژی الکتریکی برای تولید سرمایش، مبحثی مهم در صنعت تبرید است. چیلرهای جذب سطحی، توانایی استفاده از منابع حرارتی با بازه دمایی گسترده را دارند و در بازیابی انرژی حرارتی در حال هدر رفتن بسیار کارآمد می باشند. چرخه جذب سطحی بر اساس جذب و احیای یک ماده جذب شونده در مواد جاذب که ذرات جامد متخلخل اند، کار می کند. در این مقاله، تأثیر دمای آب گرم ورودی بر عملکرد چیلر جذب سطحی سیلیکاژل-آب به وسیله مدل سازی عددی بررسی شده است. مدل سازی شامل انتقال حرارت در سیال حرارتی، لوله فلزی و پره ها و انتقال حرارت و جرم در بستر مواد جاذب است که باید به صورت هم زمان حل شوند. نتایج عددی نشان می دهد زمان چرخه با افزایش دمای آب گرم ورودی کاهش می یابد. ضریب عملکرد در دمای 50 تا 70 درجه سلسیوس با شیب زیادی افزایش می یابد و در 100 درجه سلسیوس به مقدار 0/74 می رسد، اما ظرفیت سرمایش مخصوص به صورت تقریباً خطی با افزایش دمای آب گرم ورودی افزایش می یابد.

**واژه های کلیدی:** مدل سازی، چیلر جذب سطحی، سیلیکاژل، دمای آب گرم.

## 1. مقدمه

طرح کلی یک چیلر جذب سطحی نشان داده شده است. چرخه کامل

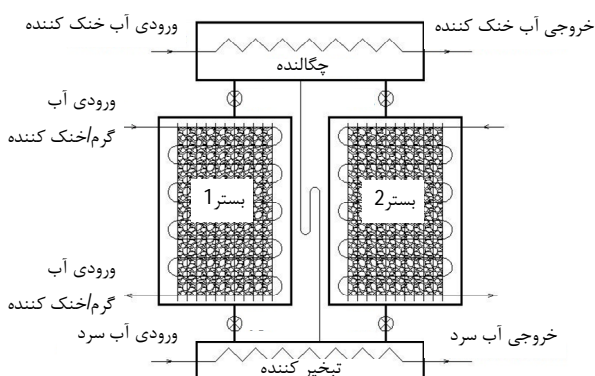
چیلر جذب سطحی از چهار مرحله تشکیل شده است:

در مرحله اول شیرهای ارتباطی بین بسترها و کندانسور و تبخیرکننده در وضعیت بسته قرار دارند. در این حالت آب گرم وارد لوله فلزی بستر سمت چپ شده و با احیای سیال عامل موجود در ذرات جاذب، فشار بستر تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد. در همین لحظه، آب سرد وارد لوله فلزی بستر سمت راست می‌شود و با جذب سیال عامل در ذرات جاذب، فشار بستر تا فشار تبخیرکننده پایین می‌آید.

در مرحله دوم، شیر ارتباطی بین بستر سمت چپ و کندانسور و شیر بین بستر سمت راست و تبخیرکننده باز می‌شود. گرم کردن بستر سمت چپ و سرد کردن بستر سمت راست ادامه می‌یابد. سیال احیاشده در بستر سمت چپ با عبور از کندانسور تقطیر می‌شود و با گذشتن از شیر اختناق فشار آن کم می‌شود و سپس وارد تبخیرکننده می‌گردد. سیال عامل در تبخیرکننده، گرمای نهان خود را از سیال داخل لوله‌های تبخیرکننده می‌گیرد و تبخیر می‌شود. این امر باعث تولید سرمایش در تبخیرکننده می‌گردد. بخار تولیدی در تبخیرکننده وارد بستر سمت راست شده، جذب ذرات جاذب می‌شود. پس از اینکه هر دو بستر تقریباً به حالت اشباع رسیدند، مرحله دوم پایان می‌یابد.

مرحله سوم عکس مرحله اول است و آب گرم وارد لوله فلزی بستر سمت راست، و آب سرد وارد لوله فلزی بستر سمت چپ می‌شود. در این مرحله با جذب سیال عامل در ذرات جاذب، فشار بستر سمت چپ تا فشار تبخیرکننده کاهش می‌یابد.

مرحله چهارم، عکس مرحله دوم است و به این ترتیب یک چرخه کامل خواهد شد.



شکل (1): طرح کلی از اجزای چیلر جذب سطحی

چیلرهای جذبی را می‌توان به دو دسته کلی جذب حجمی<sup>1</sup> و جذب سطحی<sup>2</sup> تقسیم‌بندی کرد. چیلرهای جذب حجمی با وجود برتری‌های فراوانی که نسبت به چیلرهای تراکمی دارند، خود عیب‌هایی دارند. در سال‌های اخیر به چرخه‌هایی که اساس کار آن‌ها جذب سطحی می‌باشد، بیشتر توجه شده است. این چرخه‌ها بیشتر عیب‌های چیلرهای جذب حجمی را ندارند.

برخی از مزیت‌های چرخه جذب سطحی عبارت‌اند از:

- چیلرهای جذب سطحی می‌توانند از منابع حرارتی با گستره وسیع دمایی استفاده کنند. منابع انرژی دما پایین (حدود  $50^{\circ}\text{C}$ ) مانند انرژی خورشیدی و همچنین منابع حرارتی با دمای بالا تا  $400^{\circ}\text{C}$  را با استفاده از برخی مواد جاذب می‌توان به کار برد.

- هیچ گونه آلاینده‌ای برای محیط زیست ندارند.

