



مدلسازی بستر چیلر جذب سطحی به منظور بررسی تاثیر قطر ذرات در شرایط مختلف

هدی طالبیان^۱، مهدی مهدوی خواه^۲ و حمید نیازمند^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

اندازه قطر ذرات جاذب تاثیر زیادی بر عملکرد چیلرهای جذب سطحی دارد و مقدار انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای را مستقیماً تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییرات عملکرد سیستم نسبت به قطر ذرات جاذب وابسته به پارامترهای زیادی است. این مطالعه به تاثیر برخی از مهمترین پارامترها شامل ارتفاع فین‌ها، فاصله بین فین‌ها، دمای آب گرم و دمای آب خنک‌کننده بر قطر بهینه ذرات جاذب که متناظر با حداکثر ظرفیت سرمایش مخصوص است، می‌پردازد. از یک مدل حرارتی که شامل لوله‌های فلزی و فین‌های صفحه‌ای بوده و فضای بین فین‌ها با ذرات سیلیکاژل SWS-1L پر شده، استفاده شده است. معادلات بستر به صورت سه‌بعدی و همزمان با معادلات مربوط به سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و محفظه حل شده‌اند. پس از بررسی نتایج، مشاهده شد مقدار زمان سیکل و ظرفیت سرمایش مخصوص دارای مقداری بهینه نسبت به قطر ذرات جاذب بوده که این قطر با افزایش ارتفاع فین، افزایش یافته و با افزایش فاصله بین فین‌ها اندکی کاهش می‌یابد. همچنین اندازه این قطر بهینه با افزایش دمای آب گرم و آب خنک‌کننده افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: چیلر جذب سطحی؛ مدلسازی عددی؛ قطر ذرات جاذب؛ ارتفاع فین؛ دمای آب گرم.

۱- مقدمه

بستر تا فشار اواپراتور پایین می‌آید. در مرحله دوم شیر ارتباطی بین بستر سمت چپ و کندانسور و شیر بین بستر سمت راست و اواپراتور باز می‌شود. گرم کردن بستر سمت چپ و سرد کردن بستر سمت راست ادامه می‌یابد. سیال احیا شده در بستر سمت چپ با عبور از کندانسور تقطیر شده و با گذشتن از شیر اختناق کاهش فشار یافته، وارد اواپراتور می‌شود. سیال عامل در اواپراتور گرمای نهان خود را از سیال داخل لوله‌های اواپراتور گرفته و تبخیر می‌شود. این امر باعث

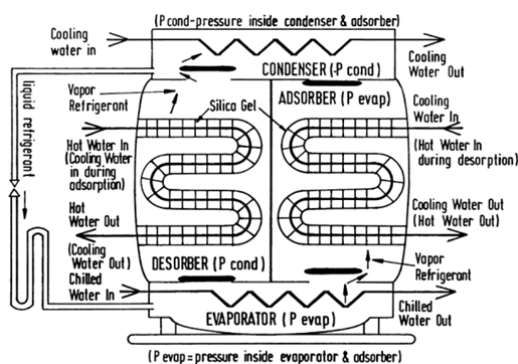
سیکل کامل چیلر جذب سطحی از چهار مرحله تشکیل شده است. مطابق شکل ۱، در مرحله اول شیرهای ارتباطی بین بسترها، کندانسور و اواپراتور در وضعیت بسته قرار دارند. در این حالت آب گرم وارد لوله فلزی بستر سمت چپ شده و با احیای سیال عامل، فشار بستر تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد. در همین لحظه آب سرد وارد لوله فلزی بستر سمت راست می‌شود و با جذب سیال عامل در ذرات جاذب، فشار

ارائه کرده‌اند. دائو^۶ و همکارانش [۵] در مطالعه‌ای تجربی نشان دادند که استفاده از ترکیب CaCl_2 در سیلیکاژل، ظرفیت سرمایش مخصوص را بیش از دو برابر و ضریب عملکرد را حدود ۲۵٪ نسبت به سیلیکاژل معمولی بهبود می‌دهد، بنابراین می‌توان با فضای اشغال شده کمتر به ظرفیت سرمایش مورد نظر دست یافت.

یکی از عوامل مهمی که در عملکرد چیلرهای جذب سطحی تاثیر دارد، قطر ذرات جاذب مورد استفاده در بستر است. چانگ^۷ و همکارانش [۶] تاثیر ضخامت لایه جاذب و اندازه ذرات جاذب را به صورت تجربی مطالعه کرده‌اند. گلزنو^۸ و اریستو^۹ [۷] در یک مطالعه تجربی تاثیر اندازه ذرات جاذب سیلیکاژل را در چیلر جذب سطحی مطالعه کرده‌اند. با توجه به اینکه تغییر در قطر ذرات جاذب، انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد، برای بررسی تاثیر قطر ذرات جاذب بر عملکرد چیلر باید بستر را به گونه‌ای مدلسازی کرد که هر دو انتقال جرم درون ذره-ای و برون ذره‌ای در نظر گرفته شود. در بسیاری از مطالعات مربوط به مدلسازی بستر چیلرهای جذب سطحی، تقریب فشار یکنواخت برای بستر در نظر گرفته شده و مقاومت انتقال جرم بین ذرات ناچیز فرض شده است [۸-۱۰]. 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 می‌باشد، قابل قبول است. در برخی مطالعات برای بدست آوردن نتایجی دقیق‌تر، معادلات پیوستگی و مومنتوم را برای محاسبه توزیع فشار داخل بستر حل کرده‌اند [۱۱-۱۳]. بررسی فرآیندها در یک ناحیه متخلخل که بر اساس در نظر گرفتن مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای هستند، پیچیده‌تر است و گاهی اوقات نیاز است معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال حرارت همزمان حل شوند.

لئونگ^{۱۰} و لیو^{۱۴} [۱۴] با استفاده از یک مدلسازی عددی که در آن هر دو مقاومت درون ذره‌ای و برون ذره‌ای در نظر

تولید سرمایش در اواپراتور می‌گردد. بخار تولیدی در اواپراتور 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 خواهد شد. در این مرحله با جذب سیال عامل در ذرات جاذب، فشار بستر سمت چپ تا فشار اواپراتور کاهش خواهد یافت. مرحله چهارم عکس مرحله دوم بوده و بدین ترتیب یک سیکل کامل خواهد شد.



شکل ۱- طرح کلی از اجزای چیلر جذب سطحی [۱]

از آن جا که فرآیند اصلی در چیلرهای جذب سطحی، جذب و احیا سیال عامل در بستر ماده جاذب است، لذا انتخاب جفت جاذب و جذب شونده مناسب از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. یکی از جفت‌های جاذبی که معمولاً در چیلرهای جذب سطحی استفاده می‌شود، جفت سیلیکاژل-آب است. سیلیکاژل در انواع ^1RD و $^2\text{3A}$ مورد بررسی قرار گرفته و معادلات جذب به صورت تجربی برای آن بدست آمده است [۲]. در این میان، خانواده جدیدی از سیلیکاژل‌ها با عنوان ^3SWS بررسی شده‌اند که دارای ظرفیت جذب بالاتری نسبت به انواع RD می‌باشند [۳]. ساها^۴ و همکارانش [۴] استفاده از دو نوع RD و $^5\text{SWS-IL}$ را در چیلر جذب سطحی مقایسه کرده و معادلات جذب برای این دو جاذب را

⁶ Daou

⁷ Chang

⁸ Glaznev

⁹ Aristov

¹⁰ Leong

¹ Regular Density

² Angstrom

³ Selective Water Sorbent

⁴ Saha

⁵ CaCl_2 in mesoporous silica gel

به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه تاثیر قطر ذرات جاذب تنها در یک شرایط خاص مطالعه شده و تاثیر پارامترهای دیگر بر مقدار قطر بهینه مورد بررسی قرار نگرفته‌است. در این مطالعه نشان داده شد که ضریب عملکرد چیلر با افزایش قطر ذرات جاذب مقدار ناچیزی تغییر می‌کند و برای ظرفیت سرمایش مخصوص یک مقدار بهینه نسبت به قطر ذرات جاذب وجود دارد.

