



تأثیر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای بر پارامترهای عملکردی یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تحت فین دار

Milad Mohammadzadeh Kowsari¹, Seyyed Behzad Golparvar¹, Hamid Niazmand^{2*}

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

niazmand@um.ac.ir, 9177948944

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: 08 دی 1395

پذیرش: 02 آسفند 1395

ارائه در سایت: 14 فروردین 1396

کلید واژگان:

چیلر جذب سطحی

بستر جاذب

مقاومت برون‌ذره‌ای

مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، به کمک مدل انتقال گرما و جرم، بستر جاذب یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تحت فین دار به صورت سه‌بعدی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی تأثیر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای بر پارامترهای عملکردی سیستم، دو آرایش هندسی متفاوت از بسترها جاذب شامل فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی پیکسان در نظر گرفته شده‌اند و تأثیر طول بستر بر عملکرد سیستم به ازای ارتفاع و گام‌های فین مختلف ارزیابی شده است. بعلاوه، تأثیر طول بستر به ازای قطر ذرات جاذب و همچنین دماهای منبع گرم مختلف نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد، در عین حال که افزایش طول بستر (با به عبارت دیگر افزایش مقاومت برون‌ذره‌ای) به ترتیب منجر به افزایش و کاهش پارامترهای زمان چرخه و توان سرمایش مخصوص سیستم می‌شود، ولی بر پارامتر ضریب عملکرد تقریباً بی‌تأثیر است. همچنین، در صورت وجود اختلاف بین توان سرمایش مخصوص بسترها مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل، افزایش طول بستر موجب کاهش این اختلاف می‌شود. بعلاوه، مشخص شد که با افزایش طول بستر مقدار قطر بهینه ذرات بزرگتر می‌شود. در نهایت، نشان داده شد که در بسترها با طول نسبتاً کوتاه در مقایسه با بسترها نسبتاً بلند، تأثیر افزایش دمای منبع گرم در بهبود توان سرمایش مخصوص سیستم قابل توجه‌تر است.

Effect of inter-particle mass transfer resistance on the performance parameters of an adsorption chiller with finned flat-tube heat exchanger

Milad Mohammadzadeh Kowsari, Seyyed Behzad Golparvar, Hamid Niazmand*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran, niazmand@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 December 2016

Accepted 20 February 2017

Available Online 03 April 2017

Keywords:

Adsorption chiller

Adsorbent bed

Inter-particle resistance

Numerical modeling

ABSTRACT

In the present study, adsorbent bed of an adsorption chiller with finned flat-tube heat exchanger has been simulated three dimensionally based on the heat and mass transfer model with finite volume method. To examine the inter-particle mass transfer resistance effects on the system performance parameters, two different configurations of adsorbent bed including rectangular and trapezoidal fins with identical length and adsorbent mass have been considered and the effects of bed length on the system performance for different fin height and fin pitch have been studied. Moreover, effects of bed length for different particle diameters and also heating source temperatures have been investigated. Results indicated that increasing of bed length (or in the other words, increasing of inter-particle resistance) increases and decreases cycle time and specific cooling power, respectively, yet the coefficient of performance is not influenced. Also, increasing bed length reduces the difference between specific cooling power of rectangular and trapezoidal beds if there is any. Moreover, it is clear that optimum particle size increases with bed length increase. Finally, it is shown that effect of higher heating fluid temperature on specific cooling power improvement for beds with smaller length is more significant than those with longer length.

خورنده‌گی، قابلیت کارکرد در محدوده وسیعی از دمای منبع گرم بین ۵۰°C تا ۶۰۰°C و همچنین عدم نیاز به قطعات متحرک از جمله برتری‌های اصلی این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌های تبرید تراکمی بخار مرسوم می‌باشد. اگرچه ضعف اصلی سیستم‌های جذب سطحی، توان سرمایش مخصوص^۲ و

سیستم‌های تبرید جذب سطحی^۱ در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. عدم تأثیرات مخرب بر لایه اوزون و اثرات گرمایش جهانی، استفاده از مبردهای دوستدار محیط زیست با خاصیت غیر

² SCP: Specific cooling power

¹ Adsorption cooling systems

1- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mohammadzadeh Kowsari, S. B. Golparvar, H. Niazmand, Effect of inter-particle mass transfer resistance on the performance parameters of an adsorption chiller with finned flat-tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 414-424, 2017 (in Persian)

استفاده شد و نشان داده شد که افزایش مقدار تخلخل موجب کاهش مقاومت انتقال جرم می‌شود. هر چند که افزایش تخلخل موجب کاهش ضریب رسانش بستر و در نتیجه افزایش مقاومت انتقال گرمای می‌شود. مدت زمان جذب نیز با افزایش تخلخل، افزایش می‌یابد که می‌توان نتیجه گرفت مقاومت انتقال گرمای بر مقاومت انتقال جرم حاکم است.

نیازمند و دابزاده [7] برای مطالعه‌ی عددی یک چیلر جذب سطحی با بستر استوانه‌ای دارای فین‌های حلقوی از جفت‌کاری سیلیکاژل RD-آب استفاده کردند. مدل سازی بستر جاذب در مطالعه‌ی آن‌ها به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد و به بررسی تأثیر پیکربندی بستر مانند ارتفاع بستر، فاصله‌ی بین فین‌ها و همچنین قطر ذرات جاذب بر عملکرد سیستم پرداخته شد. نتایج حاصل شده نشان داد، به طور کلی برای دستیابی به یک توان سرمایش کل معین، استفاده از فین می‌تواند اندازه‌ی بستر را به طور چشمگیری کاهش دهد، اگرچه فین‌ها ضریب عملکرد سیستم را کاهش می‌دهند. مهدوی خواه و نیازمند [8] در مطالعه‌ای مشابه با استفاده از جفت سیلیکاژل 1L-SWS-آب در یک مدل سازی سه‌بعدی، اهمیت هندسه‌ی بستر دارای فین‌های صفحه‌ای بر عملکرد سیستم جذب سطحی را بررسی نمودند. آن‌ها در پژوهشی دیگر معیاری را برای در نظر گرفتن توزیع فشار پکنواخت یا غیرپکنواخت درون بستر جاذب ارائه نمودند [9]. نیازمند و همکاران [10] در ادامه‌ی مطالعات خود، به منظور شناسایی شکل هندسی مناسب‌تر فین، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای هندسی جامع با مشخصه‌ی جرمی و طولی یکسان بین فین‌های صفحه‌ای مربعی و حلقوی انجام دادند.

سولماس و همکاران [11] با استفاده از یک مدل دوبعدی غیر تعادلی و غیر هم فشار به بررسی تأثیر شرایط عملکردی سیستم بر مقدار جذب میانگین درون بستر جاذب استوانه‌ای بدون فین در طول فرایند جذب پرداختند. نتایج نشان داد که مدت زمان فرایند جذب، بیشتر از مقاومت‌های انتقال جرم به مقاومت‌های انتقال گرمای حساس است. بعلاوه برای رسیدن به شرایط تعادلی در مدت زمانی کوتاه و در نتیجه برای دستیابی به توان سرمایش مخصوص بهتر، نیاز است که مقاومت‌های رسانشی و همرفتی کاهش یابند.