- به قطعات متحرک برای به حرکت در آوردن سیال عامل نیاز

ندارند و بدون صدا و لرزش کار می‌کنند.

- در چیلرهای جذب سطحی به دلیل جامد بودن ماده جاذب، بحث بلور شدن شدن مطرح نیست. جامد بودن ماده جاذب همچنین باعث می‌شود نیاز به چرخه رقیق‌سازی و پمپ جاذب وجود نداشته باشد. مواد جذبی که معمولاً در چیلرهای جذب سطحی استفاده می‌شوند، خاصیت خوردندگی ندارند و این امر باعث افزایش عمر مبدل حرارتی استفاده شده در چیلر می‌شود.

- چیلرهای جذب سطحی به دلیل مزیت‌های ذکر شده دارای قابلیت

اطمینان بالا و هزینه تعمیر و نگهداری بسیار پایین می‌باشند.

چرخه چیلر جذب سطحی مانند چیلر تراکمی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است. کندانسور، شیر اختناق و تبخیرکننده<sup>3</sup> در هر دو نوع مشترک است. در چیلر جذب سطحی، محفظه‌های جاذب، نقش کمپرسور را ایفا می‌کنند. محفظه جاذب از مواد جامدی پر شده که می‌توانند سیالات خاصی را جذب، و مجدداً احیا کنند. این جامدات متخلخل هنگامی که سرد شوند، سیال را جذب، و با گرم شدن آن را احیا می‌کنند؛ این فرآیند به صورت تکرارپذیر انجام می‌شود. در شکل (1)،

1. Absorption
2. Adsorption
3. Evaporator

مهم ترین قسمت چیلرهای جذب سطحی، بستر ماده جذب است و طراحی این قسمت، تأثیر زیادی در عملکرد چیلر خواهد داشت. برخی از فعالیت‌ها برای مدل‌سازی بستر ماده جذب از یک مدل انتقال حرارت استفاده کرده‌اند که در آن، پدیده انتقال جرم را ناچیز فرض کرده و از تقریب توزیع فشار یکنواخت در بستر استفاده می‌کنند [1]. این مدل معادله مومنتوم را حل نکرده و از جمله جابه‌جایی در معادله انتقال حرارت صرف نظر می‌کند. در شرایطی که ارتفاع پره<sup>1</sup> ناچیز یا قطر ذرات جذب بزرگ باشد، اختلاف فشار در بستر ناچیز خواهد بود و این تقریب قابل قبول است. داگلاس و همکاران [2] با استفاده از یک مطالعه عددی در مختصات استوانه‌ای، نتایجی با حداکثر 20% خطا به دست آورده‌اند و تأثیر دمای آب گرم، آب خنک‌کننده و آب سرد شونده را بر عملکرد چیلر محاسبه کرده‌اند. در این مقاله، فشار بستر یکنواخت فرض شده و از تغییرات دمایی در جهت شعاعی برای لوله فلزی و سیال حرارتی صرف نظر شده و دمای پره یک‌بعدی فرض شده است. چوا و همکاران [3] از یک مدل انتقال حرارت برای بستر ماده جذب در مختصات استوانه‌ای بر روی لوله‌های پره‌دار استفاده کرده‌اند. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر باید از مدل انتقال جرم و حرارت که معادلات انتقال جرم را همراه با معادله انتقال حرارت حل می‌کنند، استفاده کرد. در این مدل، توزیع فشار داخل بستر که باعث افزایش هزینه محاسباتی می‌شود، محاسبه می‌گردد. لیونگ و لیو [4] مدل انتقال جرم و حرارت را برای ذرات جذب اطراف یک لوله بدون پره با استفاده از رابطه داری برای محیط متخلخل استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، تأثیر ضخامت بستر بر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص بررسی شده است. مگیو و همکاران [5] معادلات حاکم را برای ذرات جذب اطراف یک لوله بدون پره به صورت دو بعدی در مختصات استوانه‌ای برای یک چیلر همراه با بازیابی حرارت حل کرده و نشان داده‌اند که با استفاده از بازیابی حرارت، مقدار ضریب عملکرد و زمان چرخه افزایش، و مقدار ظرفیت سرمایش مخصوص کاهش می‌یابد. در این مقاله، دما و فشار در بستر غیر یکنواخت فرض شده و از رابطه ارگان به جای داری استفاده شده است. با توجه به ضریب انتقال حرارت هدایت پایین ذرات جذب، استفاده از پره، عملکرد بستر جذب را به میزان زیادی بهبود می‌بخشد. زانگ [6] یک مدل سه‌بعدی انتقال