یکی دیگر از پارامترهایی که بر عملکرد چیلر تاثیر دارد، دمای آب گرم ورودی و دمای آب خنک‌کننده است که در داخل لوله فلزی جریان دارد. مراجع [۲۱-۲۵] با استفاده از یک مطالعه تجربی نشان داده‌اند مقدار ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد با افزایش دمای آب گرم ورودی و کاهش دمای آب خنک‌کننده افزایش می‌یابد. میازاکی^۶ و همکارانش [۲۶] با مطالعه عددی چیلری با دو اواپراتور و سه بستر نشان دادند مقدار ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص با افزایش دمای آب گرم ورودی افزایش می‌یابد. ریفل^۷ و همکارانش [۲۷] با استفاده از یک مطالعه عددی در مختصات استوانه‌ای تاثیر دمای آب گرم، آب خنک‌کننده و آب سرد شونده را بر عملکرد چیلر دارای فین‌های حلقوی مطالعه کرده‌اند. در این مقاله فشار بستر یکنواخت فرض شده و از تغییرات دمایی در جهت شعاعی برای لوله فلزی و سیال ناقل حرارت صرف نظر شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌گردد در هیچ کدام از مطالعات گذشته تاثیر دمای آب گرم و دمای آب خنک‌کننده بر روی قطر بهینه ذرات جاذب بررسی نشده‌است. قطر ذرات جاذب، ظرفیت سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد چیلر را تحت تاثیر قرار می‌دهد و چگونگی تاثیر عملکرد چیلر نسبت به قطر ذرات وابسته به پارامترهای هندسی و عملکردی می‌باشد. در صورتی که در هیچ یک از مطالعاتی که روی بستر ماده جاذب چیلرهای جذب سطحی انجام گرفته، تاثیر همزمان قطر ذرات و این پارامترها بررسی نشده‌است. در این مطالعه تاثیر برخی از مهمترین پارامترها مانند ارتفاع فین‌ها، فاصله بین فین‌ها، دمای آب گرم و آب خنک‌کننده بر عملکرد چیلر نسبت به قطر ذرات جاذب مورد بررسی قرار گرفته‌است.

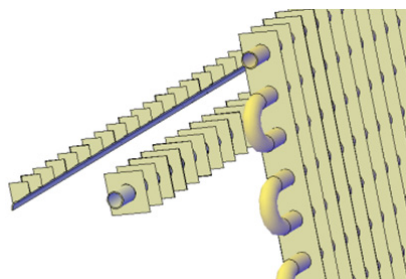
گرفته شده‌است، تاثیر قطر ذرات و ضخامت لایه جاذب روی لوله بدون فین را بررسی کرده‌اند. همچنین در این مطالعه تاثیر تخلخل بستر و دمای آب گرم ورودی به بستر بر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص مورد بررسی قرار گرفته‌است؛ اگرچه تاثیر عوامل هندسی و عملکردی بستر بر قطر بهینه ذرات جاذب مطالعه نشده‌است.

با توجه به ضریب انتقال حرارت هدایت پایین ذرات جاذب، استفاده از فین عملکرد بستر جاذب را به میزان زیادی بهبود می‌بخشد. ژانگ^۲ [۱۵] یک مدل سه بعدی همراه با محاسبه توزیع فشار برای ذرات جاذب اطراف یک لوله فلزی با فین‌های طولی را مطالعه کرده است. در این مقاله از رابطه داری برای محاسبه فشار در بستر استفاده شده‌است. سان^۳ [۱۶] یک پمپ حرارتی با فین‌های صفحه‌ای را به منظور تعیین مقدار بهینه زمان سیکل مطابق با ظرفیت سرمایش مخصوص بهینه مدل کرده است. کوبوتا^۴ و همکارانش [۱۷] 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. لواجری^۵ و همکارانش [۱۸] با فرض فشار یکنواخت در بستر، چیلر جذب سطحی با فین‌های خارجی را با استفاده از جفت جاذب کربن اکتیو- آمونیاک که توسط انرژی خورشید گرم می‌شوند، مدل‌سازی کرده‌اند. در این مطالعه ذرات جاذب داخل لوله و فین‌ها خارج لوله قرار دارند و مقدار قطر لوله بهینه برای حالت فین دار و بدون فین محاسبه شده‌است. احمد و همکارانش [۱۹] تاثیر فاصله بین فین‌ها را بر عملکرد چیلر جذب سطحی با مبدل حرارتی دارای فین‌های مستطیلی بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که مقدار ضریب عملکرد با افزایش فاصله بین فین‌ها مقدار کمی افزایش می‌یابد. در این مطالعه توزیع فشار و دما در بستر یکنواخت فرض شده‌است. نیازمند و داب زاده [۲۰] در مطالعه عددی خود چیلر جذب سطحی با فین‌های حلقوی را با در نظر گرفتن هر دو مقاومت درون ذره‌ای و برون ذره‌ای مدل‌سازی کرده و تاثیر پارامترهای هندسی بستر و قطر ذرات جاذب را

¹ Liu² Zhang³ San⁴ Kubota⁵ Louaj⁶ Miyazaki⁷ Riffel

۲- هندسه و معادلات حاکم

در این مطالعه از یک مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای در داخل محفظه چیلر جذب سطحی استفاده شده‌است. ذرات جاذب سیلیکازل فضای خالی بین فین‌ها را پر می‌کنند. مدلسازی کامل مبدل‌های حرارتی به دلیل حجم بالای محاسبات و تعداد زیاد شبکه مورد نیاز امکان پذیر نمی‌باشد و بایستی هندسه را به نحوی در نظر گرفت تا علاوه بر بدست آوردن نتایج درست و با دقت مناسب، از تعداد شبکه و حجم محاسبات کاسته شود. به دلیل تشابه مبدل‌های موجود در محفظه جاذب، تنها یکی از آن‌ها بررسی می‌شود. این مبدل در شکل ۲ سمت راست نشان داده شده‌است. اما تعداد شبکه مورد نیاز برای یکی از این مبدل‌ها نیز بسیار زیاد است. ناحیه اطراف لوله‌های مبدل حرارتی تا حد زیادی دارای تشابه می‌باشند و تنها مدلسازی اطراف یکی از لوله‌ها می‌تواند عملکرد کل بستر را شبیه‌سازی کند. لوله‌های بالا و پایین مبدل با بقیه لوله‌های میانی تنها در شرط مرزی تفاوت جزئی دارند اما در مقایسه با تعداد لوله‌های میانی می‌توان از این اختلاف صرف نظر کرد. بدین ترتیب مدلسازی عددی بستر ماده جاذب به ناحیه اطراف یک لوله ساده‌سازی می‌شود (شکل ۲ وسط). همچنین به دلیل تقارن می‌توان معادلات را تنها برای یک چهارم اطراف یک لوله حل کرد و حجم محاسبات را تا حد زیادی کاهش داد. حوزه نهایی حل پس از ساده سازی در شکل ۲ سمت چپ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای به عنوان بستر ماده جاذب

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدلسازی عبارتند از:

- بستر جاذب از ذراتی با اندازه یکنواخت پر شده‌است که دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند.
- اتلاف حرارت در سیکل جذب وجود ندارد.

- مقاومت تماسی بین لوله فلزی و فین‌ها ناچیز است.