گلپور و همکاران [12] در پژوهش خود عملکرد دو سیستم تبرید جذب سطحی با منابع حرارت اтلافی موتور شامل سیستم‌های اگزوژنی و آب رادیاتوری را مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که سیستم اگزوژنی نه تنها در تولید سرمایش توانمندتر است بلکه در شرایط محیطی متغیر نیز عملکرد بهتری دارد. آن‌ها در پژوهشی دیگر، به بهینه‌سازی هندسی بستر لوله با فین‌های طولی در یک سیستم تبرید جذب سطحی که با گرمای اتلافی گازهای اگزوژن کار می‌کند، پرداختند [13]. نتایج نشان داد که در بین آرایش‌های هندسی مورد بررسی، بستر با 20 عدد فین و ارتفاع فین 10mm، هندسه‌ی بهینه است که در این حالت بیشترین توان سرمایش مخصوص حاصل می‌گردد. همچنین با بررسی تأثیر قطر ذرات جاذب بر عملکرد سیستم، محدوده قطر $0.3\text{--}0.4\text{ mm}$ مناسب‌ترین قطر برای بستر مورد بررسی که حاوی ذرات زئولیتX13 است، می‌یابشد.

با توجه به پژوهش‌های بیان شده، مشخصات هندسی مدل گرمایی جذب سطحی و شرایط عملکردی سیستم از اهمیت زیادی در طراحی سیستم‌های تبرید جذب سطحی برخوردارند. نوع متفاوتی از مبدل‌های گرمایی، مبدل‌های صفحه-تخت^۱ هستند که از سطوح انتقال گرمای زیادی برخوردارند و از آنجا که انتقال گرمای نقشی اساسی در فرایندی‌های جذب و

ضریب عملکرد^۲ نسبتاً پایین به دلیل انتقال گرمای و انتقال جرم نسبتاً ضعیف درون بسترها جاذب^۳ است که منجر به حجمی‌ترشدن این سیستم‌ها می‌شود [1]. استفاده از سطوح گسترش‌یافته و بسترهای نوع پوشش‌داده شده^۴ از جمله روش‌های موثر در جهت بهبود سرعت فرایندی‌های انتقال گرمای و جرم درون بستر می‌باشدند. هرچند برای دستیابی به شرایط عملکردی مناسب، تنها استفاده از روش‌های فوق کافی نبوده و نیاز است تا مطالعه‌ی جامعی بر روی پارامترهای طراحی تأثیرگذار بر عملکرد چیلرهای جذب سطحی معمولاً به این پارامترها، طراحی و بررسی عملکرد چیلرهای جذب سطحی معمولاً به صورت مدل سازی عددی انجام می‌پذیرد. مدل‌های پیشنهادشده در زمینه‌ی طراحی عددی چیلرهای جذب سطحی را می‌توان از نظر دقیق و پیچیدگی مدل سازی جزئیات فرایندی‌های انتقال گرمای و انتقال جرم سیستم، به ترتیب به سه دسته کلی شامل مدل ترمودینامیکی، مدل پارامترهای متغیرکر و مدل پارامترهای توزیع شده (مدل انتقال گرمای و انتقال جرم) تقسیم نمود. از آنجا که در این مقاله از مدل انتقال گرمای و جرم برای مدل سازی عددی یک چیلر جذب سطحی با نوع خاصی از مبدل بستر جاذب استفاده شده است، لذا در ادامه به برخی از مطالعات انجام گرفته در حوزه‌ی مدل‌های انتقال گرمای و جرم اشاره می‌شود.

ژانگ و وانگ [2] در یک مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن مقاومت‌های انتقال جرم درون‌ذراهای^۵ و برون‌ذراهای^۶ به شبیه‌سازی لوله دوتایی استوانه‌ای دارای فین‌های شعاعی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از جفت زئولیتX-13-آب، تأثیر پیکربندی بستر جاذب شامل ابعاد بستر، تعداد فین‌ها و نفوذپذیری^۷ بر عملکرد سیستم بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که انتقال جرم ضعیف درون بستر در شرایطی که نفوذپذیری سیستم کمتر از یک مقدار بحرانی باشد، باعث افت جدی عملکرد سیستم می‌شود. از طرف دیگر برای سیستم‌های با زمان چرخه‌ی کوتاه، مقاومت انتقال جرم درون‌ذراهای می‌تواند به عنوان یک عامل محدودکننده مهم باشد.

لی و همکاران [3] به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بهینه شده در بستر جذب سطحی فین‌دار با جفت‌کاری سیلیکاژل-آب پرداختند. گام و طول فین جهت تولید سرمایش بیشینه بهینه شد و نشان داده شد که استفاده از طراحی پایه افزایش دهد. همچنین افزایش طول فین می‌تواند موجب افزایش مقاومت در برابر پخش بخار شود، اما افزایش مقدار سیلیکاژل می‌تواند تأثیر منفی محدودیت‌های انتقال جرم را جبران کند.

لیونگ و لیو [4] با انتخاب لوله‌ی دوتایی استوانه‌ای بدون فین، به مطالعه‌ی عددی پارامترهای طراحی تأثیرگذار بر عملکرد سیستم از جمله ضخامت و تخلخل^۸ بستر بعلاوه‌ی قطر ذرات جاذب سطحی و تخلخل بستر تأثیر کمی بر عملکرد سیستم دارد، ولی ضخامت بستر تأثیر زیادی بر عملکرد می‌گذارد. لیو و لیونگ [5] در ادامه‌ی پژوهش خود به بررسی تأثیر شرایط عملکردی از جمله دمای کندانسور، دمای اوپراتور، دمای جذب و احیا و همچنین سرعت و دمای گرم سیال حامل انرژی بر عملکرد سیستم پرداختند. دمیر و همکاران [6] به بررسی تأثیر تخلخل در بستر جاذب حلقوی بدون فین پرداختند. در این مطالعه، از مقادیر مختلف تخلخل برای بستر

¹ COP: Coefficient of performance

² Adsorbent bed

³ Coated type adsorbers

⁴ Intra-particle resistance

⁵ Inter-particle resistance

⁶ Permeability

⁷ Porosity

⁸ Flat-tube heat exchanger

(سیال کاری) می‌شود. قابل ذکر است که مبدل جذب سطحی در یک محفظه^۱ قرار می‌گیرد و بخارهای مبرد در آن جمع می‌گردد. به منظور مدل‌سازی عددی یک چرخه جذب سطحی ابتدا لازم است که هندسه‌ی مناسب مبدل گرمایی براساس هندسه واقعی شیوه‌سازی شود. در این پژوهش به دلیل وجود تقارن تقریبی در هندسه و شرایط مرزی مبدل مورد مطالعه، تنها مدل‌سازی بخش کوچکی از آن به عنوان محدوده حل عددی در نظر گرفته شده است (شکل ۱). سپس می‌بایست معادلات انتقال گرما مربوط به حوزه‌های سیال حامل انرژی، کanal فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال گرما و انتقال جرم مربوط به مواد جاذب و سیال مبرد به صورت همزمان حل شوند. به جزئیات روش و الگوریتم حل عددی مسئله در مرجع [۱۵] اشاره شده است. شایان ذکر است که در مقاله حاضر، ارتفاع بستر برابر با ارتفاع فین و عرض بستر دو برابر گام فین می‌باشد (شکل ۱).

