



دانشگاه صنعتی امیر کبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۸۹ تا ۱۰۱  
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 89-101



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## محاسبه قطر بهینه ذرات جاذب سیلیکاژل در چیلرهای جذب سطحی

مهدی مهدوی خواه<sup>۱</sup>، حمید نیازمند<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد  
۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت ۱۳۹۰/۵/۲۲، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۵)

### چکیده

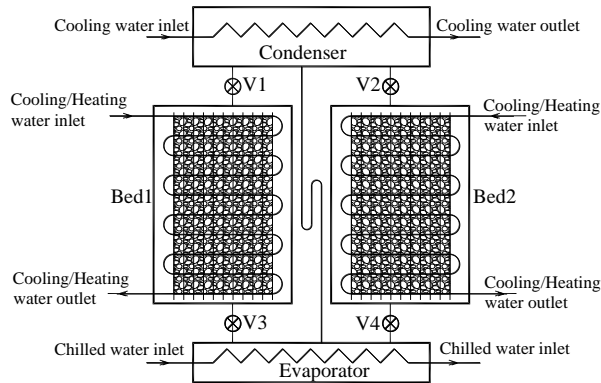
یکی از روش‌هایی که امروزه برای تولید برودت در صنعت و تهویه مطبوع مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ چیلرهای جذب سطحی‌اند که دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های مشابه هستند. با توجه به اهمیت بسترهای جاذب در عملکرد چیلرهای جذب سطحی، در این مقاله به مدل‌سازی بستر ماده جاذب با مبدل حرارتی صفحه‌ای پرداخته شده که بین فین‌ها با ذرات سیلیکاژل SWS-1L پر شده است. برای مدل‌سازی بستر ماده جاذب معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال حرارت سه بعدی در دستگاه مختصات عمومی حل شده است. برای حل همزمان معادلات وابسته به زمان در چهار حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و بستر ماده جاذب از روش حجم کنترل استفاده شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده دیده شد که مقدار ضریب عملکرد با تغییر در قطر ذرات جاذب تغییر ناچیزی دارد اما مقدار ظرفیت سرمایه‌ش مخصوص دارای یک مقدار بهینه در قطر ذرات جاذب ۰/۳۷ میلی‌متر است.

### کلمات کلیدی

چیلر جذب سطحی، بهینه‌سازی، مدل‌سازی عددی، سیلیکاژل.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات  
Email: niazmand@um.ac.ir

۱- مقدمه



شکل (۱): طرح کلی از یک چیلر جذب سطحی با دو محفظه جاذب

چیلر جذب سطحی مانند چیلر تراکمی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است؛ کندانسور، شیر اختناق و اواپراتور در هر دو مشترک هستند اما در چیلر جذب سطحی، محفظه‌های جاذب نقش کمپرسور را ایفا می‌نمایند. محفظه جاذب از مواد جامدی پر شده است که می‌توانند سیالات خاصی را جذب نموده و مجدداً احیا نمایند. این جامدات متخلخل هنگامی که سرد شوند سیال عامل را جذب نموده و با گرم نمودن مجدداً آنرا احیا می‌نمایند و این فرایند می‌تواند به صورت تکرارپذیر انجام شود. به منظور بهبود عملکرد چیلر و افزایش میزان انتقال جرم و حرارت معمولاً از مبدل‌های حرارتی در محفظه استفاده می‌شود و ذرات جاذب روی سطوح مبدل حرارتی قرار می‌گیرند. در شکل (۱) طرح کلی یک چیلر جذب سطحی ساده با دو بستر جاذب که معمولاً در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود نشان داده شده است. عملکرد چیلر به این صورت است که در ابتدا شیرهای V1، V2، V3 و V4 بسته‌اند، آب گرم وارد لوله‌های فین دار بستر ۱ می‌شود و انتقال حرارت از سیال ناقل حرارت به لوله فلزی و فین‌ها و سپس به ذرات جاذب بین فین‌ها باعث گرم شدن بستر شده و فرایند احیای سیال عامل موجود در ذرات جاذب آغاز می‌شود. سیال عامل احیا شده در بستر ۱ وارد فضای خالی اطراف بستر ۱ در محفظه ۱ شده و باعث می‌شود فشار محفظه ۱ در جرم ثابت تا فشار کندانسور سریعاً افزایش یابد. در همین زمان آب خنک وارد لوله‌های بستر ۲ شده و فرایند جذب سیال عامل در ذرات جاذب بستر ۲ شروع می‌شود. جذب سیال عامل موجود در فضای خالی داخل محفظه ۲ توسط ذرات جاذب بستر ۲ باعث می‌شود فشار محفظه ۲ در جرم ثابت تا فشار اواپراتور کاهش یابد. در مرحله دوم شیر V1 باز شده و سیال عامل احیا شده از بستر ۱ وارد کندانسور می‌شود. سیال عامل پس از آزاد نمودن گرما در کندانسور وارد شیر اختناق شده و با افت فشار، دمای آن کاهش می‌یابد. در این مرحله شیر V4 باز است و سیال عامل پس از دریافت گرما از منبع دما پایین و سرد نمودن آب اطراف لوله‌های اواپراتور، جذب مواد جاذب در بستر ۲ خواهد شد. در این مرحله گرما دادن به بستر ۱ و خنک نمودن بستر ۲ ادامه دارد تا هر دو بستر به حالت اشباع برسند.

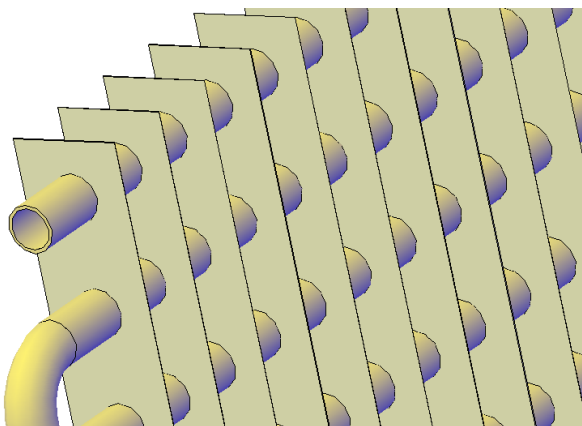
در مرحله سوم شیرهای V1، V2، V3 و V4 بسته‌اند و عکس مرحله ۱ انجام می‌شود. آب خنک وارد لوله‌های بستر ۱ شده و باعث خنک شدن ذرات جاذب می‌شود، بدین ترتیب فشار محفظه ۱ تا فشار اواپراتور کاهش می‌یابد. در همین زمان آب گرم وارد لوله‌های بستر ۲ می‌شود و با احیای سیال عامل موجود در ذرات که در دو مرحله قبل جذب شده بود، فشار محفظه تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد. در مرحله چهارم عکس مرحله دوم انجام می‌شود و بستر ۱ به اواپراتور و بستر ۲ به کندانسور متصل خواهد شد. پس از پایان مرحله چهارم، سیکل کامل می‌شود. در این چهار مرحله از سیکل، تنها در دو مرحله فشار ثابت (دوم و چهارم) که نسبت به مراحل جرم ثابت (اول و سوم) مدت زمان طولانی‌تری است عمل تبرید صورت می‌گیرد.