- تخلخل بستر یکنواخت فرض شده‌است.

- 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 می‌شود.

- کندانسور و اواپراتور ایده آل فرض شده‌است.

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

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

۲-۱- سیال ناقل حرارت

در بیشتر چیلرهای جذب سطحی از یک سیال حرارتی برای انتقال حرارت از منبع حرارتی یا منبع خنک‌کننده به بستر استفاده می‌شود. سیال حرارتی معمولاً بین دو صفحه یا داخل لوله فلزی در جریان است و برای مدلسازی آن نیاز است معادلات مومنتوم، پیوستگی، انرژی و در صورت آشفته بودن جریان معادلات توربولانسی حل شوند. البته با استفاده از فرضیات ساده‌کننده می‌توان حجم محاسبات را تا حد زیادی کاهش داد. در بستر مورد مطالعه سیال ناقل حرارت داخل لوله فلزی جریان دارد و با توجه به سرعت سیال و نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایت می‌توان از جمله هدایت در مقابل جمله جابجایی در امتداد محور لوله صرف نظر کرد؛ همچنین از تغییرات دما در دو امتداد مماسی و شعاعی صرف نظر شده‌است. بنابراین معادله انتقال حرارت در مختصات استوانه‌ای شامل جمله وابسته به زمان و یک جمله جابجایی یک بعدی در امتداد محور لوله است. همچنین معادله شامل یک جمله چشمه می‌باشد که مقدار انتقال حرارت از سیال ناقل حرارت به لوله فلزی را لحاظ می‌کند. رژیم جریان در اکثر کاربردهای عملی آشفته است و مقدار انتقال حرارت از سیال به لوله فلزی توسط عدد ناسلت به صورت زیر محاسبه شده‌است [۲۸]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{L}{8}\right) RePr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{L}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (1)$$

۲-۲- لوله فلزی

برای لوله فلزی معادله انتقال حرارت هدایت به صورت سه بعدی گذرا در مختصات استوانه‌ای حل شده‌است. باید توجه

پیوستگی و معادله حالت گاز کامل می‌بایست به صورت همزمان حل شوند. موازنه انرژی برای بستر جاذب به صورت سه بعدی در دستگاه مختصات عمومی حل شده‌است:

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cv} \vec{v} \cdot (\rho_g C_{pg} \vec{u}_g T_b) dV \quad (3)$$

$$= \int_{cv} \vec{v} \cdot (\lambda_b \vec{\nabla} T_b) dV + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV$$

که در آن

$$\rho C_p = \varepsilon_t (\rho_g C_{pg}) + \rho_b (C_{pb} + w C_{pa})$$

ρ_g چگالی فاز بخار است که با استفاده از قانون گاز کامل محاسبه می‌شود. تخلخل کلی بستر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

در این مطالعه ضریب انتقال حرارت هدایت بستر، متغیر و تابعی از میزان جذب لحظه‌ای در نظر گرفته شده‌است [۳۰]:

$$\lambda_b(w) = 0.1221 + 0.82w - 3.108w^2 + 4.994w^3 \quad (4)$$

با مقایسه نتایج عددی بدست آمده با استفاده از دو ضریب انتقال حرارت هدایت ثابت برای بستر و متغیر نسبت به جذب، مشاهده شد مقدار ظرفیت سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد به ترتیب دارای ۳٪ و ۵٪ اختلاف بوده‌اند. با توجه به ناچیز بودن اختلاف نتایج می‌توان از ضریب انتقال حرارت هدایت ثابت برای بستر استفاده کرد، اما در این مطالعه تغییرات ضریب انتقال حرارت بستر نسبت به جذب در نظر گرفته شده‌است.

همچنین با توجه به استفاده از فین و افزایش سطح تماس بین ذرات جاذب و سطوح انتقال حرارت، مقاومت انتقال حرارت تماسی بین ذرات جاذب و این سطوح می‌بایست در نظر گرفته شود. مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته در مرجع [۳۱] نشان می‌دهد مقاومت تماسی عمدتاً وابسته به اندازه ذرات و دمای بستر جاذب بوده به طوری که برای سه قطر ۰.۰۷۵، ۰.۱۵ و ۰.۳ میلی‌متر، مقادیر این مقاومت برای ذرات زئولیت به صورت زیر است:

$$R_{contact\#0.075} = 0.0008T_b^2 - 0.1214T_b + 6.422$$

$$R_{contact\#0.15} = 0.0012T_b^2 - 0.1624T_b + 7.6785 \quad (5)$$

$$R_{contact\#0.3} = 0.0013T_b^2 - 0.1773T_b + 8.6221$$

به علت تفاوت ناچیز ضریب انتقال حرارت زئولیت و سیلیکاژل، در این مطالعه معادلات ذکر شده برای ذرات سیلیکاژل استفاده شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود با

داشت که در حل عددی ضخامت فین‌ها نسبت به ابعاد حجم کنترل‌های موجود در لوله فلزی و فاصله بین فین‌ها کوچکتر می‌باشد؛ در نتیجه تنها تعدادی از حجم کنترل‌ها روی سطح خارجی لوله فلزی وجود دارند که شامل فین می‌باشند و گرما از آنها به فین‌ها منتقل می‌شود. بنابراین گرمای خارج شده از لوله فلزی به فین‌ها به صورت یک جمله چشمه در حجم کنترل‌هایی که شامل فین هستند لحاظ شده و به صورت زیر محاسبه شده‌است:

$$Q_{tube-fin} = -\lambda_{tube-fin} A \frac{\Delta T}{\delta} \quad (2)$$

که در آن ΔT اختلاف دمای مرکز آخرین حجم کنترل لوله فلزی و اولین حجم کنترل فین روی آن بوده و δ فاصله این دو مرکز حجم کنترل است. $\lambda_{tube-fin}$ ضریب انتقال حرارت هدایت معادل بین لوله فلزی و فین است [۲۹]. شش شرط مرزی برای حل معادله انرژی لوله فلزی نیاز است. برای فصل مشترک لوله فلزی با بستر و سیال ناقل حرارت شرط مرزی بقای شار حرارتی و تساوی دما در مرز و برای چهار مرز دیگر مقدار گرادیان دما برابر صفر در نظر گرفته شده‌است.

۲-۳- فین‌ها

ضخامت فین‌ها نسبت به سایر ابعاد هندسی ناچیز است و می‌توان از انتقال حرارت در امتداد محور لوله در فین‌ها صرف نظر کرد. برای محاسبه توزیع دما در فین‌ها معادله انتقال حرارت هدایت گذرا به صورت دو بعدی در صفحه عمود بر محور لوله در دستگاه مختصات عمومی همراه با یک جمله چشمه حل شده‌است. جمله چشمه در معادله، مقدار حرارتی است که از فین‌ها به ذرات جاذب منتقل می‌گردد و مشابه جمله چشمه در معادله لوله فلزی محاسبه شده‌است. شرط مرزی برای مرز مشترک بین لوله فلزی و فین‌ها به صورت بقای شار حرارتی و تساوی دما در مرز در نظر گرفته شده و برای سه مرز دیگر شرط گرادیان دما برابر صفر فرض شده‌است.