جرم و حرارت برای ذرات جذب اطراف یک لوله فلزی با پره‌های طولی در مختصات استوانه‌ای را مطالعه کرده است. بررسی تجربی چیلر جذب سطحی با استفاده از لوله‌های پره‌دار توسط رستوکیا و همکاران [7] انجام شده است. چانگ و همکاران [8] عملکرد چیلر سیلیکاژل-آب را که بستر آن از مبدل با پره‌های صفحه‌ای ساخته شده است، به منظور استفاده از انرژی خورشید در ماه‌های مختلف سال بررسی کرده‌اند. یانگ و همکاران [9] در مطالعه تجربی خود، استفاده از چیلر با مبدل حرارتی دارای پره‌های صفحه‌ای را برای تهویه مطبوع اتاق بررسی کرده‌اند. مبدل حرارتی لوله-صفحه نسبت به مبدل‌های با پره‌های حلقوی ساده‌تر تولید می‌شوند. نیازمند و دابزاده [10] در مطالعه عددی خود، چیلر جذب سطحی با پره‌های حلقوی را با در نظر گرفتن هر دو مقاومت درون‌ذره‌ای و برون‌ذره‌ای مدل‌سازی کرده و تأثیر پارامترهای هندسی و قطر ذرات جذب را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از پارامترهایی که بر عملکرد چیلر تأثیر دارد، دمای آب گرم ورودی و دمای آب خنک‌کننده است. لو و همکاران [11] و وانگ و همکاران [12] در مطالعه تجربی خود نشان داده‌اند مقدار ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد با افزایش دمای آب گرم ورودی افزایش می‌یابد. در این مقاله، با توجه به ثابت نبودن فشار بستر نسبت به مکان در قطره‌های ذرات جذب کوچک، معادلات انتقال حرارت همراه با معادلات انتقال جرم حل شده و از پره‌های صفحه‌ای برای افزایش مقدار انتقال حرارت استفاده شده است. تاکنون تأثیر دمای آب گرم ورودی بر عملکرد چیلر که دارای بستر با پره‌های صفحه‌ای باشند، با در نظر گرفتن توزیع فشار داخل بستر، در بستر مورد بررسی قرار نگرفته و در این مطالعه به آن پرداخته شده است.

## 2. مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی محفظه جذب شامل چهار بخش اصلی سیال حرارتی، لوله فلزی، پره‌ها و بستر ماده جذب است. چهار حوزه حل که باید به صورت هم‌زمان همراه با معادلات مربوط به محفظه حل شوند، در شکل (2) نشان داده شده است. معادلات مربوط به چهار حوزه سیال حرارتی، لوله فلزی، پره‌ها و بستر با استفاده از روش حجم کنترل حل شده‌اند. فرضیات زیر در معادلات به کار رفته است:

- خواص لوله فلزی و پره‌ها ثابت فرض شده است؛

موجود در لوله فلزی و فاصله بین پره‌ها کوچک‌تر است، در نتیجه تعداد زیادی از حجم کنترل‌ها روی سطح خارجی لوله فلزی وجود دارند که شامل پره نیستند؛ بنابراین گرمای خارج شده از لوله فلزی به پره به صورت یک جمله چشمه در حجم کنترل‌هایی که شامل پره‌اند، لحاظ شده است. برای رعایت این نکته اگر حجم کنترل شامل پره باشد، مقدار گرمای منتقل شده از لوله در نظر گرفته می‌شود و گرما از حجم کنترل خارج می‌شود، در غیر این صورت، مقدار چشمه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و هیچ گرمایی از حجم کنترل برای پره خارج نمی‌شود.

شش شرط مرزی برای حل معادله انرژی لوله فلزی نیاز است. به جز دو شرط مرزی صفحه فصل مشترک بین لوله فلزی با سیال و بستر ماده جذب که از شرط تعادل حرارتی استفاده شده، در بقیه مرزها مقدار گرادیان دما برابر صفر در نظر گرفته شده است.

#### پره‌ها:

ضخامت پره‌ها نسبت به سایر ابعاد بسیار کم است و می‌توان انتقال حرارت در آن‌ها را به صورت دو بعدی در صفحه عمود بر محور لوله فرض کرد.

$$\int_{cv} \rho_{fin} C_{p,fin} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{fin} \vec{\nabla} T_{fin}) dV + S_{fin} \quad (5)$$

معادله هدایت به صورت دو بعدی در دستگاه مختصات عمومی حل می‌شود. شرط مرزی برای مرز مشترک بین لوله فلزی و پره‌ها به صورت گرمای ورودی در نظر گرفته شده و بقیه مرزها شرط گرادیان دما برابر صفر فرض شده است.

#### بستر ماده جذب:

مهم‌ترین قسمت در مدل‌سازی محفظه جذب، بستر ماده جذب است که شامل مواد متخلخل و حرکت بخار در این محیط متخلخل است. برای محاسبه توزیع دما و فشار در بستر باید چهار معادله اصلی موازنه انرژی، بقا جرم، مومنتوم و معادله حالت برای بستر حل شود.

موازنه انرژی برای قسمت جذب به صورت معادله (6) است:

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\rho_g C_{p,g} \vec{u} T_b) dV = \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\lambda_b \vec{\nabla} T_b) dV + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (6)$$

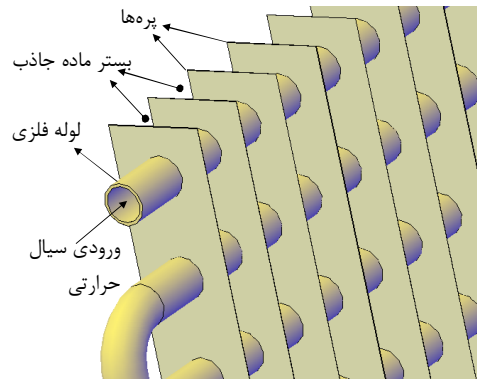
که در آن، تخلخل کلی به صورت معادله (7) محاسبه می‌شود:

- کندانسور و تبخیرکننده ایده‌آل فرض شده است؛

- محفظه جذب از ذراتی با اندازه یکنواخت پر شده است؛

- اتلاف حرارت در چرخه جذب وجود ندارد؛

- مقاومت حرارتی بین لوله فلزی و پره‌ها ناچیز فرض شده‌اند.