یکی از جفت‌های جاذبی که معمولاً در چیلرهای جذب سطحی استفاده می‌شود جفت سیلیکاژل-آب است. در مرجع [۱] خانواده جدیدی از سیلیکاژل‌ها با عنوان SWS بررسی شده‌اند که دارای مقدار جذب بالاتری نسبت به انواع RD هستند. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با مدل‌سازی بستر ماده جاذب انجام شده است. بسیاری از این مطالعات تقریب فشار یکنواخت برای بستر در نظر گرفته‌اند و مقاومت انتقال جرم بین ذرات را ناچیز فرض نموده‌اند. در این روش برای بستر معادله مومنتوم حل نشده و از جمله جابجایی در معادله انتقال حرارت صرف‌نظر شده است. به این ترتیب معادلات بسیار ساده شده و زمان محاسبات به میزان زیادی کاهش می‌یابد. این تقریب برای ارتفاع فین ناچیز یا قطر ذرات جاذب بزرگ یا فشارهای بالا که اختلاف فشار در بستر ماده جاذب ناچیز هست قابل قبول است. یانگ و همکارش [۲] بر اساس تحلیل مرتبه بزرگی دو معیار کلی ارائه نموده‌اند که نشان می‌دهد در چه مواردی می‌توان از تقریب فشار یکنواخت استفاده نمود. ریفل و همکارانش [۳] با استفاده از

بستر ماده جاذب دارند. چانگ و همکارانش [۱۳] عملکرد چیلر سیلیکاژل-آب که بستر آن از مبدل با فین‌های صفحه‌ای ساخته شده است را به منظور استفاده از انرژی خورشید بررسی نموده‌اند. یانگ و همکارانش [۱۴] در مطالعه تجربی خود استفاده از چیلر با مبدل حرارتی دارای فین‌های صفحه‌ای را برای تهویه مطبوع اتاق بررسی نموده‌اند. تاکنون مطالعه عددی در رابطه با مقدار بهینه قطر ذرات جاذب در بسترهایی با فین‌های صفحه‌ای پیوسته با در نظر گرفتن هر دو مقاومت انتقال جرم بین ذرات و انتقال جرم درون ذرات صورت نگرفته است و در این مقاله به آن پرداخته شده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

در این مطالعه از یک مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای پیوسته در داخل محفظه چیلر جذب سطحی استفاده شده است. این مبدل حرارتی در شکل (۲) نشان داده شده است و ذرات جاذب سیلیکاژل فضای خالی بین فین‌ها را پر می‌کنند. تعداد شبکه مورد نیاز برای حل معادلات حاکم بر این مبدل‌ها بسیار زیاد است. ناحیه اطراف لوله‌های مبدل حرارتی تا حد زیادی مشابه هستند و تنها مدل‌سازی اطراف یکی از لوله‌ها می‌تواند عملکرد کل بستر را شبیه‌سازی نماید. لوله‌های بالا و پایین مبدل با بقیه لوله‌های میانی تفاوت جزئی در شرط مرزی دارند اما در مقایسه با تعداد لوله‌های میانی می‌توان از این اختلاف صرف‌نظر نمود. بدین ترتیب مدل‌سازی بستر ماده جاذب به اطراف یک لوله ساده‌سازی می‌شود. همچنین به دلیل تقارن می‌توان معادلات را تنها برای یک چهارم اطراف یک لوله حل نمود و حجم محاسبات را تا حد زیادی کاهش داد.



شکل (۲): مبدل حرارتی صفحه‌ای به‌عنوان بستر ماده جاذب در چیلر جذب سطحی

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی عبارتند از:

یک مطالعه عددی در مختصات استوانه‌ای نتایجی با حداکثر ۲۰٪ خطا بدست آورده‌اند و تاثیر دمای آب گرم، آب خنک‌کننده و آب سرد شونده را بر عملکرد چیلر محاسبه نموده‌اند. در این مقاله فشار بستر، یکنواخت فرض شده و از تغییرات دمایی در جهت شعاعی برای لوله فلزی و سیال ناقل حرارت صرف‌نظر شده و دمای فین یک بعدی فرض شده است. چوا و همکارانش [۴] با استفاده از تقریب فشار یکنواخت، بستر ماده جاذب روی لوله‌های با فین‌های شعاعی را در مختصات استوانه‌ای مدل‌سازی نموده‌اند. میازاکی و همکارانش [۵] یک زمان سیکل جدید برای بالا بردن راندمان چیلر و کاهش نوسانات آب سرد شده سیلیکاژل-آب با دو بستر جاذب پیشنهاد نموده‌اند. ابعاد فین‌ها یکی از عوامل مهمی است که باید به‌خوبی طراحی و انتخاب شود. کوبتا و همکارانش [۶] یک مقدار بهینه برای ارتفاع فین و فاصله بین فین‌ها در مبدل حرارتی لوله با فین‌های حلقوی برای چیلر جذب سطحی سیلیکاژل-آب به روش عددی بدست آورده‌اند. در برخی مطالعات انجام شده علاوه بر فرض توزیع فشار یکنواخت، توزیع دما نیز یکنواخت فرض شده است [۷-۹]. در برخی مطالعات برای بدست آوردن نتایجی دقیق‌تر معادله مومنتوم را برای محاسبه توزیع فشار حل نموده‌اند. در این مطالعات مقادیر فشار در بستر ماده جاذب محاسبه شده و جمله جابجایی در معادله انرژی در نظر گرفته می‌شود. تحلیل فرایند انتقال در یک ناحیه متخلخل که بر اساس در نظر گرفتن مقاومت برون ذره‌ای باشد پیچیده‌تر است و گاهی اوقات نیاز است معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال حرارت توأما حل شوند. فرنی و همکارانش [۱۰] ذرات جاذب زئولیت روی لوله بدون فین را در مختصات استوانه‌ای به‌صورت یک بعدی در امتداد شعاع مدل‌سازی نموده‌اند. در این مقاله دما و فشار در بستر، غیر یکنواخت فرض شده و از قانون دارسی به‌عنوان معادله مومنتوم استفاده شده است. وو و همکارانش [۱۱] مدل‌سازی دو بعدی را با فرض دما و فشار غیر یکنواخت در بستر ذرات زئولیت روی لوله بدون فین و استفاده از قانون دارسی انجام داده‌اند. با توجه به ضریب انتقال حرارت هدایت پایین ذرات جاذب، استفاده از فین، عملکرد بستر جاذب را به میزان زیادی بهبود می‌بخشد. ژانگ [۱۲] یک مدل سه بعدی همراه با محاسبه توزیع فشار را برای ذرات جاذب اطراف یک لوله فلزی با فین‌های طولی در مختصات استوانه‌ای مطالعه نموده است. در این مقاله از رابطه دارسی برای محاسبه فشار در بستر استفاده شده است.

فین‌های صفحه‌ای پیوسته با توجه به سادگی تولید و اشغال فضای کم، کاربرد فراوانی در چیلرهای جذب سطحی به‌عنوان

تنها یک شرط مرزی برای ورودی کافی است که به صورت زیر در نظر گرفته شده:

$$\begin{aligned} T_f &= T_{in-cooling} \text{ at } z=0 && \text{برای} \\ T_f &= T_{in-cooling} \text{ at } z=0 && \text{سرمایش} \\ T_f &= T_{in-heating} \text{ at } z=0 && \text{برای گرمایش} \end{aligned} \quad (4)$$

$$T_f = T_{in-heating} \text{ at } z=0$$

## ۲-۲- لوله فلزی

برای لوله فلزی معادله انتقال حرارت هدایت به صورت سه بعدی گذرا در مختصات استوانه ای حل شده است:

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

جمله چشمه در معادله بالا مقدار گرمای منتقل شده از لوله فلزی به فین‌ها هست:

$$S_{tube} = \gamma \times 0.5 Q_{tube-fin} \quad (6)$$

باید توجه داشت که در حل عددی ضخامت فین نسبت به ابعاد حجم کنترل‌های موجود در لوله فلزی و فاصله بین فین‌ها کوچکتر هست در نتیجه تعداد زیادی از حجم کنترل‌ها روی سطح خارجی لوله فلزی وجود دارند که شامل فین نیستند. بنابراین گرمای خارج شده از لوله فلزی به فین به صورت یک جمله چشمه در حجم کنترل‌هایی که شامل فین هستند لحاظ شده است. برای رعایت این نکته اگر حجم کنترل شامل فین باشد  $\gamma = 1$  در نظر گرفته می‌شود و گرما از حجم کنترل خارج می‌شود در غیر اینصورت  $\gamma = 0$  است و هیچ گرمایی از حجم کنترل برای فین خارج نمی‌شود. گرمای منتقل شده از لوله فلزی به فین توسط رابطه زیر محاسبه شده است:

$$Q_{tube-fin} = -\lambda_{tube-fin} A \frac{\Delta T}{\delta} \quad (7)$$

که در آن  $\Delta T$  اختلاف دمای مرکز آخرین حجم کنترل لوله فلزی و اولین حجم کنترل فین روی آن بوده و  $\delta$  فاصله این دو مرکز حجم کنترل است.  $\lambda_{tube}$  ضریب انتقال حرارت هدایت معادل بین لوله فلزی و فین است. شش شرط مرزی برای لوله فلزی عبارتند از:

$$\lambda_{tube} \frac{\partial T_{tube}}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = -h_f (T_f - T_{interface}) \quad (8)$$

$$\lambda_{tube} A \frac{\partial T_{tube}}{\partial r} \Big|_{r=r_o} = -Q_{tube-bed} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_{tube}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = \frac{\partial T_{tube}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_{max}} = \frac{\partial T_{tube}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial T_{tube}}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (10)$$

- بستر جاذب از ذراتی با اندازه یکنواخت پر شده است که دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند.

- اتلاف حرارت در سیکل جذب وجود ندارد.

- مقاومت حرارتی تماسی بین لوله فلزی و فین‌ها ناچیز فرض شده است.

- تخلخل بستر یکنواخت فرض شده است.

- به استثنای چگالی سیال عامل، سایر خواص سیال عامل، خواص سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها، مواد جاذب و سیال جذب شده ثابت در نظر گرفته شده است.

- کندانسور و اواپراتور ایده‌آل فرض شده است.

- سیال عامل در فاز جذب شده به صورت مایع و در فاز احیا شده به صورت بخار با رفتار گاز ایده‌آل فرض شده است.

برای مدل‌سازی باید چهار حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و ذرات جاذب بین فین‌ها به صورت همزمان حل شوند.

## ۲-۱- سیال ناقل حرارت

مدل‌سازی سیال ناقل حرارت شامل مدل‌سازی سیالی است که داخل لوله جریان دارد. با توجه به سرعت سیال ناقل حرارت و نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایت می‌توان از جمله هدایت در مقابل جمله جابجایی در امتداد محور لوله صرف‌نظر نمود. معادله (۱) به صورت یک بعدی در امتداد محور لوله حل خواهد شد:

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

مقدار حرارت منتقل شده از سیال به لوله فلزی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$Q_{fluid-tube} = h_f A (T_f - T_{interface}) \quad (2)$$

که در آن  $T_f$  دمای میانگین سیال در هر شبکه و  $T_{inter}$  دمای دیوار داخلی لوله فلزی است. با توجه به مقدار عدد رینولدز در داخل لوله فلزی، رژیم جریان سیال ناقل حرارت آشفته است و مقدار عدد ناسلت توسط رابطه (۳) محاسبه شده است [۱۵]:

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

که در آن  $f$  ضریب اصطکاک در لوله صاف است.

## ۲-۳- فین‌ها

بخار در این محیط متخلخل است. در این مطالعه مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای در نظر گرفته شده است و چهار معادله اصلی پیوستگی، مومنتوم، انتقال حرارت و گاز کامل باید به صورت همزمان حل شوند.

موازنه انرژی برای بستر جاذب عبارت است از:

$$\int_{CV} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\rho_g C_{p_g} \vec{u}_g T_b) dV = \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\lambda_b \vec{\nabla} T_b) dV + \int_{CV} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (15)$$

که در آن:

$$\rho C_p = \varepsilon_t (\rho_g C_{p_g}) + \rho_b (C_{p_b} + w C_{p_a}) \quad (16)$$

چگالی فاز بخار است که با استفاده از قانون گاز کامل محاسبه می‌شود. تخلخل کلی با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b) \varepsilon_p \quad (17)$$

همچنین  $w$  مقدار سیال عامل موجود در ذرات سیلیکاژل در هر لحظه است که توسط رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود و در واقع مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای برای جذب و احیا سیال عامل را لحاظ می‌کند [۴]. تغییرات مقدار جذب و احیا درون ذرات تابع پارامترهایی مانند قطر ذرات و انرژی فعالسازی است که نرخ جذب و احیا را تحت تاثیر قرار می‌دهد و رابطه (۱۸) تاثیر این پارامترها را لحاظ می‌کند:

$$\frac{dw}{dt} = 15 D_{so} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right) / R_p^2 \cdot (w^* - w) \quad (18)$$

که در آن  $w^*$  جذب تعادلی در دمای  $T_b$  و فشار  $P$  است. ساها و همکارانش [۱۶] با استفاده از انطباق نتایج تجربی، رابطه زیر را برای محاسبه جذب تعادلی سیلیکاژل نوع SWS-1L ارائه نموده‌اند:

$$w^* = \frac{0.8 \times 2 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) \cdot P}{[1 + (2 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) \cdot P)^{1.1}]^{1/1.1}} \quad (19)$$

معادله انرژی به صورت سه بعدی حل شده و بنابراین لزوم نیاز به شش شرط مرزی وجود دارد. شرایط مرزی معادله انرژی به صورت زیر است. شماره سطوح در شکل (۳) معرفی شده‌اند.

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face1} = -Q_{tube-bed} \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face2/1} = \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face2/2} = \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face3} = \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face4} = 0 \quad (21)$$

ضخامت فین‌ها نسبت به سایر ابعاد ناچیز است و می‌توان انتقال حرارت در آنها را به صورت دو بعدی در جهت  $X$  و  $Y$  فرض نمود:

$$\int_{CV} \rho_{fin} C_{p_{fin}} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{fin} \vec{\nabla} T_{fin}) dV + S_{fin} \quad (11)$$

معادله هدایت به صورت دو بعدی در دستگاه مختصات عمومی حل می‌شود. جمله چشمه در معادله بالا مقدار حرارتی است که از فین‌ها به ذرات جاذب منتقل می‌شود و به صورت جمله چشمه در معادلات لحاظ شده است.  $Q_{fin-bed}$  حرارت منتقل شده از فین به محیط متخلخل است که به صورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

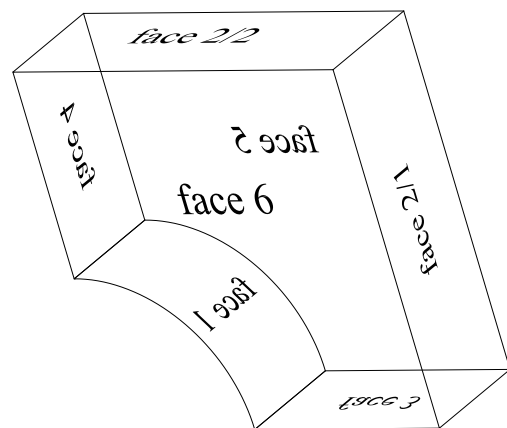
$$S_{fin} = -2Q_{fin-bed} = -2\lambda_{fin-bed} A \frac{(T_{fin} - T_{1,bed})}{\delta} \quad (12)$$

که در آن  $T_{1,bed}$  دمای مرکز حجم کنترل نزدیک فین در بستر ماده جاذب و  $T_{fin}$  دمای مرکز حجم کنترل فین و  $\lambda_{fin-bed}$  ضریب انتقال حرارت هدایت معادل بین فین و ناحیه متخلخل است.  $\delta$  فاصله بین مرکز حجم کنترل فین و اولین مرکز حجم کنترل ناحیه متخلخل است.