۲-۴- بستر ماده جاذب

مدلسازی بستر ماده جاذب شامل مواد متخلخل و حرکت بخار در این محیط متخلخل است. در این مطالعه مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای و درون ذره‌ای در نظر گرفته شده‌است و چهار معادله اصلی انتقال حرارت، مومنتوم،

شده از اوپراتور، پس از عبور از محفظه در بستر جذب می‌شود. در واقع مدلسازی محفظه شامل مدلسازی فضای خالی اطراف بستر در هر محفظه می‌باشد. فشار و دمای محفظه به صورت یکنواخت نسبت به مکان در هرگام زمانی در نظر گرفته شده‌است. فشار در محفظه به دلیل سرعت پایین حرکت سیال یکنواخت فرض شده‌است. فشار محفظه در مرحله گرمایش فشار ثابت، برابر با فشار کندانسور و در مرحله سرمایش فشار ثابت، برابر با فشار اوپراتور می‌باشد. برای محاسبه فشار محفظه در مراحل جرم ثابت ابتدا با انتگرال‌گیری از نرخ جرمی جریان سیال عامل خروجی از مرز مشترک بین محفظه و بستر جذب، مقدار کل جرم وارد شده به محفظه محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از معادله پیوستگی در محفظه، مقدار چگالی سیال عامل موجود در محفظه محاسبه خواهد شد؛ در نهایت با استفاده از رابطه گاز کامل مقدار فشار محفظه محاسبه می‌شود. مقدار دمای محفظه برابر با دمای میانگین مرز مشترک بین محفظه و بستر جذب فرض شده‌است.

۲-۶- پارامترهای عملکردی

در بررسی عملکرد چیلر جذب سطحی دو پارامتر ضریب عملکرد (COP) و ظرفیت سرمایش مخصوص (SCP) از اهمیت زیادی برخوردارند که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (10)$$

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_{silica\ gel} * cycle\ time} \quad (11)$$

در این روابط Q_{evap} برودت تولید شده در اوپراتور و $Q_{heating}$ انرژی حرارتی ورودی به سیستم است

۳- روش عددی حل معادلات

معادلات انرژی، مومنتوم و پیوستگی مربوط به بستر ماده جذب و همچنین معادلات انرژی سیال ناقل حرارت، لوله فلزی و فین‌ها، هر یک در دستگاه مختصات مربوطه، به روش حجم کنترل گسسته می‌شوند. بدین منظور از طرح تفاضل پیش رو^۱ برای جملات زمانی و از طرح تفاضل مرکزی^۱ برای

افزایش قطر ذرات تغییرات مقاومت تماسی نسبت به قطر کاهش می‌یابد، به طوری که برای قطرهای بزرگتر از $0/3$ با تقریب قابل قبول از معادله مربوط به قطر $0/3$ استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص در صورت در نظر نگرفتن مقاومت تماسی به ترتیب دارای 1% و 20% خطا هستند.

w مقدار جذب در هر لحظه است که توسط رابطه نیرو محرکه خطی به شکل زیر محاسبه می‌شود و در واقع مقاومت درون ذره‌ای جذب و احیا سیال عامل را لحاظ می‌کند:

$$\frac{dw}{dt} = 15D_{so} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right) / R_p^2 (w^* - w) \quad (6)$$

که در آن w^* جذب تعادلی در دمای T_b و فشار P است و توسط رابطه زیر برای سیلیکازل نوع SWS-1L محاسبه شده‌است [۳]:

$$w^* = \frac{0.8 \times 2 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) P}{\left[1 + (2 \times 10^{-12} \exp\left(\frac{\Delta H}{R_g T_b}\right) P)^{1.1}\right]^{1/1.1}} \quad (7)$$

شرایط مرزی برای سطوح مشترک بین بستر با لوله فلزی و فین‌ها به صورت تعادل حرارتی و بقیه مرزها آدیاباتیک فرض شده‌اند.

موازنه جرم برای سیال عامل به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \varepsilon_t \rho_g}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g u_g) + \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

سرعت سیال جذب شونده در بستر ماده جذب توسط رابطه دارسی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (9)$$

که در آن μ لزجت سیال عامل در فاز بخار و K_{app} نفوذپذیری ظاهری بستر جذب است [۳۲ و ۳۳].

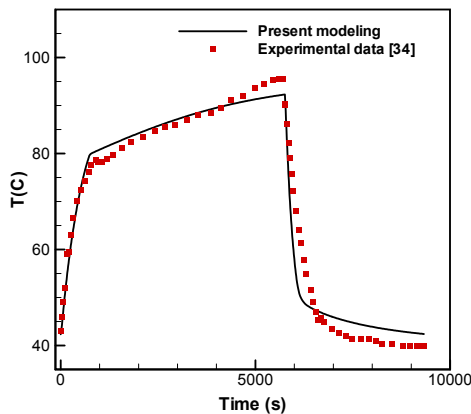
به‌جز فصل مشترک بستر با محفظه که مقدار فشار برابر با فشار محفظه در نظر گرفته‌شده، برای بقیه مرزها تغییرات فشار در جهت عمود بر صفحه صفر فرض شده‌است. همچنین از رابطه گاز کامل برای محاسبه چگالی بخار سیال عامل احیا شده استفاده شده‌است.

۲-۵- محفظه

در نمونه‌های تجربی، بستر ماده جذب داخل یک محفظه قرار دارد و سیال عامل احیا شده ابتدا وارد محفظه شده و سپس به کندانسور هدایت می‌شود. همچنین سیال عامل تبخیر

^۱ Forward differencing scheme

می‌آید که برای محاسبات قابل قبول است. برای بررسی صحت برنامه کامپیوتری نوشته شده و روش مدل‌سازی نیاز است نتایج عددی بدست آمده با نتایج حاصل از یک نمونه تجربی مقایسه شود. رستوکیا^۴ و همکارانش [۳۴] در یک مطالعه آزمایشگاهی از جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب استفاده کرده‌اند. مبدل حرارتی که به عنوان بستر ماده جاذب استفاده شده‌است لوله‌هایی با فین‌های حلقوی از جنس فولاد ضدزنگ می‌باشد که فضای بین فین‌ها با ذرات سیلیکاژل پر شده‌اند. به منظور ایجاد شرایط مشابه با نمونه تجربی، برنامه فرترن که در دستگاه مختصات کلی نوشته شده برای بستری با فین‌های حلقوی استفاده شده‌است. در شکل ۳ تغییرات دمای میانگین بستر در مدت یک سیکل کاری در نمونه آزمایشگاهی به همراه نتایج مدل‌سازی نشان داده شده‌است. با توجه به فرضیات و ساده‌سازی‌های اعمال شده در مدل‌سازی عددی و همچنین تعداد زیاد پارامترهای دخیل، مشاهده می‌شود نتایج حل عددی دقت قابل قبولی دارد به طوری که حداکثر خطا حدود ۷٪ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه مقادیر دمای میانگین بستر به روش عددی و تجربی

۴- نتایج

جدول ۱ مقادیر متناظر با پارامترهای به کار رفته در مدل سازی عددی را نشان می‌دهد. لوله فلزی از جنس مس و

جملات جایابی و پخش در بستر جاذب استفاده شده‌است. با استفاده از برنامه فرترن ایجاد شده توسط نویسندگان، معادلات گسسته‌سازی شده و به کمک الگوریتم حل ماتریس سه قطری^۱ و روش ADI^۲ به صورت همزمان حل می‌شوند.