شکل (2): حوزه‌های مختلف حل

#### سیال حرارتی:

شامل مدل‌سازی سیالی است که داخل لوله‌ها جریان دارد.

$$\int_{cv} \rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV + \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\rho_f C_{p,f} \vec{u}_f T_f) dV = -Q_{fluid-tube} \quad (1)$$

معادله (1) به صورت یک‌بعدی در امتداد محور لوله حل شده و برای گسسته کردن جمله جابه‌جایی از روش اختلاف بالادست استفاده شده است. مقدار انتقال حرارت بین لوله فلزی و سیال عامل توسط رابطه (2) محاسبه شده است.

$$Q_{fluid-tube} = h_f A \Delta T \quad (2)$$

که در آن، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیال و جدار داخلی لوله فلزی  $h_f$  از رابطه (3) به دست می‌آید [13]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re-1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (3)$$

#### لوله فلزی:

برای لوله فلزی، معادله انتقال حرارت هدایت سه‌بعدی گذرا در مختصات استوانه‌ای حل شده است.

$$\int_{cv} \rho_{tube} C_{p,tube} \frac{\partial T_{tube}}{\partial t} dV = \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{tube} \vec{\nabla} T_{tube}) dV + S_{tube} \quad (4)$$

که در آن،  $S_{tube}$  گرمای منتقل شده از لوله فلزی به پره است. باید توجه داشت که در حل عددی ضخامت پره نسبت به ابعاد حجم کنترل‌های

$$d_{pore}=0.6166d_p \quad (18)$$

همچنین از رابطه گاز کامل برای محاسبه مقدار چگالی بخار استفاده شده است:

$$P=\rho_g R_g T_b \quad (19)$$

شرایط مرزی برای سطوح فصل مشترک بین بستر با لوله فلزی و پرها به صورت گرمای ورودی و بقیه مرزها آدیاباتیک فرض شده‌اند.

#### محفظه:

فشار و دمای محفظه به صورت یکنواخت نسبت به مکان در هر گام زمانی در نظر گرفته شده است. فشار در محفظه به دلیل سرعت پایین حرکت سیال یکنواخت فرض شده است. فشار محفظه در مرحله گرمایش فشار ثابت برابر با فشار کندانسور و در مرحله سرمایش فشار ثابت برابر با فشار تبخیرکننده است. برای محاسبه فشار محفظه در مراحل جرم ثابت، ابتدا با انتگرال گیری دبی جرمی سیال عامل خروجی از مرز مشترک بین محفظه و بستر جاذب مقدار کل جرم وارد شده به محفظه در هر گام زمانی توسط رابطه (20) محاسبه می‌شود:

$$m_g = \int_0^{\Delta t} \int_{\text{interface}} \rho_g \vec{u}_g \cdot d\vec{A} dt \quad (20)$$

سپس با استفاده از معادله پیوستگی در محفظه مقدار چگالی سیال عامل موجود در محفظه محاسبه خواهد شد:

$$\dot{m}_g = \frac{m_g}{\Delta t} = V_{\text{cham}} \frac{\partial \rho_{\text{cham}}}{\partial t} \quad (21)$$

در نهایت با استفاده از رابطه گاز کامل مقدار فشار محفظه محاسبه می‌شود.

$$P_{\text{cham}} = \rho_{\text{cham}} R_g T_{\text{cham}} \quad (22)$$

مقدار دمای محفظه برابر با دمای میانگین مرز مشترک بین محفظه و بستر جاذب در هر گام زمانی فرض شده است.

### 3. نتایج

نتایج به دست آمده از حل عددی باید مستقل از تعداد شبکه باشند. افزایش بیش از حد تعداد شبکه، افزایش در زمان محاسبات را به دنبال خواهد داشت و تعداد کم شبکه، نتایج با دقت پایین را نتیجه خواهد داد. با استفاده از شبکه بندی  $16 \times 16 \times 8$  برای ناحیه بین هر دو پره نتایج با حدود 2% خطا نسبت به شبکه ریزتر به دست خواهد آمد و این تعداد شبکه برای نواحی متخلخل بین دو پره انتخاب می‌شود. با انتخاب 3 شبکه برای امتداد شعاعی لوله فلزی، نتایج با خطای کمتر از 0/1%

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b) \varepsilon_p \quad (7)$$

برای محاسبه توزیع دما در ناحیه متخلخل، باید معادله انرژی سه بعدی همراه با جمله جذب در دستگاه مختصات عمومی حل شود. برای گسسته کردن جمله جابه جایی با توجه به کوچک بودن سرعت و عدد پکلت از طرح اختلاف مرکزی استفاده شده است.

موازنه جرم برای سیال عامل به صورت معادله (8) است:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{cv} \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{u}_g) dV + \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV = 0 \quad (8)$$

در اینجا  $w$  مقدار جذب در هر لحظه است که توسط رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$\frac{dw}{dt} = 15 D_{so} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right) / R_p^2 (w^* - w) \quad (9)$$

که در آن  $w^*$  جذب تعادلی در دمای  $T_b$  و فشار  $P$  است [14].

$$w^* = \frac{0.8 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) P}{\left[1 + (2 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) P)^{1.1}\right]^{1/1.1}} \quad (10)$$

سرعت سیال جذب شونده توسط رابطه داری (رابطه 11) محاسبه می‌شود [15].