شرایط مرزی در وجوه مختلف حوزه حل که در شکل (۳) نشان داده شده است به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) بیان می‌شوند. در این روابط  $n$  بردار عمود بر صفحه است:

$$\lambda_{fin} A \frac{\partial T_{fin}}{\partial n} \Big|_{face1} = -Q_{tube-fin} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_{fin}}{\partial n} \Big|_{face2} = \frac{\partial T_{fin}}{\partial n} \Big|_{face3} = \frac{\partial T_{fin}}{\partial n} \Big|_{face4} = 0 \quad (14)$$



شکل (۳): سطوح اطراف حوزه حل

## ۲-۴- بستر ماده جاذب

مدل‌سازی بستر ماده جاذب شامل مواد متخلخل و حرکت

۲-۵- محفظه

فشار و دمای محفظه به صورت یکنواخت نسبت به مکان در هرگام 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 ثابت کندانسور و در مرحله سرمایش فشار ثابت، برابر با فشار ثابت اواپراتور است. فشار در محفظه در مراحل جرم ثابت نسبت به زمان متغیر است و به روش زیر محاسبه شده است.

ابتدا با انتگرال گیری از دبی جرمی سیال عامل خروجی از مرز مشترک بین محفظه و بستر جاذب، مقدار کل جرم وارد شده به محفظه محاسبه می شود:

$$\dot{m} = \int_{face2/1} \rho_g u_g dA \quad (36)$$

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

$$\dot{m} = \nabla_{cham} \frac{\partial \rho_{cham}}{\partial t} \quad (37)$$

در پایان با استفاده از رابطه گاز کامل مقدار فشار محفظه محاسبه می شود:

$$P_{cham} = \rho_{cham} R_g T_{cham} \quad (38)$$

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

۳- حل معادلات و اعتبارسنجی

اولین گام در حل معادلات حاکم، شبکه بندی حوزه حل است. برای حل معادلات در این مطالعه بایستی نواحی بین فین ها، فین ها، لوله فلزی و سیال ناقل حرارت شبکه بندی شوند و این شبکه بندی باید به گونه ای باشد تا بتوان شرایط مرزی را به خوبی اعمال نمود. برای این منظور از یک دستگاه مختصات عمومی و شبکه بندی حوزه های مختلف به صورت سه بعدی شکل (۴) شبکه بندی حوزه های مختلف استفاده شده است. در نشان داده شده است. برای وضوح بیشتر شبکه برخی از فین ها و ناحیه متخلخل در شکل حذف شده اند.

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face5} = -Q_{fin-bed} \quad (22)$$

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_{face5} = -Q_{fin-bed} \quad (23)$$

موازنه جرم برای سیال عامل عبارت است از:

$$\int_{CV} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{u}_g) dV + \int_{CV} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (24)$$

سرعت سیال جذب شونده در بستر ماده جاذب توسط رابطه دارسی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (25)$$

که در آن  $\mu$  لزجت سیال عامل در فاز بخار و  $K$  نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب است که به صورت زیر محاسبه می شود [۱۷ و ۱۸]:

$$K_{app} = K_d + \frac{\varepsilon_p \mu_g}{\tau_p} D_{ek} \quad (26)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon_b)^2} \quad (27)$$

$$D_{ek} = \left( \frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_k} \right)^{-1} \quad (28)$$

$$D_m = 0.02628 \sqrt{\frac{T_b^3}{M}} \quad (29)$$

$$D_k = 48.5 d_{pore} \sqrt{\frac{T_b}{M}} \quad (30)$$

$$d_{pore} = 0.6166 d_p \quad (31)$$

با ترکیب دو معادله دارسی و موازنه جرم رابطه (۳۲) بدست می آید که به وسیله آن می توان مقدار فشار داخل بستر را محاسبه نمود:

$$\int_{CV} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV = \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P) dV - \int_{CV} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (32)$$

شرایط مرزی معادله پیوستگی به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

$$P \Big|_{face2/1} = P_{cham} \quad (33)$$

$$\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face1} = \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face2/2} = \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face3} = \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face4} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face5} = \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{face6} = 0$$

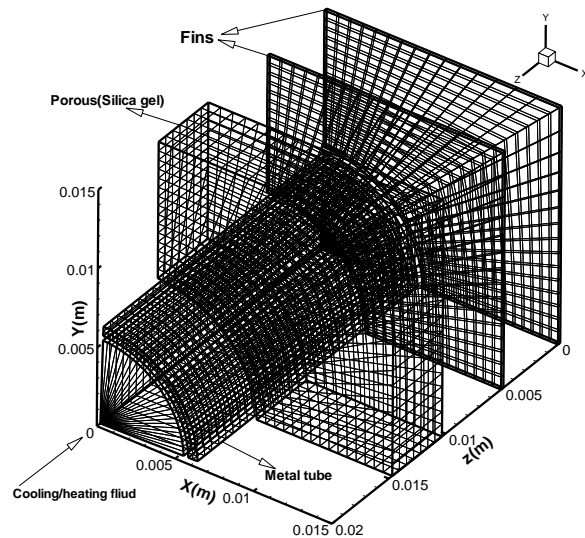
همچنین از رابطه گاز کامل به صورت رابطه (۳۵) برای محاسبه مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده استفاده شده است:

$$P = \rho_g R_g T_b \quad (35)$$

نمودند که تغییرات تخلخل را نسبت به قطر ذرات و فاصله بین دو استوانه نشان می‌دهد. اگر از این رابطه با یک تقریب برای بستر با فین‌های صفحه‌ای استفاده شود و بجای فاصله بین دو استوانه، کوچکترین مقدار از بین فاصله بین دو فین و ارتفاع فین قرار داده شود می‌توان تقریبی از تغییرات تخلخل در حوزه مورد بررسی در این مطالعه بدست آورد. مقدار تغییر در تخلخل بیشتر در قطرهای بزرگ ذرات جاذب و ابعاد کوچک بستر اتفاق می‌افتد اما در این قطرهای بزرگ مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای بسیار ناچیز است و می‌توان گفت تغییرات فشار در بستر وجود ندارد و تغییر در تخلخل بستر تغییری در رفتار جریان داخل بستر به وجود نمی‌آورد. از طرفی در قطر ذرات کوچک که تغییرات فشار در بستر وجود دارد مقدار تغییر در تخلخل بستر بسیار ناچیز است. با مقایسه نتایج حاصل از تخلخل بستر ثابت و تخلخل متغیر با قطر [۱۹] در چند قطر مختلف دیده شد که حداکثر ۳٪ تفاوت در نتایج وجود دارد و در این مطالعه از تغییرات تخلخل نسبت به قطر صرف نظر شده است.

نتایج بدست 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. بنابراین نیاز است یک مقدار مناسب از تعداد شبکه برای ادامه محاسبات انتخاب شود تا علاوه بر ارائه نتایج با دقت مناسب هزینه محاسباتی زیادی نداشته باشد. با استفاده از شبکه بندی  $16 \times 16 \times 8$  برای ناحیه بین هر دو فین نتایج با حدود ۲٪ خطا نسبت به شبکه ریزتر بدست خواهد آمد و این تعداد شبکه برای نواحی متخلخل بین دو فین انتخاب می‌شود. با انتخاب ۳ شبکه برای امتداد شعاعی لوله فلزی، نتایج با خطای کمتر از ۰/۱٪ 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 می‌افتد 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 می‌افتد تغییرات کمتری وجود دارد، بنابراین از دو گام زمانی مختلف برای این مراحل استفاده شده است. با انتخاب گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی ۰/۰۶ ثانیه برای مراحل فشار ثابت نتایج با حدود ۱/۵٪ خطا نسبت به گام زمانی کوچکتر بدست خواهد آمد که قابل قبول است و برای محاسبات انتخاب شده است.