شبکه‌بندی حوزه حل اولین قدم در شروع فرآیند محاسبات است. برای حل معادلات بایستی نواحی بین فین‌ها، لوله فلزی و سیال ناقل حرارت شبکه‌بندی شوند. افزایش بیش از حد تعداد شبکه، افزایش در زمان محاسبات و تعداد کم شبکه نتایجی با دقت پایین را به همراه خواهد داشت. 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. تعداد شبکه مورد نیاز برای ابعاد مختلف بستر متفاوت است و با افزایش ارتفاع فین‌ها و فاصله بین آن‌ها افزایش می‌یابد. در این مطالعه تعداد شبکه برای ناحیه بین دو فین از $12 \times 12 \times 6$ تا $12 \times 24 \times 12$ تغییر می‌کند که عدد کوچکتر مربوط به تعداد شبکه بین دو فین در امتداد محور لوله است. با انتخاب این تعداد شبکه برای ناحیه بین دو فین ۲٪ خطا نسبت به شبکه دو برابر ریزتر وارد محاسبات می‌شود که قابل قبول است. با انتخاب ۳ شبکه برای امتداد شعاعی لوله فلزی، نتایج با خطای کمتر از ۰/۱٪ نسبت به حالتی که شبکه محاسباتی یک و نیم برابر ریزتر شود، محاسبه خواهد شد. تعداد شبکه برای امتداد مماسی و محوری لوله فلزی و تعداد شبکه در فین‌ها برابر تعداد شبکه در ناحیه متناظر آن‌ها در حوزه محاسباتی بستر جاذب می‌باشد. یکی دیگر از موارد مهم در بررسی‌های عددی استقلال نتایج از گام زمانی است. در مراحل اول و سوم که در جرم ثابت اتفاق می‌افتد تغییرات دما و فشار شدیدی 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 آهسته‌تر است، بنابراین از دو گام زمانی مختلف برای این مراحل استفاده شده‌است. با انتخاب گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی ۰/۶ ثانیه برای مراحل فشار ثابت نتایجی با حدود ۱/۵٪ خطا نسبت به حالتی که گام زمانی نصف شود بدست

¹ Central differencing scheme

² Tri-diagonal solver algorithm

³ Alternating direction implicit (ADI)

⁴ Restuccia

محسوس است؛ اما از سوی دیگر، در قطره‌های بزرگ مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای نسبتاً ناچیز است و می‌توان گفت تغییرات فشار در بستر جزئی بوده و تغییر در تخلخل بستر تاثیر قابل ملاحظه در رفتار جریان داخل آن به وجود نمی‌آورد. از طرفی در قطره‌های کوچک که تغییرات فشار در بستر وجود دارد مقدار تغییر در تخلخل بستر بسیار ناچیز است؛ بنابراین در حوزه مورد بررسی می‌توان از تغییرات تخلخل نسبت به قطر ذرات صرف نظر کرد.

۴-۲- تاثیر دمای آب گرم بر عملکرد چیلر نسبت به قطر ذرات جاذب

یکی از پارامترهایی که بر عملکرد چیلرهای جاذب سطحی نسبت به قطر ذرات جاذب تاثیر دارد، دمای آب گرم‌کننده است. مقدار جذب تعادلی وابسته به دما و فشار بستر جاذب است و با افزایش دما و کاهش فشار، مقدار جذب تعادلی کاهش می‌یابد. با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها به جز دمای آب گرم ورودی، مقدار جذب تعادلی حداکثر برای تمام شرایط یکسان است؛ زیرا این مقدار در فشار اواپراتور و دمای سیال خنک‌کننده اتفاق می‌افتد؛ اما مقدار جذب تعادلی حداقل، برای شرایط 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 می‌باشد. به این ترتیب اختلاف حداقل و حداکثر جذب تعادلی و در نتیجه میزان جذب و احیای میانگین بستر برای شرایط مختلف متفاوت می‌باشد و با افزایش دما افزایش می‌یابد. در این مطالعه شرط خروج از مرحله گرمایش و سرمایش جرم ثابت به ترتیب رسیدن فشار محفظه به فشار کندانسور و اواپراتور است. برای خروج از مراحل فشار ثابت از ۲۰٪ حداکثر و حداقل بازه جذب تعادلی صرف نظر شده است و هنگامی که جذب میانگین بستر به میزان مورد نظر رسید مرحله بعد آغاز می‌شود. به عنوان مثال در مرحله گرمایش فشار ثابت هنگامی که ۸۰٪ مقدار حداکثر سیال عامل بستر احیا شد، مرحله سوم آغاز می‌شود و از ۲۰٪ سیال عامل موجود در بستر صرف نظر می‌شود. افزایش دمای سیال گرم‌کننده باعث می‌شود تا مقدار سیال جذب شده و احیا شده در هر سیکل افزایش یابد که این امر افزایش سیال عامل در گردش سیکل و افزایش ظرفیت سرمایش را به

فین‌ها از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده‌اند. از جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب در مدلسازی استفاده شده و سیال داخل لوله‌های بستر، کندانسور و اواپراتور آب است. همچنین دمای آب خنک‌کننده ورودی به کندانسور برابر با دمای آب خنک‌کننده ورودی به بستر ماده جاذب است.

جدول ۱- مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شرایط اصلی

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
قطر داخلی لوله فلزی	D_i	۱۰	mm
قطر خارجی لوله فلزی	D_o	۱۲	mm
ضخامت فین	FT	۰/۲	mm
ارتفاع فین	FH	۸	mm
فاصله بین فین‌ها	FS	۶	mm
نرخ جریان جرمی سیال ناقل حرارت	\dot{m}_f	۰/۰۳	kg/s
چگالی بستر	ρ_b	۷۰۰	kg/m ³
ظرفیت گرمایی ویژه بستر	C_{pb}	۹۲۴	J/(kg.K)
تخلخل بستر	ϵ_b	۰/۳۶	-
تخلخل ذرات	ϵ_p	۰/۴۶	-
گرمای جذب	ΔH	۲۷۶۰	kJ/kg
دمای اواپراتور	T_{evap}	۲۸۳/۱۵	K
دمای گرمایش	$T_{heating}$	۳۶۳/۱۵	K
دمای خنک کاری	$T_{cooling}$	۳۰۳/۱۵	K

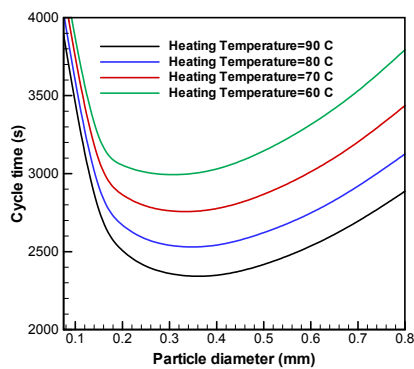
۴-۱- تاثیر تخلخل بستر

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 [۳۵ و ۳۶].

سودر^۱ و همکارش [۳۶] در مطالعه خود روی ستون ذرات جاذب بین دو استوانه هم‌مرکز رابطه‌ای معرفی کرده‌اند که تغییرات تخلخل را نسبت به قطر ذرات و فاصله بین دو استوانه نشان می‌دهد. اگر از این رابطه با تقریب برای بستر با فین‌های صفحه‌ای استفاده شود و بجای فاصله بین دو استوانه فاصله بین دو فین و در صورتی که ارتفاع فین کوچکتر باشد ارتفاع فین‌ها قرار داده شود، می‌توان تقریبی از تغییرات تخلخل در حوزه مورد بررسی را بدست آورد. تغییر در تخلخل در قطره‌های بزرگ ذرات جاذب و ابعاد کوچک بستر