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (11)$$

که در آن،  $\mu$  لزجت سیال عامل در فاز بخار و  $K_{app}$  نفوذپذیری ظاهری بستر است که با استفاده از روابط (16-12) محاسبه می‌شود [17, 16]:

$$K_{app} = K_d + \frac{\varepsilon_p \mu_g}{\tau p} D_{ek} \quad (12)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon_b)^2} \quad (13)$$

$$D_{ek} = \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_k}\right)^{-1} \quad (14)$$

$$D_m = 0.02628 \sqrt{\frac{T_b^3 / M}{P \sigma^2 \Omega}} \quad (15)$$

$$D_k = 48.5 d_{pore} \sqrt{\frac{T_b}{M}} \quad (16)$$

برای محاسبه ضریب پیچیدگی از رابطه (17) استفاده شده است [18]:

$$\tau = \varepsilon_b^{-0.4} \quad (17)$$

ساندالیاک و همکاران [19] در یک بررسی هندسی برای چند نوع قرار گرفتن ذرات در کنار یکدیگر مقدار قطر معادل فضاهای خالی در بستر را تعیین کرده‌اند. برای تخلخل بستر انتخاب شده مقدار  $d_{pore}$  با استفاده از رابطه (18) محاسبه می‌شود.

جدول (1): مقادیر پارامترها و شرایط اعمال شده در مدل سازی

مقدار	واحد	نماد	نام
303/15	K	$T_{cooling}$	دمای آب سرد ورودی
283/15	K	$T_{evap}$	دمای تبخیرکننده
700	$Kg.m^{-3}$	$\rho_b$	چگالی میانگین ذرات جاذب
924	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$	$C_{pb}$	ظرفیت گرمایی ویژه ذرات جاذب
0/2	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$\lambda_b$	ضریب انتقال حرارت هدایت ذرات
2690	$Kg.Kg^{-1}$	$\Delta H$	گرمای جذب
10/92	mm	$D_i$	قطر داخلی لوله فلزی
12/7	mm	$D_o$	قطر خارجی لوله فلزی
30	mm	FH	ارتفاع پره
0/2	mm	FT	ضخامت پره
6	mm	FS	فاصله بین پرها
0/2	mm	$d_p$	قطر ذرات جاذب
0/36	-	$\epsilon_b$	تخلخل بستر جاذب
0/46	-	$\epsilon_p$	تخلخل ذرات

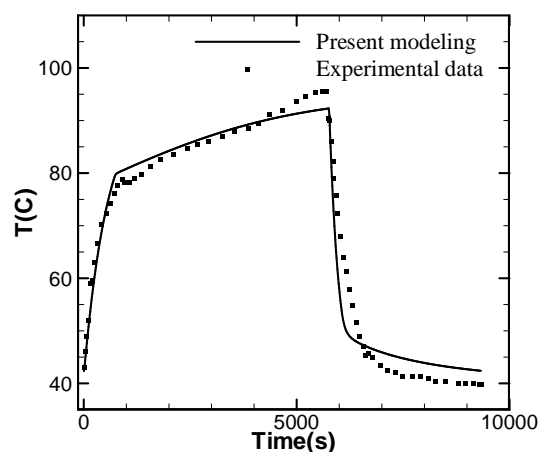
در بررسی عملکرد چیلرهای جذب سطحی، علاوه بر ضریب عملکرد پارامتر ظرفیت سرمایش مخصوص مورد بررسی قرار می گیرد که به صورت رابطه (23) تعریف می شود:

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_{silica\ gel} \cdot cycle\ time} \quad (23)$$

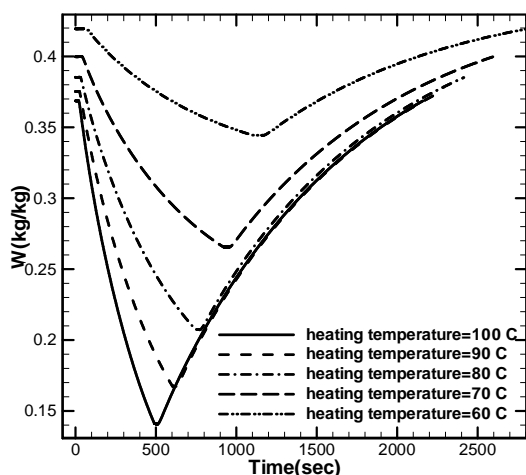
با استفاده از یک طراحی که دارای SCP بالاتری باشد، در واقع با جرم یکسان استفاده شده از مواد متخلخل می توان به ظرفیت سرمایش بالاتری دست یافت.

یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی در عملکرد چرخه دارد، مقدار جذب سیال عامل در ذرات جاذب است. به منظور بررسی مقدار جذب در زمان های مختلف، تغییرات مقدار میانگین سیال جذب شده در فاز جامد نسبت به زمان در شکل (4) نشان داده شده است. در مرحله اول، مقدار سیال عامل جذب شده تقریباً ثابت می ماند و در مرحله دوم، جریان آب گرم داخل لوله فلزی ادامه می یابد و سیال عامل موجود در ذرات جاذب احیا شده و وارد کندانسور می شود و مقدار جذب کاهش می یابد. در مرحله سوم مانند مرحله اول، مقدار سیال عامل جذب شده تقریباً ثابت خواهد ماند و در مرحله چهارم، با سرد شدن ذرات جاذب، سیال عامل از تبخیرکننده در ذرات جاذب جذب شده و مقدار جذب افزایش می یابد. محفظه جاذب در مرحله دوم به کندانسور و در مرحله چهارم به تبخیرکننده متصل است و به دلیل پایین تر بودن فشار در تبخیرکننده، عمل جذب در مرحله چهارم با سرعت کمتری نسبت به عمل احیا در مرحله دوم اتفاق می افتد؛ بنابراین، مدت زمان مرحله چهارم نسبت به مدت زمان مرحله دوم بیشتر است.