۱- فرضیات مدل‌سازی

در این پژوهش از فرضیات زیر استفاده شده است [۱۰-۷]:

- ۱- سیال عامل در فاز جذب شده به صورت مایع و در فاز احیاشده به صورت گاز کامل در نظر گرفته شده است.
- ۲- تمامی ذرات جاذب کروی شکل بوده و دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند و به صورت یکنواخت در بستر توزیع شده‌اند.
- ۳- بین ذرات جاذب، سیال عامل جذب شده و بخار احیاشده تعادل دمایی وجود دارد.
- ۴- به استثنای چگالی بخار مبرد، سایر خواص مبرد، خواص سیال ناقل گرما، کanal فلزی، فین‌ها و مواد جاذب ثابت در نظر گرفته شده است.
- ۵- فشار ترمودینامیکی و دمای محفظه‌ی حاوی بستر جاذب نسبت به مکان یکنواخت و نسبت به زمان متغیر فرض شده است. در حالیکه فشار و دمای بستر جاذب تابعی از مکان و زمان در نظر گرفته شده است.

۲- معادلات حاکم

بر اساس فرضیات بیان شده، معادلات انتقال گرمایی مربوط به حوزه‌های سیال حامل انرژی، کanal فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال گرما و انتقال جرم مربوط به مواد جاذب و سیال مبرد باید به صورت همزمان حل

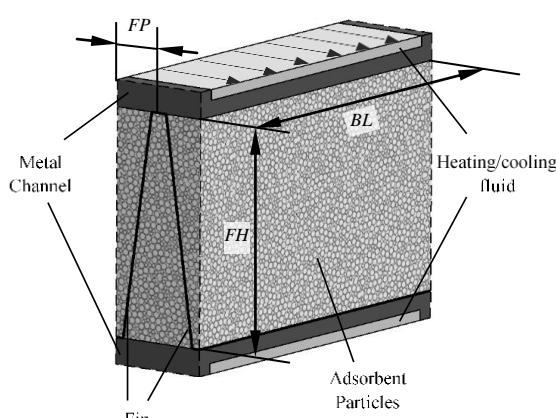


Fig. 1 Schematic of numerical solution domain in trapezoidal beds
شکل ۱ شماتیکی از محدوده حل عددی در بسترها ذوزنقه‌ای

^۱ Chamber

احیای مبرد درون بستر را ایفا می‌کند، لذا استفاده از آن‌ها به عنوان مبدل‌های جذب سطحی قابل توجه است. سانتاماریا و همکاران [۱۴] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی رفتار دینامیکی یک چیلر جذب سطحی دارای مبدل صفحه-تخت با فین‌های ذوزنقه‌ای و مقایسه‌ی آن با یک مبدل ایده‌آل شامل دانه‌های جاذب آزاد قرار گرفته بر روی یک صفحه‌ی فلزی تحت فرایندهای فشار ثابت پرداختند. جفت کاری استفاده شده در پژوهش آن‌ها رئولیت Z02-AQSOA FAM آب بود. نتایج آن‌ها نشان داد که برای ذرات گرما با قطر ۰.۳ تا ۰.۷ میلی‌متر رفتار دینامیکی تنها تابعی از نسبت سطوح انتقال گرما به جرم مواد جاذب است، در حالیکه برای ذرات با اندازه‌ی خیلی کوچک یا خیلی بزرگ به ترتیب مقاومت‌های انتقال جرم برون ذرهای و درون ذرهای رفتار جذب را کنترل می‌کنند. آن‌ها همچنین اثبات نمودند که مبدل خاص انتخاب شده در پژوهش آن‌ها کاملاً کارآمد بوده، چرا که توان سرمایش مخصوصی در حدود ۵۰-۶۶% توان سرمایش مخصوص مبدل ایده‌آل را دارد.

محمدزاده و همکاران [۱۵] به صورت عددی به بررسی تأثیر ساختار هندسی بسترها جاذب بر پارامتر عملکردی توان سرمایش مخصوص یک چیلر جذب سطحی با مبدل گرمایی صفحه-تخت پرداختند. در این مطالعه، طول بستر ثابت فرض شد و با در نظر گرفتن دو آرایش هندسی متفاوت از بسترها جاذب شامل فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای، به بررسی تأثیر ارتفاع و گام فین (به ترتیب در محدوده ۸-۲۰mm و ۳-۱۲mm) بر عملکرد بسترها پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد، در گام فین ۳mm، ارتفاع فین ۱۴-۲۰mm و طول بستر ثابت ۲۰mm، توان سرمایش مخصوص بسترها مستطیلی شکل حدوداً ۵% و ۱۷% به ترتیب به ازای ارتفاع فین ۱۴mm و ۲۰mm بهتر از بسترها ذوزنقه‌ای است، ولی در ابعاد هندسی دیگر بستر عملکرد هر دو آرایش هندسی از بسترها تقریباً مشابه یکدیگر است. هرچند در این پژوهش، پارامتر ضریب عملکرد سیستم بررسی نشد و فقط از منظر مقاومت انتقال گرما، پارامتر توان سرمایش مخصوص مطالعه شد. بعلاوه تأثیر بعد هندسی طول بستر، قطر ذرات جاذب و دمای منبع گرم بر پارامترهای عملکردی سیستم مورد ارزیابی قرار نگرفت.

هدف از مقاله حاضر، بررسی تأثیر طول بستر بر پارامترهای عملکردی توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد یک چیلر جذب سطحی تک بستره با مبدل صفحه-تخت است. بدین منظور، بسترها جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان در نظر گرفته شده و از منظر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای، تأثیر طول بستر بر عملکرد سیستم به ازای ارتفاع و گام‌های فین مختلف ارزیابی شده است. بعلاوه تأثیر طول بستر به ازای قطر ذرات جاذب و همچنین دمایان منبع گرم مختلف نیز بررسی شده است. در این پژوهش، با استفاده از جفت کاری سیلیکاژل SWS-1L آب، از یک مدل سه‌بعدی و با در نظر گرفتن فرایندهای انتقال گرما و هر دو نوع مقاومت انتقال جرم درون ذرهای و برون ذرهای برای مدل‌سازی بسترها جاذب استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی عددی

در چیلرهای جذب سطحی برای بستر مواد جاذب از یک مبدل گرمایی استفاده می‌شود و ذرات جاذب در اطراف لوله‌ی حاوی سیال ناقل گرما و در بین فین‌ها (در صورت وجود) قرار می‌گیرند. سیال حامل انرژی عبوری از داخل لوله‌ی فلزی بر اساس شرایط چرخه موجب گرمایش یا سرمایش لوله و فین‌ها و در نتیجه مواد جاذب بستر شده که منجر به احیا یا جذب مبرد

جدول 2 روابط تقریبی برای محاسبه‌ی میزان جذب تعادلی در بازه‌های مختلف ΔF
[20]

Table 2 Approximation equations for calculating w^* in different ΔF ranges [20]

ΔF (kJ/mol)	w^* (mol/mol)
< 5.322	$-4.869 \ln \Delta F + 12.231$
5.322 – 5.7839	$-2.2137 \Delta F + 15.932$
5.7839 – 10.5	$0.058917 (\Delta F - 10.5)^2 + 1.81776$
10.5 – 10.84	$-2.6387 \Delta F + 29.521$
10.84 – 11.15	$-1.2533 \Delta F + 14.512$
> 11.15	$55.731 \exp(-0.4155 \Delta F)$

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{cs} (\rho \vec{u})_g \cdot d\vec{A} + \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV = 0 \quad (9)$$

سرعت بخار مبرد در بستر به کمک قانون دارسی با روابط (11,10) محاسبه می‌شود [21]:

$$\vec{u}_g = -\frac{K_d \nabla P}{\mu_g} \quad (10)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon_b)^2} \quad (11)$$

که K_d نفوذپذیری بستر جاذب است [22]. با ترکیب معادلات (9) و (10)، معادله (12) برای محاسبه‌ی فشار بستر به دست می‌آید:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV = \int_{cs} \left(\rho_g \frac{K_d \nabla P}{\mu_g} \right) \cdot d\vec{A} - \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (12)$$

با حل معادله (12) یا به عبارت دیگر با فرض عدم یکنواختی فشار بستر، در واقع مقاومت انتقال جرم درون‌ذره‌ای در نظر گرفته خواهد شد.

مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده به کمک معادله‌ی حالت گاز کامل و فشار به دست آمده از معادله (12)، با رابطه (13) محاسبه می‌شود:

$$\rho_g = \frac{P}{R_g T_b} \quad (13)$$

2-3- پارامترهای عملکردی سیستم

پارامترهای عملکردی چیلر جذب سطحی شامل توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد از روابط (15,14) محاسبه می‌شوند:

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_b \times t_{cycle}} \quad (14)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (15)$$

جرم مواد جاذب بستر m_b و Q_{evap} و $Q_{heating}$ به ترتیب انرژی تبرید تولیدی و انرژی گرمایی ورودی به سیستم هستند:

$$Q_{evap} = \int_{isobaric\ cooling}^{t=t_2\ node=max} \dot{m}_{evap} L_v dt \quad (16)$$

$$Q_{heating} = \sum_{t=t_1} \sum_{node=1} [(m C_p \Delta T)_{chan} + (m C_p \Delta T)_{fin} + (\rho C_p \Delta T)_b + (m_b \Delta H \frac{dw}{dt} \Delta t)] \quad (17)$$

که L_v گرمایی نهان تبخیر آب در دمای اوپراتور است [23]. t_1 و t_2 به ترتیب زمان‌های شروع فرایند گرمایش جرم ثابت و اتمام فرایند احیای فشار ثابت در طی یک چرخه می‌باشند.

2-4- کنترل چرخه

در هر چرخه‌ی جذب سطحی، مدت زمان فرایندهای جرم ثابت و فشار ثابت

شوند. از آنجا که معادلات حاکم برای سیال حامل انرژی، کاتال فلزی و فین‌ها به همراه شرایط اولیه و مرزی آن‌ها بعلاوه‌ی روش مدل‌سازی محفظه به طور کامل در مرجع [15] بیان گردیده است، لذا در این مقاله تنها به بیان معادلات حاکم بستر جاذب که مهم‌ترین جزء چیلر جذب سطحی است، برداخته می‌شود.

معادله بقای انرژی بستر جاذب با فرض اتلاف وسکوز ناچیز به صورت رابطه (1) بیان می‌شود:

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cs} (\rho_g C_p g \vec{u}_g T_b) \cdot d\vec{A} = \int_{cs} (k \vec{V} T)_b \cdot d\vec{A} + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (1)$$

ρC_p ظرفیت گرمایش کلی بستر و ΔH و $\partial w / \partial t$ به ترتیب گرمای جذب و نرخ جذب می‌باشند.

$$\rho C_p = \varepsilon_t (\rho C_p)_g + \rho_b (1+w) C_{p(s,a)} \quad (2)$$

$C_{p(s,a)}$ گرمای ویژه جفت جاذب/جذب‌شونده [16] و ε_t و ρ_b به ترتیب تخلخل کلی و چگالی توده‌ای بستر می‌باشند [17].

$$C_{p(s,a)} = (a_0 + a_1 w + a_2 w^2) + (b_0 + b_1 w + b_2 w^2) T_b \quad (3)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1-\varepsilon_b) \varepsilon_p \quad (4)$$

$$\rho_b = (1-\varepsilon_b) \rho_p \quad (5)$$

در رابطه (3)، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد است و مقادیر ضرایب ثابت از جدول 1 محاسبه می‌شوند.

برای محاسبه نرخ جذب می‌توان از مدل نیرو و محکم‌هی خطی¹ استفاده نمود که در واقع مقاومت انتقال جرم درون‌ذره‌ای برای جذب و احیای سیال عامل را در نظر می‌گیرد [19,18].

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

w^* و w به ترتیب مقادیر جذب تعادلی و جذب لحظه‌ای می‌باشند. مقادیر w^* و ΔH براساس تئوری پتانسیل پلانی² برای جفت‌کاری سیلیکاژل SWS-1L-آب محاسبه می‌شوند [20]. بدین صورت که ابتدا مقدار پتانسیل جذب پلانی (ΔF) از رابطه (7) با استفاده از فشار بستر و فشار اشباع متناظر در دمای بستر (P_{sat}) محاسبه شده و سپس با توجه به باره ΔF معادله مربوط به تعیین میزان جذب تعادلی بر حسب (mol/mol) از جدول 2 تعیین می‌شود. برای محاسبه‌ی ΔH بر اساس دما و فشار بستر جاذب نیز از رابطه (8) استفاده شده است.

$$\Delta F = -R_u T_b \ln\left(\frac{P_b}{P_{sat}}\right) \quad (7)$$

$$\Delta H = L_v + \Delta F \quad (8)$$

که $L_v = 43450 \text{ J/mol}$ بیانگر گرمای ویژه‌ی تبخیر آب است.

معادله پیوستگی برای سیال عامل به صورت رابطه (9) می‌باشد:

جدول 1 مقادیر ضرایب ثابت رابطه (3) برای جاذب سیلیکاژل SWS-1L [16]

Table 1 Constant coefficients of Eq. (3) for SWS-1L adsorbent [16]

ضرایب	مقادیر
a_0	0.644107
a_1	2.73787
a_2	0.556714
$b_0 \times 10^3$	1.92126
$b_1 \times 10^3$	-5.67143
$b_2 \times 10^3$	16.0362

¹ LDF: Linear driving force model

² Polanyi potential theory

طلولی تر شود و در نتیجه‌ی این امر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای درون بستر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، مشخص است که با افزایش عرض بستر (یا گام فین) در هر ارتفاع و طول مشخص از بستر، جرم مواد جاذب در جهت عرضی بستر زیاد می‌شود. با افزایش عرض بستر یا به عبارت دیگر، با افزایش فاصله‌ی بین سطوح انتقال گرما از یکدیگر، انتقال گرمای درون بستر آهسته‌تر شده که به معنای افزایش مقاومت انتقال گرمای درون بستر است. بنابراین، با افزایش طول یا عرض بستر، زمان چرخه به سبب افزایش مقاومت جرمی یا مقاومت گرمایی افزایش می‌یابد. اما نکته قابل توجه در خصوص شیب نمودارهای شکل 2 است. با توجه به این شکل، در هر ارتفاع مشخص بستر (یا هر ارتفاع مشخص فین)، شیب تغییرات زمان چرخه بر حسب تغییرات گام فین به ازای طول‌های مختلف بستر تقریباً یکسان است. دلیل این امر آن است که به ازای افزایش جرم مواد جاذب به سبب افزایش طول بستر (در هر ارتفاع و عرض مشخص بستر)، در عین حال که فاصله‌ی بین سطوح انتقال گرما (ارتفاع و عرض بستر) ثابت می‌ماند، به نسبت افزایش جرم جاذب، مساحت سطوح انتقال گرما در جهت طولی بستر افزایش می‌یابد. در این حالت، مقاومت گرمایی تقریباً ثابت مانده و تنها مقاومت انتقال جرم برون ذرهای درون بستر افزایش می‌یابد.