^۱ Sodre

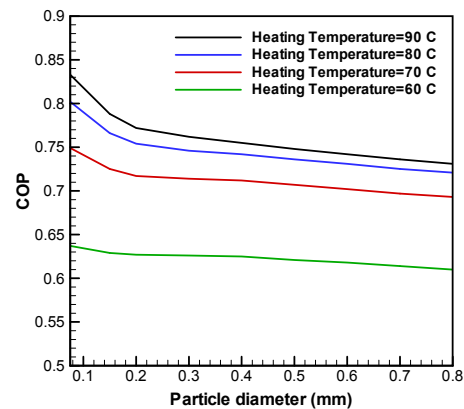
داخل ذره طی کند تا وارد فضای خالی بین ذرات در بستر شود و در واقع مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای افزایش می‌یابد. کاهش قطر ذرات باعث می‌شود مسیر عبور سیال عامل جذب یا احیا شده از بین ذرات سخت تر شود و در واقع مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای افزایش یابد. افزایش مقاومت انتقال جرم باعث می‌شود زمان سیکل افزایش یابد؛ بنابراین یک مقدار بهینه برای زمان سیکل نسبت به قطر ذرات جذب وجود دارد که در آن برآیند دو مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای مقدار حداقل را دارد. دمای آب گرم ورودی همچنین بر مقدار قطر ذرات جاذب متناظر با زمان سیکل بهینه نیز تاثیر دارد؛ به این ترتیب که با افزایش دمای آب گرم ورودی قطر بهینه ذرات جاذب افزایش خواهد یافت. افزایش قطر ذرات جاذب باعث کاهش مقدار مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای و در مقابل افزایش مقدار مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای می‌شود، حال با افزایش دمای آب گرم ورودی نرخ احیا بیشتر شده و در نتیجه ی ایجاد گرادیان فشار شدیدتر در بستر، غلبه بر مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای آسان تر می‌شود. از طرفی افزایش دمای آب گرم ورودی باعث کاهش مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای می‌گردد. با توجه به شکل ۵، با افزایش دمای آب گرم ورودی، مینیمم برآیند مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای و درون ذره‌ای در قطر بزرگتر ذرات جاذب اتفاق می‌افتد.



شکل ۵- مقدار زمان سیکل نسبت به قطر ذرات در دمای آب گرم مختلف

با افزایش دمای منبع حرارتی در یک قطر ثابت، مقدار ظرفیت سرمایش افزایش و مقدار زمان سیکل کاهش می‌یابد که هر دو این تغییرات در راستای افزایش ظرفیت سرمایش

دنبال خواهد داشت. از طرف دیگر افزایش دما باعث افزایش انرژی حرارتی مورد نیاز سیکل خواهد شد؛ زیرا در هر سیکل ذرات جاذب، سیال ناقل حرارت داخل لوله، لوله فلزی و فین‌ها باید گرم شده و در مراحل بعد دوباره سرد شود بدون اینکه از این انرژی استفاده‌ای در جهت سرمایش شود. اما در نهایت افزایش سیال عامل در گردش سیکل و ظرفیت سرمایش بر افزایش انرژی حرارتی مورد نیاز سیکل غلبه کرده و ضریب عملکرد چیلر در یک قطر مشخص ذره با افزایش دمای آب گرم افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود مقدار ضریب عملکرد چیلر در یک قطر خاص با افزایش دمای آب گرم ورودی افزایش می‌یابد و در یک دمای آب گرم ثابت نسبت به قطر ذرات جاذب مقدار کمی کاهش می‌یابد.

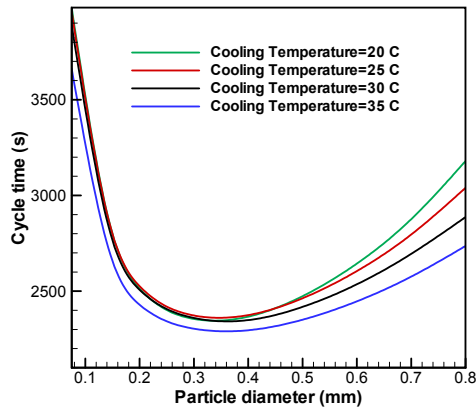


شکل ۴- مقدار ضریب عملکرد نسبت به قطر ذرات در دمای آب گرم مختلف

بالا بودن دما باعث کاهش مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای بستر شده و عمل جذب و احیا سیال عامل درون ذرات جاذب را تسریع می‌کند؛ همچنین انرژی سیال عامل احیا شده برای غلبه بر مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای بیشتر می‌شود به طوری که با توجه به شکل ۵ در یک قطر ثابت با افزایش دمای آب گرم ورودی زمان سیکل کاهش می‌یابد. قطر ذرات جاذب بر دو فرآیند انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای تاثیر دارد. افزایش هرکدام از مقاومت‌های انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای در راستای تضعیف عملکرد بستر و در نتیجه تضعیف عملکرد کلی چیلر می‌باشد. افزایش قطر ذرات باعث می‌شود سیال عامل احیا شده مسیر طولانی‌تری را در

و دمای آب خنک‌کننده اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مقدار جذب تعادلی حداقل که در فشار کندانسور و دمای آب گرم اتفاق می‌افتد با افزایش فشار کندانسور افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش دمای آب خنک‌کننده باعث کاهش بازه جذب و احیا شده و دبی جرمی سیال عامل در گردش سیکل کاهش می‌یابد که این امر موجب کاهش ظرفیت سرمایش خواهد شد. از طرفی افزایش دمای آب خنک‌کننده باعث کاهش انرژی مورد نیاز برای بازگرمایش سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و بستر در یک سیکل خواهد شد و بنابراین انرژی حرارتی کمتری در یک سیکل مورد نیاز است. با افزایش دمای آب خنک‌کننده، کاهش ظرفیت سرمایش بر کاهش انرژی حرارتی مورد نیاز غلبه کرده و در نهایت ضریب عملکرد کاهش می‌یابد.

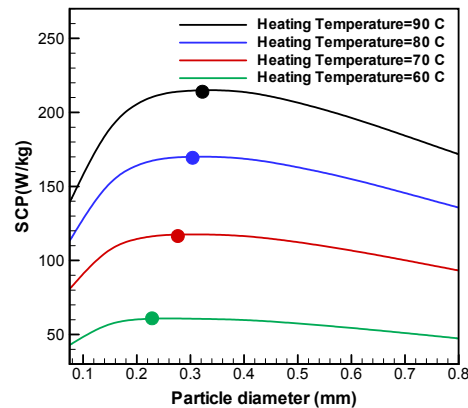
با توجه به شکل ۷، در دمای ثابت سیال خنک‌کننده، زمان سیکل نسبت به قطر ذرات جاذب دارای یک مقدار بهینه است. اگرچه در یک قطر مشخص ذره، مقدار زمان سیکل با تغییر در دمای سیال خنک‌کننده تغییر ناچیزی خواهد داشت. علت این تغییر ناچیزی، کاهش مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای است که با کاهش توان سیال عامل برای عبور از فضای خالی بین ذرات در دمای بالاتر آب خنک‌کننده همراه می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات زمان سیکل بر حسب قطر ذرات جاذب برای دمای آب خنک‌کننده مختلف

نظر به اینکه در یک قطر ذره ثابت زمان سیکل تغییر کمی دارد، تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص نسبت به

مخصوص است (شکل ۶). بنابراین در صورتی که محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تحمل مواد مورد استفاده در چیلر، ظرفیت تحمل ذرات جاذب، محدودیت در نوع سیال عامل، محدودیت منبع حرارتی و ... وجود نداشته باشد استفاده از منابع با دمای بالا بهتر خواهد بود.