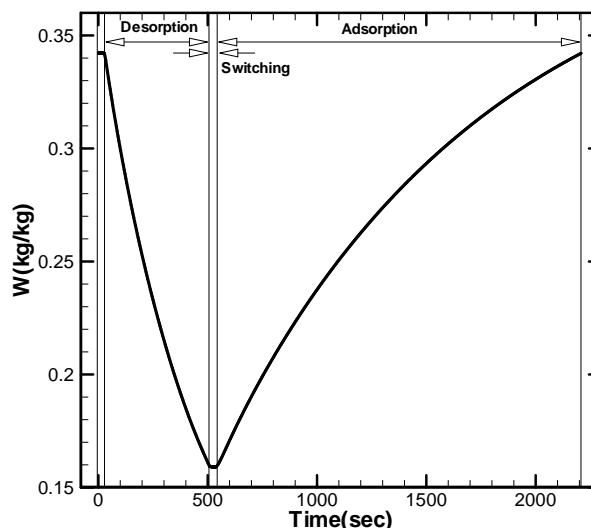
محاسبه خواهد شد. یکی دیگر از مواردی که باید در مورد مطالعات عددی بررسی شود، استقلال نتایج از گام زمانی است. در مراحل اول و سوم که در جرم ثابت اتفاق می افتد، تغییرات شدیدتری وجود دارد و نیاز است گام زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شود، اما در مراحل دوم و چهارم که در فشار ثابت اتفاق می افتد، تغییرات کمتری وجود دارد؛ بنابراین از دو گام زمانی مختلف برای این مراحل استفاده شده است. با انتخاب گام زمانی 0/02 ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی 0/6 ثانیه برای مراحل فشار ثابت، نتایجی با حدود 1/5% خطا به دست می آید که قابل قبول است و برای محاسبات انتخاب شده است. برای بررسی صحت برنامه کامپیوتری نوشته شده و روش مدل سازی نیاز است نتایج عددی به دست آمده با نتایج حاصل از یک نمونه تجربی مقایسه شود. رستوکیا و همکاران [20] در یک مطالعه آزمایشگاهی از جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب استفاده کرده اند. مدل حرارتی که به عنوان بستر ماده جاذب استفاده شده، لوله هایی با پره های حلقوی می باشند که فضای بین پرها با ذرات سیلیکاژل پر شده اند. به دلیل در دسترس نبودن نتایج برای چیلر با بستر دارای پره های صفحه ای، برنامه کامپیوتری نوشته شده به صورت استوانه ای اجرا شده و نتایج حاصل با مقادیر تجربی مقایسه شده است. در شکل (3) مقدار دمای میانگین بستر در نمونه آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی نشان داده شده است و دیده می شود که نتایج به خوبی بر هم منطبق اند.



شکل (3): مقایسه مقادیر دمای میانگین بستر به روش عددی و تجربی



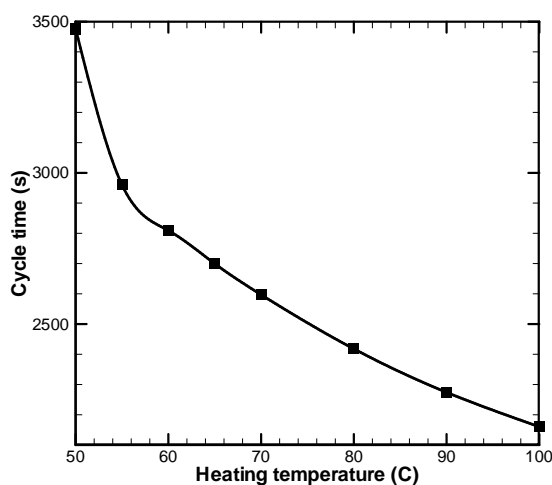
شکل (6): تغییرات مقدار جذب میانگین برای دمای آب گرم مختلف



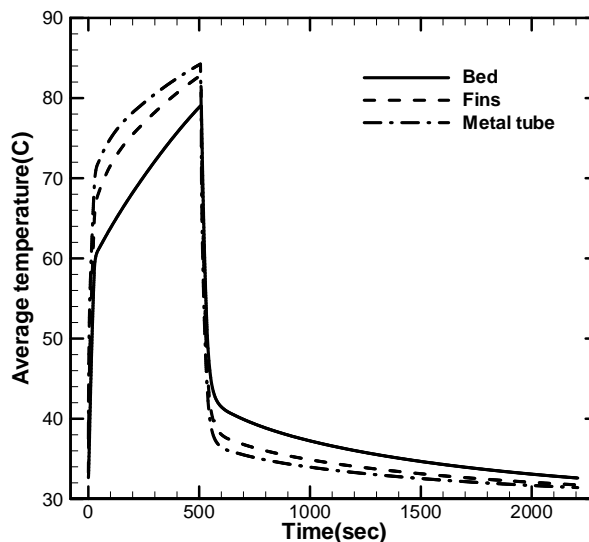
شکل (4): تغییرات مقدار جذب میانگین بر حسب زمان

در شکل (6)، تغییرات مقدار میانگین سیال جذب شده در فاز جامد نسبت به زمان برای دمای منبع حرارتی مختلف نشان داده شده است. شرط خروج از مرحله دوم و چهارم بر اساس صرف نظر از 20% ابتدا و انتهای بازه جذب در دما و فشار مورد نظر، در نظر گرفته شده است؛ بنابراین از 60% ظرفیت وسط بازه جذب در چرخه استفاده می‌شود. مقدار جذب تعادلی وابسته به دمای ذرات جاذب است و با افزایش دما، مقدار جذب تعادلی کاهش می‌یابد. مقدار جذب تعادلی حداکثر برای تمام شرایط یکسان است، زیرا این مقدار در فشار تبخیرکننده و دمای سیال خنک‌کننده اتفاق می‌افتد؛ اما مقدار جذب تعادلی حداقل، برای دماهای مختلف متفاوت است، زیرا این مقدار در فشار کندانسور و دمای سیال گرم‌کننده اتفاق می‌افتد. فشار کندانسور برای تمام شرایط یکسان است، اما مقدار دمای سیال گرم‌کننده متفاوت است. به این ترتیب، بازه جذب و احیا با افزایش دمای منبع حرارتی افزایش می‌یابد.