برای بررسی درستی برنامه رایانه‌ای نوشته شده و روش مدل سازی نیاز است نتایج عددی بدست آمده با نتایج حاصل از



شکل (۴): شبکه بندی حوزه‌های مختلف حل

معادلات حاکم بر چهار حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و بستر با استفاده از روش حجم کنترل حل شده‌اند. با توجه به اینکه معادلات حاکم بر بستر ماده جاذب به هم وابسته‌اند و همچنین معادلات مربوط به حوزه‌های مختلف با هم مرتبط هستند باید از الگوریتمی استفاده شود تا بتواند با شروع از مقدار اولیه، مراحل مختلف سیکل را مدل سازی نمود. پس از اعمال شرایط اولیه، حل از مرحله و سیکل اول آغاز می‌شود. پس از اینکه مرحله سیکل در گام زمانی معین شد به ترتیب معادلات انرژی برای سیال ناقل حرارت، لوله فلزی و فین شماره یک حل می‌شود. سپس به ترتیب معادله انرژی برای فین‌های nام و معادلات انرژی و پیوستگی برای ناحیه متخلخل بین آن دو فین حل می‌شود. ترتیب حل معادلات ناحیه متخلخل به این صورت است که ابتدا با استفاده از معادله (۳۲) مقدار فشار در هر حجم کنترل بدست می‌آید و سپس با استفاده از رابطه داریسی توزیع سرعت در بستر محاسبه می‌شود. حال با داشتن مقادیر سرعت، مقدار دما از معادله انرژی بدست می‌آید. پس از اینکه معادلات مربوط به تمامی فین‌ها و نواحی متخلخل بین آنها حل شد اگر معیار همگرایی ارضا شده باشد گام زمانی بعد آغاز می‌شود و در غیر این صورت تکرار از معادله انرژی سیال ناقل حرارت آغاز می‌شود. پس از همگرا شدن هر گام زمانی مرحله سیکل در گام بعد معین شده و حل معادلات ادامه می‌یابد.

تغییر در قطر ذرات جاذب و ابعاد هندسی بستر باعث تغییر در تخلخل بستر خواهد شد به این صورت که با افزایش قطر ذرات جاذب و کاهش فاصله بین سطوح بستر، تغییر در تخلخل بستر افزایش می‌یابد [۲۰، ۱۹]. سودر و همکارش [۱۹] در مطالعه خود روی ستون ذرات جاذب بین دو استوانه هم مرکز رابطه‌ای معرفی

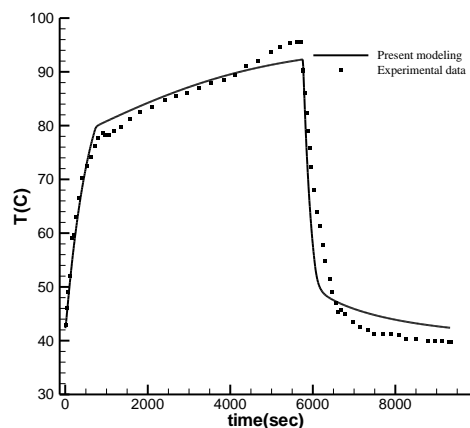
جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب در مدل سازی استفاده شده و سیال آب داخل لوله های بستر، کندانسور و اواپراتور جریان دارد. مقدار ضریب انتقال حرارت هدایت بستر تا حدی وابسته به مقدار جذب و تخلخل بستر است اما به دلیل ناچیز بودن تغییرات در حوزه مورد بررسی در این مطالعه ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شرایط اصلی

پارامتر	علامت	واحد	مقدار
قطر داخلی لوله فلزی	$D_i$	mm	۱۰/۹۲
قطر خارجی لوله فلزی	$D_o$	mm	۱۲/۷
ضخامت فین ها	F.T	mm	۰/۲
ارتفاع فین ها	F.H	mm	۳۰
فاصله بین فین ها	F.S	mm	۶
نرخ انتقال جرم سیال حرارتی	$\dot{m}_f$	kg/s	۰/۰۳
چگالی ماده جاذب	$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	۷۰۰
ظرفیت گرمایی ویژه بستر	$C_{p_b}$	J/(kg.K)	۹۲۴
ضریب انتقال حرارت بستر	$\lambda_b$	W/(m.K)	۰/۲
تخلخل بستر	$\epsilon_b$	-	۰/۳۶
تخلخل ذرات	$\epsilon_p$	-	۰/۴۶
گرمای جذب	$\Delta H$	J/kg	۲۷۶*۱۰ <sup>۴</sup>
دمای اواپراتور	$T_{evap}$	K	۱۰+۲۷۳/۱۵
دمای کندانسور	$T_{cond}$	K	۳۰+۲۷۳/۱۵
دمای سیال حرارتی در مرحله گرمایش	$T_{heatin g}$	K	۹۰+۲۷۳/۱۵
دمای سیال حرارتی در مرحله سرمایش	$T_{coolin g}$	K	۳۰+۲۷۳/۱۵

برای درک بهتر پارامترهای موثر بر رفتار چیلر ابتدا به بررسی رفتار بستر در مراحل مختلف سیکل پرداخته می شود. در مرحله گرمایش جرم ثابت آب گرم در داخل لوله فلزی جریان دارد و باعث گرم شدن لوله فلزی و فین ها می شود. انتقال حرارت از سطوح حرارتی لوله فلزی و فین ها به بستر ماده جاذب انجام می شود. بستر ماده جاذب از مرحله قبل (مرحله چهارم سیکل قبل) مقدار زیادی بخار در خود جذب نموده است. با گرم شدن، سیال عامل جذب شده در بستر احیا شده و باعث می شود فشار بستر در کنار سطوح حرارتی که گرم شده اند افزایش یابد و یک جریان از نواحی پر فشار به سمت محفظه شکل گیرد. شیرهای ارتباطی بین کندانسور و اواپراتور بسته است و ورود سیال عامل از بستر به محفظه باعث افزایش فشار محفظه می شود. این مرحله تا زمانی که فشار محفظه، که نسبت به مکان ثابت فرض شده است، به فشار کندانسور برسد ادامه می یابد. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود بر خلاف نواحی نزدیک به لوله فلزی و فین ها که در اثر انتقال حرارت در حال

یک نمونه تجربی مقایسه شود. به دلیل در دسترس نبودن نتایج تجربی برای چیلر با مبدل حرارتی لوله با فین های صفحه ای، برای بررسی صحت نتایج، شبکه بندی یک چهارم استوانه توسط برنامه کامپیوتری در مختصات عمومی تولید شده و نتایج با مقادیر بدست آمده از نمونه تجربی با مبدل حرارتی لوله دارای فین های حلقوی مقایسه شده اند. تاکنون تاثیر قطر ذرات بستر ماده جاذب به صورت تجربی مورد بررسی قرار نگرفته و بی شک در صورتی که نتایج تجربی برای تاثیر قطر ذرات موجود باشد، برای اعتبارسنجی مناسب تر است. رستوکیا و همکارانش [۲۱] در یک مطالعه آزمایشگاهی از جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب استفاده نموده اند. نتایج این مقاله فقط برای یک قطر خاص (۰/۸ mm) ارائه شده و تاثیر قطر ذرات، مورد بررسی قرار نگرفته است بنابراین اعتبارسنجی تنها برای یک قطر انجام شده است. مبدل حرارتی که به عنوان بستر ماده جاذب استفاده شده لوله هایی با فین های حلقوی از جنس فولاد زنگ نزن است که فضای بین فین ها با ذرات سیلیکاژل پر شده است. در شکل (۵) مقدار دمای میانگین بستر در نمونه آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی نشان داده شده و مشاهده می شود نتایج به خوبی بر هم منطبق هستند. اطلاعات بیشتر در رابطه با نمونه تجربی در مرجع [۲۱] بیان شده است.