شکل ۶- تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات جاذب برای دمای آب گرم مختلف

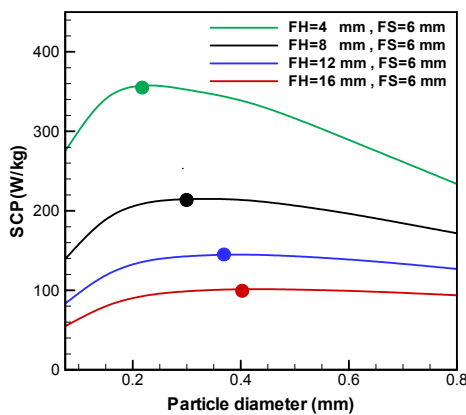
از آن‌جا که ظرفیت سرمایش نسبت به قطر ذرات جاذب تغییر ناچیزی دارد، تغییر ظرفیت سرمایش مخصوص نسبت به قطر ذرات جاذب بیشتر تحت تاثیر زمان سیکل قرار دارد و در نتیجه ظرفیت سرمایش مخصوص دارای یک مقدار بهینه نسبت به قطر ذرات جاذب می‌باشد. این قطر بهینه با افزایش دمای آب گرم ورودی افزایش می‌یابد؛ به طوری که در دمای ۶۰°C قطر بهینه متناظر با حداکثر ظرفیت سرمایش مخصوص برابر ۰/۲۳ است و با افزایش دما به ۹۰°C، مقدار این قطر به ۰/۳۲ افزایش می‌یابد.

۳-۴- تاثیر دمای آب خنک‌کننده بر عملکرد چیلر نسبت به قطر ذرات جاذب

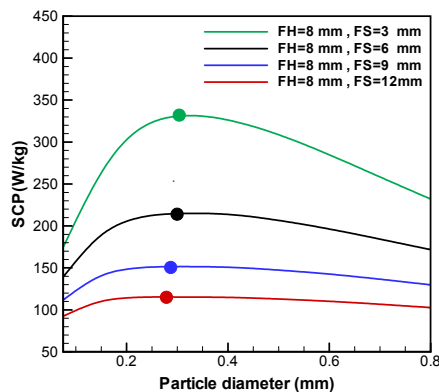
تغییرات ضریب عملکرد چیلر نسبت به قطر ذرات جاذب در دمای آب خنک‌کننده مختلف مشابه تغییرات آن در دمای آب گرم مختلف است، به طوری که با افزایش قطر ذرات جاذب ضریب عملکرد کمی کاهش می‌یابد. در یک قطر ثابت، با افزایش دمای آب خنک‌کننده مقدار ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. علت کاهش این است که با افزایش دمای آب خنک‌کننده، مقدار جذب تعادلی حداکثر که در فشار اواپراتور

افزایش می‌یابد، زیرا مسیر عبور سیال عامل از بین ذرات جاذب در بستر طولانی تر می‌شود.

بنابراین با افزایش ارتفاع فین، قطر ذره متناظر با حداقل برآیند مقاومت انتقال جرم و حداقل زمان سیکل افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله بین فین‌ها سطوح انتقال حرارت کاهش یافته و توان سیال عامل احیا شده برای خروج از بستر کاهش می‌یابد و این مطلب مشابه حالتی است که مقدار مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای و درون ذره‌ای همزمان افزایش یابد؛ بنابراین مقدار قطر بهینه ذرات جاذب متناظر با زمان کمینه سیکل با تغییر فاصله بین فین‌ها مقدار کمی تغییر می‌کند.

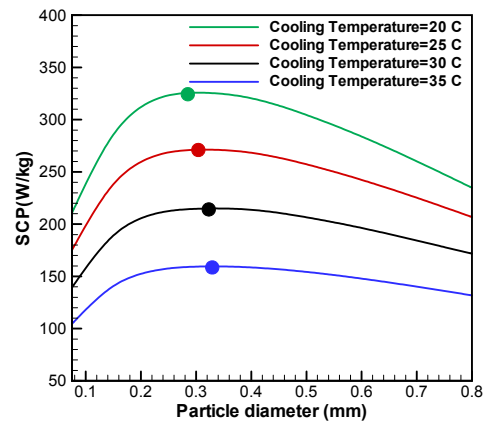


شکل ۹- تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات جاذب برای ارتفاع فین مختلف



شکل ۱۰- تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات جاذب برای فاصله بین فین‌های مختلف

دمای آب خنک‌کننده بیشتر تحت تاثیر ظرفیت سرمایش است و با افزایش دمای آب خنک‌کننده کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با توجه به اینکه ظرفیت سرمایش نسبت به قطر ذره تغییر ناچیزی دارد، ظرفیت سرمایش مخصوص در یک دمای آب خنک‌کننده ثابت بیشتر تحت تاثیر زمان سیکل است و دارای یک مقدار بهینه نسبت به قطر ذرات جاذب می‌باشد. با توجه به شکل ۸، با افزایش دمای سیال خنک‌کننده از 20°C تا 35°C ، قطر ذرات جاذب متناظر با ظرفیت سرمایش مخصوص ماکزیمم از 0.28mm تا 0.33mm افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات جاذب برای دمای آب خنک‌کننده مختلف

۴-۴- تاثیر ارتفاع فین و فاصله بین فین‌ها بر عملکرد

چیلر نسبت به قطر ذرات جاذب

ضریب عملکرد نسبت به قطر ذرات جاذب تغییرات کمی دارد و مشابه شکل ۴، چنانچه ارتفاع و فاصله بین فین‌ها ثابت بماند، با افزایش قطر ذرات جاذب ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. در ارتفاع و فاصله بین فین‌های مختلف، با افزایش قطر ذرات جاذب مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای و با کاهش قطر ذرات جاذب مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای افزایش می‌یابد و بنابراین زمان سیکل دارای یک مقدار بهینه نسبت به قطر ذرات جاذب است. مقدار مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای به ارتفاع فین و فاصله بین فین‌ها وابسته نمی‌باشد؛ اما مقدار مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای با افزایش ارتفاع فین

COP	ضریب عملکرد	بنابراین زمان سیکل دارای یک مقدار کمینه نسبت به قطر ذرات جاذب است و مقدار ظرفیت سرمایش بر واحد جرم با تغییر قطر ذرات جاذب تغییر بسیار ناچیزی دارد. ظرفیت سرمایش مخصوص با تغییر قطر ذرات جاذب بیشتر تحت تاثیر زمان سیکل قرار دارد و همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود دارای یک مقدار حداکثر می‌باشد. مقدار بهینه ظرفیت سرمایش مخصوص با افزایش ارتفاع فین‌ها افزایش یافته اما با افزایش فاصله بین فین‌ها مقدار کمی کاهش می‌یابد. مقدار قطر بهینه در ارتفاع فین ۴mm برابر ۰/۲۲mm است و با افزایش ارتفاع فین تا ۱۶mm مقدار قطر بهینه به ۰/۴۱mm افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین فین‌ها از ۳mm تا ۱۲mm مقدار قطر بهینه از ۰/۳۱mm تا ۰/۲۸mm کاهش می‌یابد.
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، J/kg K	
d_p	قطر ذرات جاذب، m	
E_a	انرژی فعال سازی، J/kg	
f	ضریب اصطکاک در لوله صاف	
FT	ضخامت فین، m	
FH	ارتفاع فین، m	
FS	فاصله بین فین‌ها، m	
K_{app}	نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب، m^2	
M	جرم مولکولی، kg/mol	
n	بردار عمود بر صفحه	
P	فشار، Pa	
Pr	عدد پرانتل	
R_u	ثابت جهانی گازها، J/kmol.K	
Re	عدد رینولدز	
SCP	ظرفت سرمایش مخصوص، W/kg	
t	زمان، s	
T	دما، K	
u	سرعت،	

علائم یونانی

ε	تخلخل
λ	ضریب انتقال حرارت هدایت،
μ	ویسکوزیته،
b	بستر ماده جاذب
f	سیال ناقل حرارت
g	فاز بخار سیال عامل احیا شده

مراجع

- [1] Chua HT, Ng KC, Malek A, Kashiwagi T, Akisawa A, Saha BB (1999) Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers. Int J Refrigeration 22: 194-204.
- [2] Ng KC, Chua HT, Chung CY, Loke CH, Kashiwagi, T, Akisawa A, Saha BB (2001) Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics. Appl. Therm. Eng. 21: 1631-1642.
- [3] Aristov YI (2007) New family of solid sorbents for adsorptive cooling: Material scientist approach. J EngThermophys 16:63-72.