شکل 3، تأثیر عرض و طول بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل با ارتفاع فین 14mm را بر پارامتر توان سرمایش مخصوص نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد، افزایش جرم مواد جاذب در جهت‌های طولی و عرضی بستر به ترتیب باعث افزایش مقاومت‌های انتقال جرم برون ذرهای و گرمایی درون بستر و به تبع آن، افزایش زمان چرخه می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش جرم جاذب، مقدار مبرد در چرخش در هر چرخه و در نتیجه میزان سرمایش کل تولید شده نیز افزایش می‌یابد. هرچند، این افزایش به میزانی نیست که اثرات کاهشی افزایش جرم و زمان چرخه بر SCP سیستم را جبران کند. بنابراین همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، افزایش طول یا عرض بستر باعث کاهش SCP سیستم می‌شود. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش طول بستر بر میزان کاهش SCP، در گام‌های کوچکتر فین محسوس‌تر است، در حالی که تأثیر افزایش طول بستر بر میزان افزایش زمان چرخه به ازای تمامی گام‌های فین تقریباً یکسان است (شکل 2). از این رو، حساسیت SCP به طول بستر را نمی‌توان تنها به مقاومت انتقال جرم برون ذرهای مربوط دانست. تأثیریدیری SCP نسبت به تغییرات طول بستر به میزان انرژی سرمایشی کل تولیدی نیز بستگی دارد. برای تحلیل بهتر این موضوع، شکل 4 که بیانگر تأثیر عرض و طول بستر بر میزان انرژی سرمایشی کل تولیدی در اوپراتور یک چیلر جذب سطحی است به تصویر کشیده شده است. شایان ذکر است که انرژی سرمایشی کل به میزان جرم جاذب استفاده شده در بستر بستگی دارد. در شکل 4، میزان انرژی سرمایشی تولیدی کل به ازای جرم جاذب مشخصی از بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای با ارتفاع فین 14mm نشان داده شده است. از آنجا که برای مقایسه عملکرد بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای از مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان استفاده شده است و همچنین با توجه به معیارهای استفاده شده برای کنترل چرخه (یخش 4-2)، میزان انرژی سرمایشی کل تولیدی به ازای هر بعد مشخص از هر یک از بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای یکسان می‌باشد. با توجه به شکل 4، در هر طول مشخص بستر، با افزایش خطی گام فین و به سبب آن، افزایش خطی جرم مواد جاذب، سرمایش تولیدی نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش خطی طول بستر در هر گام فین مشخص نیز افزایش انرژی سرمایشی خطی است. از آنجا که در

با یکدیگر متفاوت است. برای مراحل گرمایش و سرمایش جرم ثابت زمانی که لازم است تا فشار محفظه به ترتیب به فشار کنداسور و اوپراتور برسد به عنوان زمان اتمام فرایندها در نظر گرفته می‌شود. زمان مراحل فشار ثابت بر اساس رسیدن به درصد معینی از جذب نهایی است که با استفاده از روابط (19,18) به ترتیب برای مراحل احیا و جذب فشار ثابت محاسبه می‌شود:

[24,10,8]

$$W_{\min} = W_{\max}^* + 0.2(W_{\max}^* - W_{\min}^*) \quad (18)$$

$$W_{\max} = W_{\max}^* - 0.2(W_{\max}^* - W_{\min}^*) \quad (19)$$

که W_{\min}^* میزان جذب تعادلی کمینه در فشار کنداسور و دمای گرمایش سیال ناقل گرما و W_{\max}^* میزان جذب تعادلی بیشینه در فشار اوپراتور و دمای سرمایش سیال ناقل گرما می‌باشد.

3- نتایج

در این بخش، بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان در نظر گرفته شده‌اند و از منظر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای، تأثیر طول بستر بر عملکرد سیستم به ازای ارتفاع و گام‌های فین مختلف ارزیابی شده است. بعلاوه تأثیر طول بستر به ازای قطر ذرات جاذب و همچنین دمایان دمایان منبع گرم مختلف نیز بررسی شده است. در جدول 3 مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی استفاده شده در شبیه‌سازی حاضر ارائه شده است. شایان ذکر است که اعتبارستجو مدل عددی ارائه شده، در مرجع [15] بیان گردیده است.

1- تأثیر مقاومت برون ذرهای بر پارامترهای عملکردی بسترهای

جادب مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل

به منظور بررسی تأثیر عرض و طول بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل (با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان) بر زمان چرخه، بسترهای جاذب با ارتفاع فین 14mm به عنوان بسترهای نمونه در نظر گرفته شده‌اند و نتایج این بررسی در شکل 2 نشان داده شده است. بدیهی است که با افزایش طول بستر در هر ارتفاع و عرض مشخص از بستر (شکل 1)، جرم مواد جاذب جاگرفته در بستر به صورت خطی افزایش می‌یابد. جرم بیشتر در جهت طولی بستر باعث می‌شود که مسیر عبور بخار سیال اعمال از میان ذرات جاذب

جدول 3 مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی

Table 3 The geometrical specifications, thermodynamic properties, and operation conditions

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
قطر هیدرولیکی داخلی کانال فلزی	D_h	2.42	mm
ضخامت فین	FT	0.5	mm
زاویه حاده در بسترهای ذوزنقه‌ای شکل	$Angle$	82	degree
دبی گرمی سیال حامل انرژی	\dot{m}_f	0.01	kg/s
قطر ذرات جاذب استفاده شده در بخش 1	d_p	0.3	mm
3 و بخش 3-3 تخلخل ذرات	ϵ_p	0.52	-
تخلخل بستر	ϵ_b	0.36	-
ضریب انتقال گرمای هدایت معادل بستر	k_b	0.2	W/m.K
چگالی ذرات جاذب بستر	ρ_p	1037	kg/m³
فشار اوپراتور	P_{evap}	1280	Pa
فشار کنداسور	P_{cond}	4230	Pa
دمای سیال گرم ورودی	$T_{heating}$	90	°C
دمای سیال سرد ورودی	$T_{cooling}$	30	°C