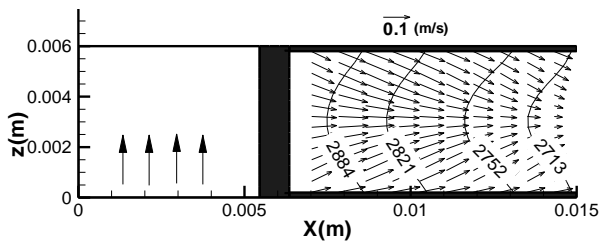


شکل (۵): مقایسه مقادیر محاسبه شده دمای میانگین بستر به روش عددی و تجربی

#### ۴- نتایج

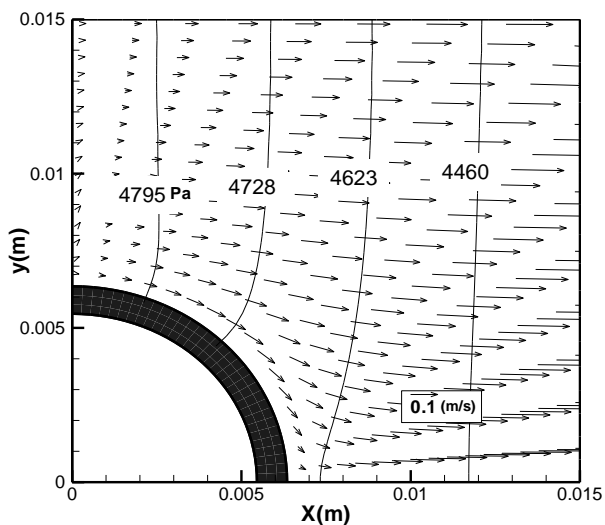
در این بخش ابتدا توزیع فشار و سرعت سیال ناقل حرارت در بستر ماده جاذب در مراحل مختلف سیکل بررسی شده اند و سپس تاثیر قطر ذرات جاذب بر عملکرد چیلر جذب سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شرایط اصلی در جدول (۱) بیان شده است. لوله فلزی از جنس مس و فین ها از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده و از





شکل (۷): کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در مرحله اول در صفحه  $x=0$

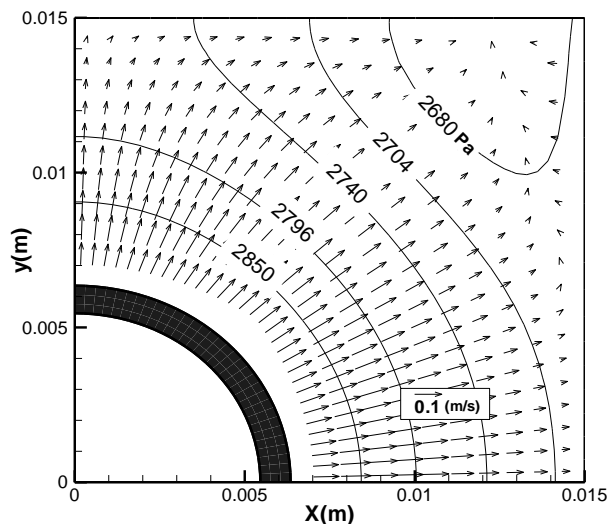
پس از اینکه فشار محفظه و کندانسور برابر شد شیر ارتباطی بین محفظه و کندانسور باز شده و مرحله گرمایش فشار ثابت آغاز می‌شود. گرمایش بستر در این مرحله توسط سیال ناقل حرارت ادامه می‌یابد و فشار محفظه ثابت و برابر فشار کندانسور است. در اثر ادامه گرمایش، سیال عامل، احیا شده و وارد محفظه و سپس وارد کندانسور می‌شود. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود هیچ جریانی از محفظه به داخل بستر وجود ندارد. سیال عامل احیا شده در بستر تنها از مرز سمت راست می‌تواند وارد محفظه شود و باعث می‌شود یک جریان موازی بجز در نواحی نزدیک فین‌ها و لوله فلزی به سمت محفظه شکل گیرد. خطوط فشار ثابت عمود بر بردارهای سرعت هستند و به دلیل فشار ثابت در محفظه تقریباً موازی مرز سمت راست می‌باشند.



شکل (۸): کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در مرحله دوم در صفحه بین دو فین

در شکل (۹) بردارهای سرعت و کانتورهای فشار نشان داده شده و مشاهده می‌شود یک جریان تقریباً موازی فین‌ها از بستر به محفظه جریان دارد. پس از رسیدن به درصد مشخصی از جذب نهایی این مرحله به اتمام می‌رسد.

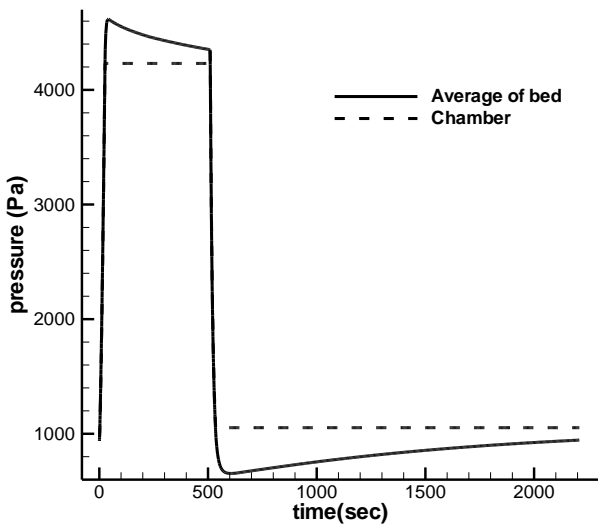
احیا می‌باشند، ذرات جاذب گوشه بالا سمت راست در حال جذب هستند و تولید یک ناحیه کم فشار در این منطقه می‌نمایند. سیال عامل هم از ناحیه احیا شده اطراف لوله فلزی و فین‌ها و هم از محفظه، جذب ذرات جاذب در این ناحیه می‌شود. شکل رسم شده مربوط به یک لحظه از مرحله اول است و ناحیه‌ای که سیال عامل از اطراف در آن جذب می‌شود نسبت به زمان تغییر می‌کند. دلیل این امر آن است که اولاً این ناحیه در مرحله قبل به دلیل انتقال حرارت کمتر نسبت به دیگر قسمت‌های بستر، سیال عامل کمتری جذب نموده و در حال حاضر ظرفیت جذب مقدار بیشتر سیال عامل را دارد و ثانیاً از آنجا که این ناحیه به علت دارا بودن بیشترین فاصله از سطوح حرارتی تحت تاثیر حرارت از سطح لوله و فین‌ها قرار نگرفته است فرایند احیا در این ناحیه شروع نشده و در واقع فرایند جذب سیال در این ناحیه ادامه دارد.



شکل (۶): کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در مرحله اول در صفحه بین دو فین

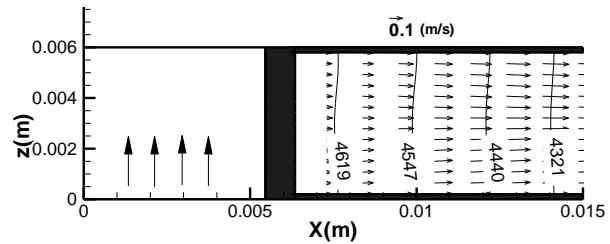
سطوح انتقال حرارت شامل فین‌ها و سطح بیرونی لوله فلزی به شدت بر فرایند انتقال حرارت و انتقال جرم در بستر ماده جاذب تاثیر دارند. برای مشاهده اثر فین‌ها، بردارهای سرعت و کانتورهای فشار در صفحه عمود بر فین‌ها در مرحله اول در شکل (۷) نشان داده شده است. نواحی نزدیک‌تر به فین‌ها زودتر تحت تاثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرند و باعث می‌شود سیال عامل موجود در ذرات جاذب نزدیک به فین‌ها زودتر احیا شوند. سیال عامل احیا شده از ذرات در نزدیک فین‌ها وارد قسمت‌های میانی بین دو فین شده و از بستر خارج می‌شود.