در شکل (5) مقدار دمای میانگین لوله فلزی، پره‌ها و بستر ماده جاذب نسبت به زمان نشان داده شده است. تغییر وضعیت در گرمایش و سرمایش، ابتدا لوله فلزی و سپس پره‌ها و بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین، در مراحل گرمایش، دمای لوله فلزی بالاتر و در مراحل سرمایش، دمای لوله فلزی نسبت به پره‌ها و بستر پایین‌تر است. شیب دما در مراحل جرم ثابت بیشتر از مراحل فشار ثابت است. همان‌طور که در شکل (4) دیده شد، در مراحل جرم ثابت، مقدار جذب در داخل بستر تقریباً ثابت است و تمامی حرارت داده شده به بستر صرف افزایش دمای بستر می‌شود، اما در مراحل فشار ثابت مقدار جذب در حال تغییر است و مقداری از حرارت داده شده به بستر، صرف تأمین انرژی جذب می‌شود، لذا افزایش یا کاهش دما با شیب کمتری نسبت به مراحل جرم ثابت اتفاق می‌افتد.



شکل (7): تغییرات زمان چرخه بر حسب دمای آب گرم ورودی



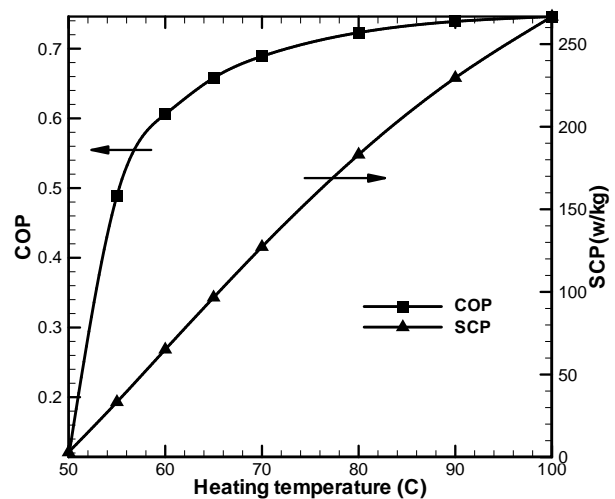
شکل (5): تغییرات دمای میانگین لوله فلزی، پره‌ها و بستر ماده جاذب



بنابراین افزایش دمای آب گرم ورودی باعث بهبود عملکرد چرخه خواهد شد. تغییرات شدید ضریب عملکرد در بازه دمایی 50 تا 70 درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد و برای دماهای بالاتر، تغییرات شدیدی در مقدار ضریب عملکرد دیده نمی‌شود و به مقدار 0/74 در دمای 100°C می‌رسد، اما ظرفیت سرمایش مخصوص با افزایش دما به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. در صورتی که محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تحمل مواد مورد استفاده در چیلر، ظرفیت تحمل ذرات جاذب، محدودیت در سیال عامل، محدودیت منبع حرارتی و... وجود نداشته باشد، استفاده از منابع با دمای بالا بهتر خواهد بود.

#### 4. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بستر ماده جاذب در چیلرهای جذب سطحی به صورت سه بعدی گذرا مدل‌سازی شده است. معادلات انتقال حرارت برای پره‌ها، لوله فلزی، سیال حرارتی و معادلات انتقال جرم و حرارت برای بستر ماده جاذب به صورت هم‌زمان به روش حجم کنترل حل شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد افزایش دمای آب گرم ورودی باعث افزایش ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص خواهد شد. در صورتی که محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تحمل مواد مورد استفاده در چیلر، ظرفیت تحمل ذرات جاذب، محدودیت در سیال عامل، محدودیت منبع حرارتی وجود نداشته باشد، استفاده از منابع با دمای بالا بهتر خواهد بود. همچنین برخی از پارامترهای اساسی مانند میزان جذب و فشار بررسی شد و مورد بحث قرار گرفت که نتایج آن، مؤید مدل‌سازی و روش عددی به کار رفته است.



شکل (8): مقادیر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب دمای آب گرم ورودی

همان‌طور که در شکل (7) دیده می‌شود، زمان چرخه با افزایش دما، کاهش می‌یابد. بالا بودن دما باعث می‌شود عمل جذب و احیاء سیال عامل در ذرات جاذب سریع‌تر اتفاق افتد و زمان چرخه کاهش یابد. افزایش دمای سیال گرم‌کننده باعث می‌شود تا مقدار جذب و احیاء شده در هر چرخه افزایش یابد؛ این امر افزایش سیال عامل در گردش چرخه و افزایش ظرفیت سرمایش را به دنبال خواهد داشت. افزایش دما همچنین باعث افزایش انرژی حرارتی مورد نیاز چرخه خواهد شد، زیرا در هر چرخه ذرات جاذب، سیال حرارتی داخل لوله، لوله فلزی و پره‌ها باید گرم و سرد شود بدون اینکه از این انرژی استفاده‌ای در جهت سرمایش شود. افزایش اختلاف دو منبع حرارتی باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای گرمایش می‌شود. برآیند تقسیم سرمایش به دست آمده بر انرژی مورد نیاز برای گرم کردن مقدار ضریب عملکرد نشان داده شده در شکل (8) را نتیجه می‌دهد. با افزایش دمای منبع حرارتی، مقدار ظرفیت سرمایش افزایش و مقدار زمان چرخه کاهش می‌یابد که هر دو این تغییرات در راستای افزایش ظرفیت سرمایش مخصوص است.