فین، میزان افزایش زمان چرخه و جرم جاذب نسبت به میزان افزایش سرمایش کل، تأثیر محسوس‌تری بر کاهش SCP سیستم می‌گذارد. بطوریکه با توجه به شکل ۳، در یک بستر مستطیلی شکل با $FH=14mm$ و $FP=3mm$ ، به ازای افزایش طول بستر از ۲۰mm تا ۶۰mm، توان سرمایش مخصوص سیستم از $822W/kg$ به $257W/kg$ (۶۹% کاهش) کاهش یافته است. در حالیکه این کاهش برای $FP=12mm$ از $141W/kg$ به $207W/kg$ (۳۲% کاهش) می‌باشد. نتیجه‌ی مشهود دیگر از شکل ۳ این است که تأثیر افزایش گام فین بر کاهش SCP در طول‌های کوتاه‌تر بستر، قابل توجه‌تر است. این موضوع نیز با توجه به میزان انرژی سرمایشی کل تولیدی توجیه می‌شود. با توجه به شکل ۴ در طول‌های کوتاه‌تر بستر در مقایسه با طول‌های بلندتر، میزان افزایش انرژی سرمایشی کل به سبب افزایش گام فین، کمتر است. در نتیجه با افزایش گام فین در طول‌های کوتاه‌تر بستر، میزان افزایش زمان چرخه و جرم جاذب نسبت به میزان افزایش سرمایش کل تولیدی، تأثیر قابل توجه‌تری بر کاهش SCP سیستم دارد. بطوریکه با توجه به شکل ۳، در یک بستر مستطیلی شکل با $BL=20mm$ و $FH=14mm$ ، به ازای افزایش گام فین از ۳mm تا ۱۲mm، توان سرمایش مخصوص سیستم از $822W/kg$ به $207W/kg$ (75% کاهش) کاهش یافته است. در حالیکه این کاهش برای $BL=60mm$ از $141W/kg$ به $257W/kg$ (45% کاهش) می‌باشد.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در گام فین ۳mm، توان سرمایش مخصوص بسترهای مستطیلی تا حدودی بهتر از بسترهای ذوزنقه‌ای شکل است و در گام‌های دیگر فین، SCP دو بستر تقريباً مشابه یکدیگر می‌باشد. در مرجع [15] دليل اختلاف بین SCP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای که در ابعاد هندسی معینی از بسترهای به وجود می‌آید، بيان گردیده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که با افزایش طول بستر از ۲۰mm تا ۶۰mm در $FP=3mm$ ، اختلاف بین توان سرمایش مخصوص دو بستر از ۵W/kg به $42W/kg$ کاهش یافته است. از طرف دیگر، چنانچه اختلافی بین زمان چرخه بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل وجود داشته باشد، با افزایش طول بستر میزان این اختلاف تقريباً ثابت می‌ماند (شکل ۲). تنها عامل ایجاد اختلاف بین SCP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان و همچنین با توجه به معیارهای استفاده شده برای کنترل چرخه، میزان مقاومت گرمایی بستر و به تبع آن زمان چرخه است. با این وجود با افزایش طول بستر، افزایش زمان چرخه به میزانی است که اختلاف بین زمان چرخه دو بستر تأثیر کمتری بر ایجاد اختلاف بین SCP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای می‌گذارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول بستر، اهمیت شکل هندسی بستر بر پارامتر عملکردی توان سرمایش مخصوص سیستم کمتر می‌شود.

برای بررسی تأثیر ارتفاع و طول بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای بر زمان چرخه، بسترهای جاذب با گام فین ۳mm در نظر گرفته شده‌اند و نتایج این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. افزایش ارتفاع بستر تأثیر مشابهی با افزایش عرض بستر دارد و منجر به افزایش مقاومت گرمایی درون بستر می‌شود. با افزایش جرم مواد جاذب به سبب افزایش ارتفاع با طول بستر، مقاومت گرمایی یا برون‌ذرهای و به تبع آن زمان چرخه افزایش می‌باشد، هرچند که SCP افت می‌کند (شکل ۶). با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، مجدداً مشاهده می‌شود که مشابه شکل‌های ۲ و ۳، با افزایش طول بستر در عین حال که اختلاف بین زمان چرخه بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل در گام فین ۳mm و ارتفاع‌های فین ۱۴mm و ۲۰mm، تقريباً ثابت می‌ماند ولی

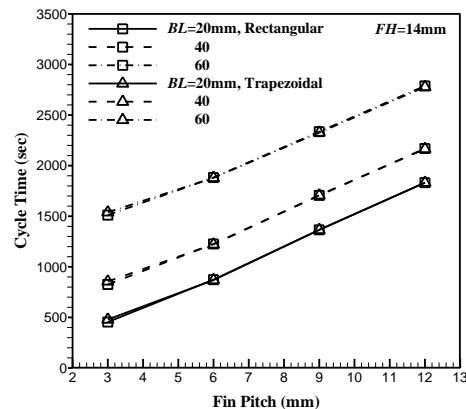


Fig. 2 تغییرات زمان چرخه بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

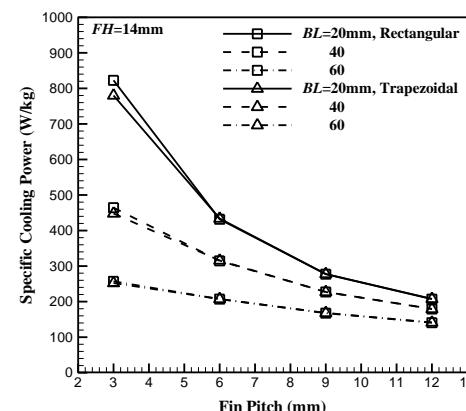


Fig. 3 تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

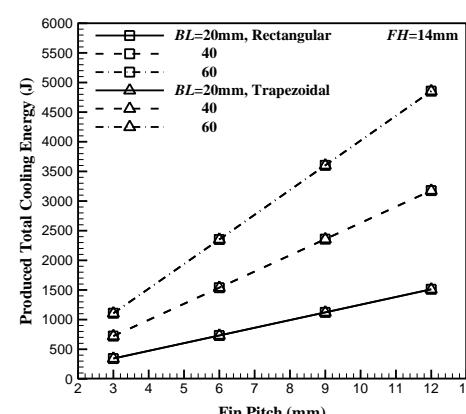


Fig. 4 تغییرات انرژی سرمایشی کل تولیدی بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

گام‌های کوچکتر فین در مقایسه با گام‌های بزرگتر فین مقدار جرم جاذب بستر کمتر است، میزان افزایش سرمایش کل تولیدی به سبب افزایش طول بستر نیز کمتر است. در نتیجه، با افزایش طول بستر در گام‌های کوچکتر

تأثیر ارتفاع و عرض بستر بر ضریب عملکرد بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل با طول ثابت 20mm نشان داده شده است. از آنجا که برای مقایسه عملکرد بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای از مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان استفاده شده است و همچنین با توجه به معیارهای استفاده شده برای کنترل چرخه، انرژی تبرید کل تولیدی و همچنین میزان انرژی گرمایی ورودی برای هر دو آرایش هندسی از بسترهای تقریباً یکسان بوده و بنابراین COP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای به ازای نمای ارتفاع و عرض‌های مختلف بستر، تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. با افزایش ارتفاع یا عرض بستر و به تبع آن افزایش جرم جاذب، انرژی سرمایشی کل تولید شده و نیز انرژی گرمایی ورودی به سیستم، هر دو افزایش می‌باشد. بدینهی است که افزایش انرژی سرمایشی موجب تقویت COP و افزایش انرژی گرمایی باعث تضییف COP می‌شود. به منظور تحلیل COP، بهتر است منابع مصرف انرژی گرمایی مورد بررسی قرار گیرند. از این رو در شکل 8 سهم انرژی دریافتی حوزه‌های مختلف مبدل جذب سطحی از انرژی گرمایی ورودی به سیستم به ازای ارتفاع و گام‌های فین مختلف بستر مستطیلی شکل به تصویر کشیده شده است. انرژی گرمایی کل ورودی به مبدل به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اول صرف افزایش دمای کانال فلزی، فین‌ها و بستر مواد جاذب شده و بخش دوم صرف تامین گرمای احیا در طول فرایند احیا می‌شود. بخش اول که به صورت گرمای محسوس انتقالی به حوزه‌های مختلف مبدل در طول فرایندهای گرمایشی چرخه (فرایندهای گرمایش جرم ثابت و احیای فشار ثابت) است، مجدداً باید در طول فرایندهای سرمایشی چرخه (فرایندهای سرمایش جرم ثابت و جذب فشار ثابت) از سیستم گرفته شود. بنابراین بخش گرمای محسوس مستقیماً نقشی در فرایند احیای مبرد و در نتیجه انرژی سرمایشی کل تولید شده ندارد و از این رو به عنوان گرمای اتلافی سیستم محسوب می‌شود. از طرف دیگر، بخش دوم از انرژی گرمایی ورودی به سیستم که صرف تامین گرمای احیا در طول فرایند احیا می‌شود، در واقع گرمایی است که به منظور احیای مبرد جذب شده در ذرات جاذب باید به بستر داده شود. بدینهی است که مقدار مبرد احیاشده مستقیماً در انرژی سرمایشی تولید شده اثرگذار است و از این رو گرمای احیا به عنوان گرمای مفید سیستم محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع یا عرض بستر در هر طول مشخص از بستر، سهم گرمای احیا (گرمای مفید) به طور جزئی افزایش می‌باشد و به سبب آن، سیستم نیز با توجه به شکل 7 به صورت جزئی افزایش می‌باشد. شایان ذکر است از آنجا که در هر ارتفاع، عرض و طول مشخص از بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل، جرم فلز فین‌های مستطیلی شکل به مقداری جزئی بیشتر از جرم فلز فین‌های ذوزنقه‌ای است، لذا سهم گرمای هدرفته در بسترهای مستطیلی بیشتر از بسترهای ذوزنقه‌ای است و از این رو با توجه به شکل 7 COP بسترهای مستطیلی به صورت جزئی کمتر از COP بسترهای ذوزنقه‌ای می‌باشد.