شده و احیا سیال عامل در فشار ثابت محفظه ادامه می‌یابد. به دلیل مقاومت انتقال جرم بین ذرات جاذب، هنگامی که فشار محفظه به فشار کندانسور رسیده است، فشار در نقاط داخلی بیشتر از فشار محفظه می‌باشد که باعث می‌شود فشار میانگین بستر از فشار محفظه بیشتر باشد. هنگامی که فشار محفظه در فشار کندانسور ثابت می‌ماند، با کاهش نرخ احیا سیال عامل به تدریج فشار میانگین بستر کاهش می‌یابد و به فشار کندانسور میل می‌کند. پس از اینکه مرحله دوم به پایان رسید، شیرهای ارتباطی با کندانسور و اواپراتور بسته شده و فرایند جذب در جرم ثابت با سرد نمودن ذرات جاذب شروع می‌شود. این عمل باعث می‌شود فشار محفظه تا فشار اواپراتور سریعاً کاهش یابد. مجدداً مشاهده می‌شود که فشار میانگین بستر تا حدی کمتر از فشار محفظه است. همین اختلاف فشار باعث راندن بخار موجود در محفظه به لایه‌های میانی بستر می‌شود تا در آنجا جذب شود. بدیهی است هرچه زمان به انتهای فرایند جذب در ناحیه فشار ثابت محفظه نزدیکتر شود اختلاف فشار میانگین بستر و محفظه کمتر می‌شود.



شکل (۱۰): تغییرات فشار میانگین بستر و فشار محفظه بر حسب زمان

یکی از پارامترهای مهمی که باید در مسیر ساخت چیلر جذب سطحی انتخاب شود قطر ذرات جاذب است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود یک مقدار بهینه برای زمان سیکل نسبت به قطر ذرات جاذب برابر ۲۰۰۰ ثانیه در قطر ۰/۳۷ میلی‌متر وجود دارد که البته باید توجه شود این مقدار وابسته به پارامترهای زیادی مانند نوع ذرات جاذب و سیال جذب شونده و ارتفاع فین است اما رفتار کلی یکسان است. با کاهش قطر ذرات، فضای خالی بین ذرات جاذب کاهش یافته و این باعث می‌شود سیال عامل جذب یا احیا شده مسیر سخت‌تری را از بین ذرات



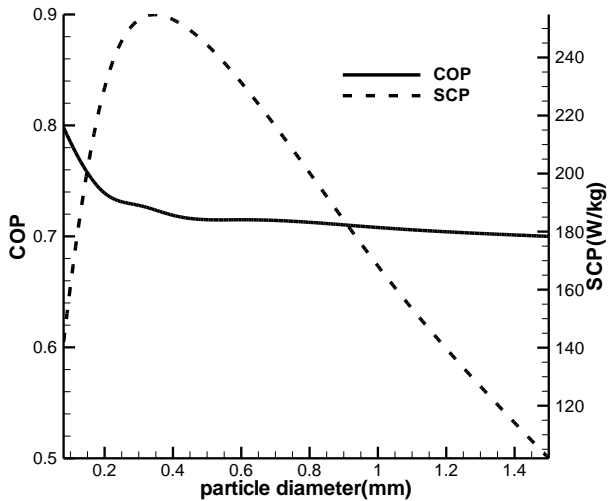
شکل (۹): کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در مرحله دوم در صفحه  $x=0$

در مرحله سرمایش جرم ثابت مشابه مرحله ۱ شیرهای ارتباطی بین کندانسور و اواپراتور بسته است. در داخل لوله فلزی که تاکنون آب گرم جریان داشت، آب سرد وارد می‌شود و ذرات جاذب نزدیک‌تر به لوله فلزی و فین‌ها شروع به سرد شدن می‌نمایند و در نتیجه سیال عامل در این نواحی در ذرات جاذب جذب شده و باعث کاهش نسبی فشار در این قسمت‌ها می‌شود. فشار محفظه به علت شروع فرایند جذب شروع به کاهش نموده و در تمام نقاط محفظه ثابت فرض شده است. مشابه مرحله اول، ناحیه گوشه بالا سمت راست بر خلاف دیگر نواحی بستر در حال احیا است و در اثر این عمل یک ناحیه پرفشار نسبی به وجود می‌آید که باعث می‌شود بخشی از بخار احیا شده به سمت محفظه جریان یابد و بخشی در نواحی کم فشار اطراف لوله و فین‌ها جذب شود. دلیل این امر آن است که انتقال حرارت در نواحی دور از لوله فلزی و فین‌ها دیرتر اتفاق می‌افتد و این نواحی در مرحله قبل نسبت به سایر قسمت‌ها کمتر احیا شده‌اند. از طرفی این نواحی با تاخیر تحت تاثیر تغییر حالت از گرمایش به سرمایش قرار می‌گیرند و هنگامی که نواحی نزدیک به فین‌ها و لوله فلزی در حال خنک شدن و جذب هستند ناحیه دور از سطوح همچنان در حال احیا می‌باشند.

در مرحله سرمایش فشار ثابت شیر بین محفظه و اواپراتور باز است و فشار محفظه برابر با فشار اواپراتور می‌باشد و خنک نمودن بستر و جذب سیال عامل ادامه می‌یابد و مشابه مرحله دوم کانتورهای فشار ثابت بر بردارهای جریان عمود هستند.

بررسی تغییرات زمانی فشار متوسط بستر و فشار محفظه به درک مراحل مختلف سیکل کمک می‌نماید. در شکل (۱۰) تغییرات فشار میانگین در بستر ماده جاذب و فشار محفظه بر حسب زمان نشان داده شده است. در مرحله جرم ثابت که شیرهای ارتباطی با کندانسور و اواپراتور بسته‌اند، افزایش دما باعث احیا سیال عامل شده و فشار در بستر و محفظه افزایش می‌یابد. افزایش فشار در این مرحله در زمان کوتاهی نسبت به مراحل فشار ثابت انجام می‌شود و هنگامی که فشار داخل محفظه به فشار کندانسور برسد، شیر ارتباطی با کندانسور باز

تاثیر زمان سیکل قرار دارد و همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود دارای یک مقدار حداکثر برابر  $250 \text{ W/kg}$  در قطر ذره  $0.37$  میلی‌متر است.



شکل (۱۲): تغییرات ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات جاذب

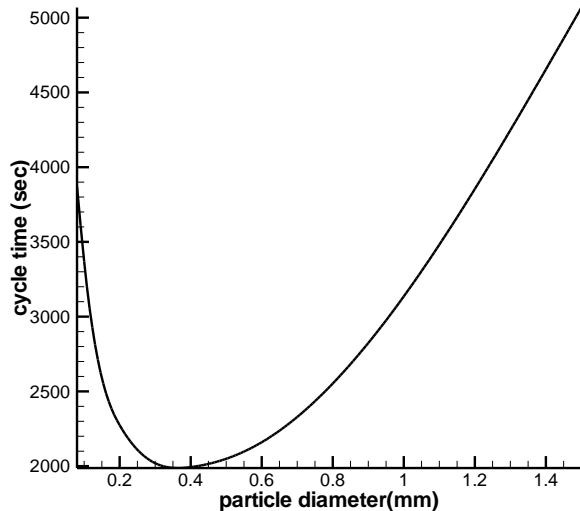
## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله چیلر جذب سطحی که در آن از مبدل صفحه‌ای به‌عنوان بستر ماده جاذب استفاده شده با حل سه بعدی معادلات حاکم مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی نتایج مشاهده شد مقدار زمان سیکل دارای یک مقدار کمینه در قطر ذرات جاذب  $0.37$  است و با افزایش یا کاهش قطر ذرات نسبت به این مقدار، زمان سیکل افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب عملکرد با افزایش قطر ذرات جاذب مقدار کمی کاهش می‌یابد و ظرفیت سرمایش مخصوص دارای یک مقدار بهینه در قطر  $0.37$  است.