۵- نتیجه گیری

این مقاله به مدل سازی عددی بستر چیلر جذب سطحی با هدف بررسی تاثیر قطر ذرات جاذب بر عملکرد این سیستم می‌پردازد. به منظور افزایش آهنگ انتقال حرارت در بستر جاذب از فین‌های صفحه‌ای استفاده شده و همچنین هر دو مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای در محاسبات در نظر گرفته شده‌است. پس از بررسی نتایج مشاهده شد مقدار زمان سیکل در یک قطر خاص دارای یک مقدار کمینه است که با افزایش یا کاهش قطر ذرات نسبت به این مقدار، زمان سیکل افزایش می‌یابد. قطر بهینه ذرات جاذب متناظر با حداکثر ظرفیت سرمایش مخصوص تحت تاثیر پارامترهای مختلفی مانند ابعاد فین‌ها و دمای آب گرم و خنک‌کننده می‌باشد. مقدار قطر بهینه با افزایش ارتفاع فین‌ها افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله بین فین‌ها مقدار کمی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد مقدار قطر بهینه با افزایش دمای آب گرم و دمای آب خنک‌کننده افزایش می‌یابد. قطر بهینه متناظر با حداکثر ظرفیت سرمایش مخصوص در دمای ۶۰°C برابر ۰/۲۳mm است و با تغییر دما به مقدار ۹۰°C به ۰/۳۲mm افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش دمای سیال خنک‌کننده از ۲۰°C تا ۳۵°C، این قطر از ۰/۲۸mm تا ۰/۳۳mm افزایش خواهد یافت.

۶- فهرست علائم

A مساحت، m^2

- [17] Kubota M, Ueda T, Fujisawa R, Kobayashi J, Watanabe F, Kobayashi N, Hasatani M (2008) Cooling output performance of a prototype adsorption heat pump with fin-type silica gel tube module. *ApplThermEng* 28: 87–93.
- [18] Louajari M, Mimet A, Ouammi A (2011) Study of the effect of finned tube absorber on the performance of solar driven adsorption cooling machine using activated carbon-ammonia pair, *ApplEnergy* 88: 690–698.
- [19] Rezk ARM, Al-Dadah RK (2012) Physical and operating conditions effects on silica gel/water adsorption chiller performance. *Appl Energy* 89: 142–149.
- [20] Niazmand H, Dabzadeh I (2012) Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins. *Int J Refrigeration* 35: 581–593
- [21] Luo HL, Dai YJ, Wang RZ, Wu JY, Xu YX, Shen JM (2006) Experimental investigation of a solar adsorption chiller used for grain depot cooling. *ApplThermEng* 26: 1218–1225.
- [22] Luo H, Wang R, Dai Y (2010) The effects of operation parameter on the performance of a solar-powered adsorption chiller. *Appl Energy* 87: 3018–3022.
- [23] El-Sharkawy II, Saha BB, Koyama S, He J, Ng KC, Yap C (2008) Experimental investigation on activated carbon-ethanol pair for solar powered adsorption cooling applications. *Int J Refrigeration* 31: 1407–1413.
- [24] Chang WS, Wang CC, Shieh CC (2007) Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed. *ApplThermEng* 27: 2195–2199.
- [25] Freni A, Sapienza A, Glaznev IS, Aristov YI, Restuccia G (2012) Experimental testing of a lab-scale adsorption chiller using a novel selective water sorbent “silica modified by calcium nitrate”. *Int J Refrigeration* 35: 518–524.
- [26] Miyazaki T, Akisawa A, Saha BB (2010) The performance analysis of a novel dual evaporator type three-bed adsorption chiller. *Int J Refrigeration* 33: 276–285.
- [27] Riffel DB, Wittstadt U, Schmidt FP, Núñez T, Belo FA, Leite APF, Ziegler F (2010) Transient modeling of an absorber using finned-tube heat exchanger. *Int J Heat Mass Transf* 53: 1473–1482.
- [28] Poyelle F, Guilleminot JJ, Meunier F (1999) Experimental tests and predictive model of an adsorptive air conditioning unit. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38: 298–309.
- [29] Patankar SV (1980) Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Pub.
- [4] Saha BB, Chakraborty A, Koyama S, Aristov YI (2009) A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system, *Int J Heat Mass Transf* 52: 516–524.
- [5] Daou K, Wang RZ, Xia ZZ, Yang GZ (2007) Experimental comparison of the sorption and refrigerating performances of a CaCl₂ impregnated composite adsorbent and those of the host silica gel. *Int J Refrigeration* 30: 68–75.
- [6] Chang KS, Chen MT, Chung TW (2005) Effects of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. *ApplThermEng* 25: 2330–2340.
- [7] Glaznev IS, Aristov YI (2010) The effect of cycle boundary conditions and adsorbent grain size on the water sorption dynamics in adsorption chillers. *Int J Heat Mass Transf* 53: 1893–1898.
- [8] Chua HT, Ng KC, Wang W, Yap C, Wang XL (2004) Transient modeling of a two-bed silica gel-water adsorption chiller. *Int J Heat Mass Transf* 47: 659–669.
- [9] Di J, Wu JY, Xia ZZ, Wang RZ (2007) Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature. *Int J Refrigeration* 30: 515–526.
- [10] Miyazaki T, Akisawa A, Saha BB, El-Sharkawy II, Chakraborty A (2009) A new cycle time allocation for enhancing the performance of two-bed adsorption chillers. *Int J Refrigeration* 32: 846–853.
- [11] Freni A, Bonaccorsi L, Proverbio E, Maggio G, Restuccia G (2009) Zeolite synthesized on copper foam for adsorption chillers: A mathematical model. *Microporous and Mesoporous Materials* 120: 402–409.
- [12] Wu WD, Zhang H, Sun DW (2009) Mathematical simulation and experimental study of a modified zeolite 13X-water adsorption refrigeration module. *ApplThermEng* 29: 645–651.
- [13] Maggio G, Freni A, Restuccia G (2006) A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery. *Int J Refrigeration* 29: 589–600.
- [14] Leong KC, Liu Y (2004) Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system. *Appl Therm. Eng* 24: 2359–2374.
- [15] Zhang LZ (2000) A three-dimensional non-equilibrium model for an intermittent adsorption cooling system. *Solar energy* 69: 27–35.
- [16] San JY (2006) Analysis of the performance of a multi-bed adsorption heat pump using a solid-side resistance model. *ApplThermEng* 26: 2219–2227.

- [33] Do DD (1998) Adsorption analysis: equilibria and kinetics, Imperial College Press London.
- [34] Restuccia G, Freni A, Vasta S, Aristov Y (2004) Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modeling. *Int J Refrigeration* 27: 284–293.
- [35] de Klerk A (2003) Voidage variation in packed beds at small column to particle diameter ratio. *AIChE J* 49: 2022–2029.
- [36] Sodre JR, Parise JAR (1998) Fluid flow pressure drop through an annular bed of spheres with wall effects. *Experimental thermal and fluid science* 17: 265–275.
- [30] Freni A, Tokarev MM, Restuccia G, Okunev AG, Aristov YI (2002) Thermal conductivity of selective water sorbents under the working conditions of a sorption chiller. *ApplThermEng* 22: 1631–1642.
- [31] Zhu D, Wang S (2002) Experimental investigation of contact resistance in absorber of solar adsorption refrigeration. *Solar energy* 73: 177–185.
- [32] Demir H, Mobedi M, Ülkü S (2009) Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed. *IntCommun Heat and Mass Tranf* 36: 372–377.