جانچه پیشتر اشاره شد، با افزایش طول بستر در هر ارتفاع و عرض مشخص بستر، مقاومت گرمایی تقریباً ثابت می‌ماند و تنها مقاومت برون‌ذرهای زیاد می‌شود. هرچند که مقاومت برون‌ذرهای مستقیماً بر زمان چرخه تأثیرگذار است و از آنجا که پارامتر زمان چرخه در محاسبه‌ی ضریب عملکرد وارد نمی‌شود، بنابراین تغییر طول بستر تأثیری بر ضریب عملکرد بسترهای مبدل صفحه-تخت نمی‌گذارد. با افزایش طول بستر در هر ارتفاع و عرض مشخص بستر، مقدار انرژی کل تبرید تولیدی و انرژی کل گرمایی

اختلاف بین SCP بسترهای کم می‌شود. بطوریکه با توجه به شکل 6، در بسترهای با FP=3mm و FH=20mm، به ازای افزایش طول بستر از 20mm تا 60mm، اختلاف توان سرمایش مخصوص بین بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای از 13W/kg به 115W/kg می‌باشد. با توجه به نتایج بررسی شده، افزایش ارتفاع یا عرض بستر (ارتفاع با گام فین) منجر به افزایش مقاومت انتقال جرم برون‌ذرهای می‌شود. افزایش مقاومت‌های انتقال منجر به افزایش زمان چرخه می‌گردد. از طرف دیگر، با افزایش جرم جاذب میزان سرمایش کل تولید شده نیز افزایش می‌باشد. هرچند، این افزایش به میزان نیست که اثرات کاهشی افزایش جرم و زمان چرخه بر SCP جبران کند. همچنین مشخص شد که در صورت وجود اختلاف بین SCP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان، افزایش طول بستر موجب کاهش این اختلاف می‌شود، بطوریکه اهمیت شکل هندسی بستر بر پارامتر SCP سیستم کمتر می‌شود.

پارامتر عملکردی دیگر در سیستم‌های تبرید جذب سطحی، ضریب عملکرد سیستم است که به صورت نسبت انرژی سرمایشی کل تولید شده به انرژی گرمایی داده شده به سیستم تعریف می‌شود (رابطه 15). در شکل 7،

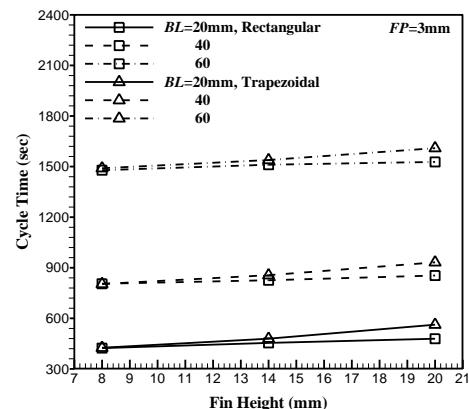


Fig. 5 Variations of cycle time with fin height for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

شکل 5 تغییرات زمان چرخه بر حسب ارتفاع فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

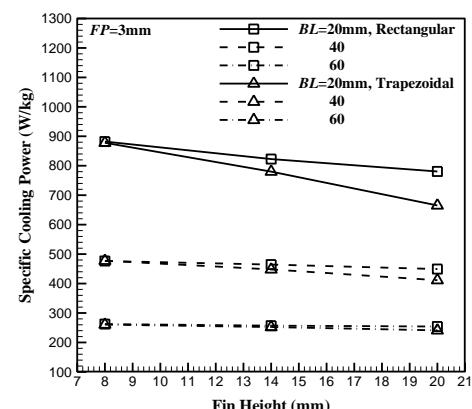


Fig. 6 Variations of specific cooling power with fin height for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

شکل 6 تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب ارتفاع فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

به این هندسه با تقریب خوبی به بسترهای ذوزنقه‌ای شکل نیز قابل تعمیم است.

در هر بستر مشخص از نظر هندسی، افزایش قطر ذرات جاذب منجر به کاهش سرعت فرایند انتقال جرم در داخل ذره می‌شود که از آن به عنوان مقاومت انتقال جرم درون‌ذرهای یاد می‌شود. از سوی دیگر در اثر افزایش قطر، نفوذپذیری بستر افزایش می‌یابد (راطیه 11) و در نتیجه عبور بخار مبرد از میان ذرات جاذب بستر تسهیل شده و گرادیان فشار در طول بستر کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش قطر ذرات به ترتیب منجر به افزایش و کاهش مقاومت‌های انتقال جرم درون‌ذرهای و بروون‌ذرهای می‌شود. کاهش قطر ذرات تأثیر معکوسی بر فرایندهای انتقال جرم دارد، بطوریکه با کاهش نفوذپذیری بستر و افزایش مقاومت بین‌ذرهای، گرادیان فشار در طول بستر افزایش می‌یابد، هرچند که مقاومت درون‌ذرهای کاهش می‌یابد [24]. از آنجا که با تغییر قطر ذرات جاذب، مقاومت‌های درون‌ذرهای و بین‌ذرهای همزمان و در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند، لذا انتظار می‌رود در هر بستر با هندسه و شرایط عملکردی مشخص، برایند این مقاومت‌ها در قطر مشخصی به کمترین مقدار خود برسد که این قطر به عنوان قطر بهینه بستر شناخته می‌شود. کمترین مقاومت انتقال جرم متناظر با کمترین زمان چرخه و بیشترین COP است. هرچند که با تغییر قطر ذرات، COP سیستمی با ابعاد مشخص بستر تقریباً ثابت باقی می‌ماند [24,7]. این عدم وابستگی را می‌توان اینگونه توضیح داد که تغییر مقاومت‌های انتقال جرم مستقیماً بر زمان فرایندهای جذب و احیای مبرد تأثیرگذار است، اما میزان گرمای مورد نیاز برای جذب و احیای جرم معینی از مبرد به زمان وایسته نبوده و در نتیجه COP تغییر نمی‌کند. برای بسترهای با ارتفاع و گام فین 9mm، مقدار COP حدود 0.65 محاسبه شده است.