## ۶- فهرست علائم

$A$	مساحت،
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $\text{J/kg K}$
$D_k$	پخشندگی نودسن، $m$
$D_m$	پخشندگی کانتینیوم، $m$
$d_p$	قطر ذرات جاذب، $m$
$E_a$	انرژی فعال سازی، $\text{J/kg}$
$FT$	ضخامت فین، $m$
$FS$	فاصله بین فین‌ها، $m$

طی نماید و در واقع مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای افزایش یابد که این امر باعث افزایش زمان سیکل خواهد شد. با افزایش قطر ذرات جاذب، مقاومت درون ذره‌ای افزایش یافته و باعث می‌شود سیال عامل با سرعت کمتری در ذرات جاذب جذب یا احیا شود که این امر باعث افزایش زمان سیکل خواهد شد.



شکل (۱۱): تغییرات زمان سیکل بر حسب قطر ذرات جاذب

در بررسی عملکرد و فرایند طراحی چیلر جذب سطحی دو پارامتر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص اهمیت زیادی دارند که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (39)$$

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_{silica\ gel} \cdot cycle\ time} \quad (40)$$

ظرفیت سرمایش با افزایش قطر ذرات جاذب مقدار کمی کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در مرحله سوم و چهارم که عمل جذب انجام می‌شود ذراتی که به لوله فلزی نزدیکتر هستند دارای فشار کمتری نسبت به سطح مشترک بین بستر و محفظه هستند. این اختلاف فشار داخل بستر در قطر ذرات کوچک‌تر بیشتر است و چون با کاهش فشار مقدار جذب تعادلی کاهش می‌یابد مقدار بیشتری از بخار موجود در محفظه و اواپراتور جذب در ذرات جاذب شود و تا حدی ظرفیت سرمایش افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود ضریب عملکرد در قطر ذرات کوچک‌تر مقدار کمی بیشتر باشد. همان‌طور که بیان شد زمان سیکل دارای یک مقدار کمینه است و ظرفیت سرمایش با تغییر قطر ذرات جاذب تغییر کمی دارد. جرم ذرات جاذب نیز تقریباً ثابت است بنابراین ظرفیت سرمایش مخصوص بیشتر تحت

“Cooling output performance of a prototype adsorption heat pump with fin-type silica gel tube module”, Applied Thermal Engineering, No. 28, pp. 87- 93, 2008.

Miyazaki T., Akisawa A., “The influence of heat exchanger parameters on the optimum cycle time of adsorption chillers”, Applied Thermal Engineering, No. 29, pp. 2708-2717, 2009. [۷]

Khan M., Alam K., Saha B., Hamamoto Y., Akisawa A., Kashiwagi T., “Parametric study of a two-stage adsorption chiller using re-heat-The effect of overall thermal conductance and adsorbent mass on system performance”, International Journal of Thermal Sciences, No. 45, pp. 511- 519, 2006. [۸]

Di J., Wu J., Xia Z., Wang R., “Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature”, International Journal of Refrigeration, No. 30, pp. 515- 526, 2007. [۹]

Freni A., Bonaccorsi L., Proverbio E., Maggio G., Restuccia G., “Zeolite synthesised on copper foam for adsorption chillers: A mathematical model”, Microporous and Mesoporous Materials, No. 120, pp. 402- 409, 2009. [۱۰]

Wu W., Zhang H., Sun D., “Mathematical simulation and experimental study of a modified zeolite 13X-water adsorption refrigeration module”, Applied Thermal Engineering, No. 29, pp. 645- 651, 2009. [۱۱]

Zhang L., “A three-dimensional non-equilibrium model for an intermittent adsorption cooling system”, Solar energy, No. 69, pp. 27- 35, 2000. [۱۲]

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, No. 29, pp. 2100- 2105, 2009. [۱۳]

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, No. 47, pp. 2167- 2177, 2006. [۱۴]

Poyelle F., Guillemintot J., Meunier F., “Experimental tests and predictive model of an adsorptive air conditioning unit”, Ind Eng Chem Res, No. 38, pp. 298- 309, 1999. [۱۵]

Saha B., Chakraborty A., Koyama S., Aristov Y., “A new generation cooling

h ضریب انتقال حرارت جابجایی،  $W \cdot m^{-2} \cdot I$   
 $K_{app}$  نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب،  $m^2$   
 $M$  جرم مولکولی،  $kg/mol$   
 $n$  بردار عمود بر صفحه  
 $P$  فشار، Pa  
 $R$  ثابت جهانی گازها،  $J/kmc$   
 $SCP$  ظرفیت سرمایش مخصوص،  $W/kg$   
 $t$  زمان، s  
 $T$  دما،  
 $u$  سرعت،  $m/s$

علائم یونانی

گرمای جذب،  $J/kg$

$\Delta H$

تخلخل

$\varepsilon$

ضریب انتقال حرارت هدایت،  $W \cdot m \cdot I$

$\lambda$

ویسکوزیته،  $N/i$

$\mu$

زیر نویس ها

$b$

بستر ماده جاذب

$f$

سیال ناقل حرارت

$g$

فاز بخار سیال عامل احیا شده

۷- مراجع

Aristov Y., “New family of solid sorbents for adsorptive cooling: Material scientist approach”, Journal of Engineering Thermophysics, No. 16, pp. 63- 72, 2007. [۱]

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, No. 47, pp. 1587- 1598, 2004. [۲]

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, No. 53, pp. 1473-1482, 2010. [۳]

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, No. 47, pp. 659- 669, 2004. [۴]

Miyazaki T., Akisawa A., Saha B., El-Sharkawy I., Chakraborty A., “A new cycle time allocation for enhancing the performance of two-bed adsorption chillers”, International Journal of Refrigeration, No. 32, pp. 846- 853, 2009. [۵]

Kubota M., Ueda T., Fujisawa R., Kobayashi J., Watanabe F., Kobayashi N., Hasatani M,

275, 1998.

Klerk A., "Voidage Variation in Packed Beds at Small Column to Particle Diameter Ratio", AIChE Journal, No. 49, pp. 2022-2029, 2003. [۲۰]

Restuccia G., Freni A., Vasta S., Aristov Y., "Selective water sorbent for solid sorption chiller, experimental results and modelling", International Journal of Refrigeration, No. 27, pp. 284- 293, 2004. [۲۱]

device employing CaCl<sub>2</sub>-in-silica gel-water system", International Journal of Heat and Mass Transfer, No. 52, pp. 516- 524, 2009.

Demir H., Mobedi M., Ülkü S., "Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed", International Communications in Heat and Mass Transfer, No. 36, pp. 372- 377, 2009. [۱۷]

Do D; Adsorption analysis: equilibria and kinetics, Volume 2, Imperial College Press London, 1998. [۱۸]

Sodre J.R., Parise J.A.R., "Fluid flow pressure drop through an annular bed of spheres with wall effects", Experimental Thermal and Fluid Science, No. 17, pp. 265-