$K_{app}$	نفوذپذیری ظاهری بستر ( $m^2$ )
$P$	فشار (Pa)
$Pr$	عدد پرانتل
$Re$	عدد رینولدز
$R_u$	ثابت جهانی گازها ( $J.kmol^{-1}K^{-1}$ )
$t$	زمان (s)
$T$	دما (K)
$u$	سرعت ( $m.s^{-1}$ )
$w$	مقدار جذب میانگین ( $kg_{adsorbate}.kg_{adsorbent}^{-1}$ )

زیر نویس ها:

$b$	بستر ماده جاذب
cham	محفظه
$f$	سیال حرارتی
$g$	بخار

فهرست علائم  
( $m^2$ ) مساحت

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ )
$d_p$	قطر ذرات جاذب (m)
$D_k$	ضریب پخش نودسن ( $m^2.s^{-1}$ )
$D_m$	ضریب پخش مولکولی ( $m^2.s^{-1}$ )
$D_{so}$	ثابت ضریب پخش سطحی ( $m^2.s^{-1}$ )
$E_a$	انرژی فعال سازی ( $J.kg^{-1}$ )
$f$	ضریب اصطکاک
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W.m^{-2}K^{-1}$ )

علائم یونانی:

$\sigma$	قطر برخورد ( $\text{\AA}$ )
$\Omega$	انگراال برخورد
$\tau$	ضریب تورئوسیتی
$\Delta H$	گرمای جذب ( $J.kg^{-1}$ )
$\varepsilon$	تخلخل
$\mu$	لزجت ( $N.m^{-1}s^{-1}$ )
$\lambda$	ضریب انتقال حرارت هدایت ( $W.m^{-1}K^{-1}$ )
$\forall$	حجم ( $m^3$ )

مراجع

- [1] Yong, L., Sumathy, K., "Comparison between heat transfer and heat mass transfer models for transportation process in an adsorbent bed", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 1587–1598, 2004.
- [2] Riffel, D., Wittstadt, U., Schmidt, F., Belo, F., Leite, A., Ziegler, F., "Transient modeling of an adsorber using finned-tube heat exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer vol 53 ,pp. 1473–1482, 2010.
- [3] Chua, H., Ng, K., Wang, W., Yap, C., Wang, X., "Transient modeling of a two-bed silica gel–water adsorption chiller", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 659–669, 2004.
- [4] Leong, K., Liu, Y., "Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system", Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2359–2374, 2004.
- [5] Maggio, G., Freni, A., Restuccia, G., "A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery", International Journal of Refrigeration, Vol. 29, pp. 589–600, 2006.
- [6] Zhang, L., "A three-dimensional non equilibrium model for an intermittent adsorption cooling system", Solar Energy, Vol. 69, pp. 27–35, 2000.
- [7] Restuccia, G., Freni, A., Russo, F., Vasta, S., "Experimental investigation of a solid adsorption chiller based on a heat exchanger coated with hydrophobic zeolite", Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1419–1428, 2005.
- [8] Chang, W., Wang, C., Shieh, C., "Design and performance of a solar-powered heating and cooling system using silica gel/water adsorption chiller", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2100–2105, 2009.

- [9] Yang, G., Xia, Z., Wang, R., Keletigui, D., Wang, D., Dong, Z., Yang, X., "Research on a compact adsorption room air conditioner", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 2167–2177, 2006.
- [10] Niazmand, H., Dabzadeh, I., "Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins", Int J Ref, in press, available online.
- [11] Luo, H., Wang, R., Dai Y., "The effects of operation parameter on the performance of a solar-powered adsorption chiller", Applied Energy, Vol. 87, pp. 3018–3022, 2010.
- [12] Wang, D., Wu, J., Xia, Z., Zhai, H., Wang, R., Dou, W., "Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part II. Experimental study", International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 1084-1091, 2005.
- [13] Poyelle, F., Guilleminot, J., Meunier, F., "Experimental tests and predictive model of an adsorptive air conditioning unit", Ind Eng Chem Res, Vol. 38, pp. 298-309, 1999.
- [14] Saha, B., Chakraborty, A., Koyama, S., Aristov, Y., "A new generation cooling device employing CaCl<sub>2</sub>-in-silica gel-water system", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 516-524, 2009.
- [15] Leong, K.C., Liu, Y., "Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system", Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2359–2374, 2004.
- [16] Demir, H., Mobedi, M., Ulku, S., "Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 36, pp. 372-377, 2009.
- [17] Do D., Adsorption analysis: equilibria and kinetics, Volume 2, Imperial College Press London, 1998.
- [18] Delgado, J., "A simple experimental technique to measure tortuosity in packed beds", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 84, pp. 651-655, 2006.
- [19] Sandulyak, A., Sandulyak, A., Ershova, V., "Functional correction to the classical expression for the average flow velocity in a closely packed granular bed", Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 42, pp. 220-224, 2008.
- [20] Restuccia, G., Freni, A., Vasta, S., Aristov, Y., "Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modeling", International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 284–293, 2004.