شایان ذکر است که به منظور کاهش محاسبات این بخش تنها بسترهای با ارتفاع و گام فین 9mm به عنوان بسترهای نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محدوده قطر ذرات جاذب نیز بین 0.9mm تا 0.2mm در نظر گرفته شده است. شکل‌های 9 و 10 به ترتیب تغییرات زمان چرخه و توان سرمایش مخصوص سیستم را بر حسب قطر ذرات جاذب به ازای طول‌های مختلف بستر مستطیلی شکل نشان می‌دهند. با توجه به شکل 9، زمان چرخه‌ی هر بستر مشخص از نظر هندسی، در قطر مشخصی از ذرات جاذب کمینه می‌شود که این مقدار متناظر با حداقل برایند مقاومت‌های انتقال جرم درون‌ذرهای و بروون‌ذرهای است. با کاهش و یا افزایش قطر ذرات از مقدار بهینه، زمان چرخه به ترتیب به علت افزایش نسبی مقاومت بین‌ذرهای و یا مقاومت درون‌ذرهای افزایش می‌یابد. نظر به اینکه زمان چرخه به صورت معکوس بر SCP سیستم اثرگذار است و از طرفی در هر بستر مشخص از نظر هندسی، جرم مواد جاذب موجود در بستر و برودت تولید شده در اوپراتور به ازای تغییر قطر ذرات (با توجه به معیارهای کنترل چرخه) تقریباً ثابت می‌ماند، لذا حداقل SCP سیستم متناظر با حداقل زمان چرخه و به ازای قطر بهینه یکسانی محاسبه می‌شود (شکل 10).

در قطر مشخصی از ذرات جاذب، تغییر طول بستر بر مقاومت درون‌ذرهای تأثیر نمی‌گذارد، اما با افزایش طول بستر مسیر عبور سیال مبرد از میان ذرات جاذب طولانی‌تر شده و در نتیجه مقاومت بین‌ذرهای افزایش می‌یابد که منجر به افزایش زمان چرخه و در نتیجه کاهش SCP می‌شود. از آنجا که افزایش طول بستر در جهت تقویت مقاومت بروون‌ذرهای است و در قطر ذرات جاذب کوچکتر، نقش مقاومت بروون‌ذرهای به مرتب بیشتر از مقاومت درون‌ذرهای است، لذا در ذرات با قطر کوچکتر تغییرات زمان چرخه و

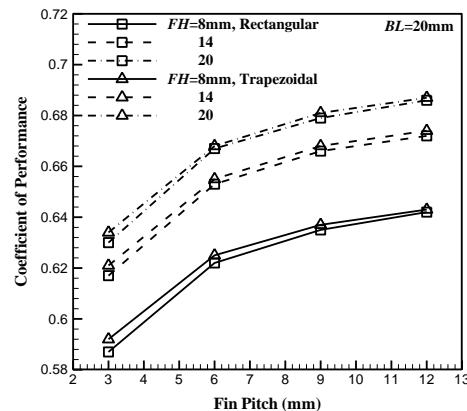


Fig. 7 Variations of coefficient of performance with fin pitch for different fin heights in rectangular and trapezoidal beds

شکل 7 تغییرات ضریب عملکرد بر حسب گام فین در ارتفاع‌های فین مختلف برای بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای

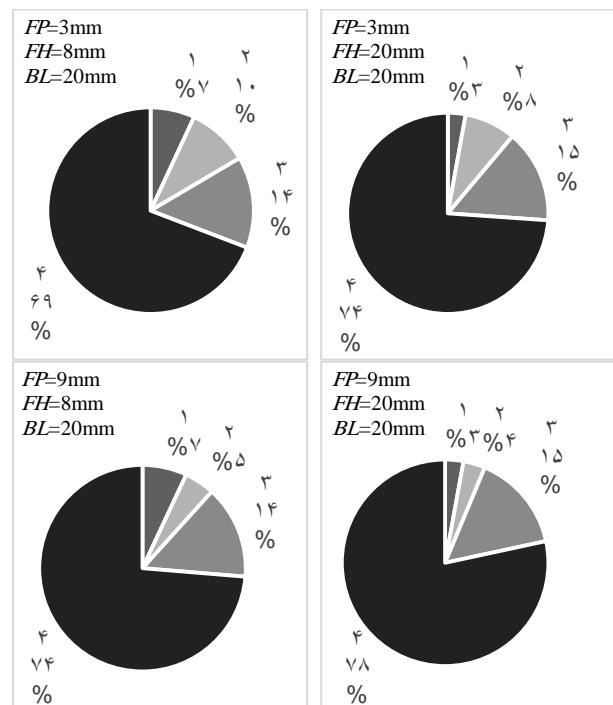


Fig. 8 Distribution of the supplied thermal energy between different parts of the heat exchanger with rectangular bed including: 1) metal channel, 2) fin, 3) adsorbent bed, 4) desorption heat

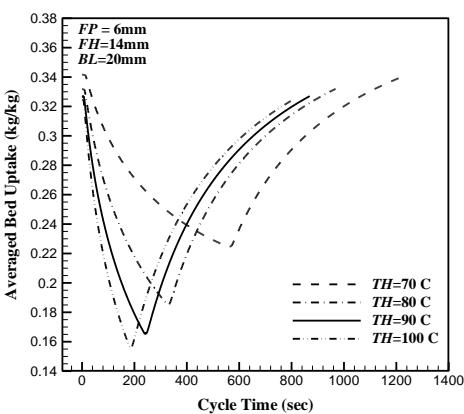
شکل 8 توزیع انرژی گرمایی ورودی بین حوزه‌های مختلف مبدل با بستر مستطیلی شامل: 1) کانال فلزی، 2) فین، 3) بستر جاذب، 4) گرمای احیا

ورودی به سیستم تقریباً به یک نسبت زیاد شده و از این رو سهم گرمای احیا (گرمای مفید) نسبت به کل گرمای محسوس انتقالی به سیستم (گرمای هدر رفتہ) تقریباً ثابت می‌ماند. از این رو با افزایش طول بستر، COP تقریباً ثابت می‌ماند و در نتیجه بسترهای با طول 60mm و 40mm نیز رفتار نسبتاً مشابهی با بسترهای به طول 20mm (شکل 7) خواهند داشت.

3-2- تأثیر مقاومت بروون‌ذرهای بر قطر بهینه ذرات جاذب
در این بخش، به منظور بررسی تأثیر مقاومت انتقال جرم بروون‌ذرهای بر قطر بهینه ذرات جاذب بستر در چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت، فقط بسترهای مستطیلی شکل در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است که نتایج مربوط

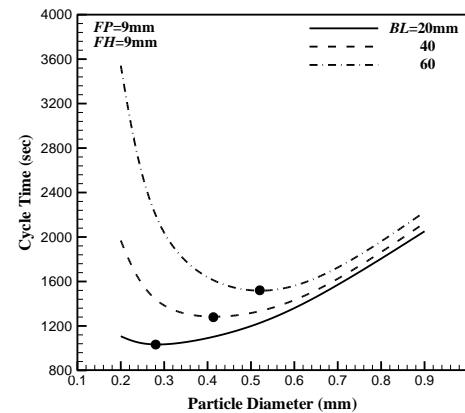
شده‌اند و محدوده تغییرات دمای منبع گرم بین 70°C تا 100°C در نظر گرفته شده است. بدیهی است که نتایج مربوط به این هندسه با تقریب خوبی به بسترها ذوزنقه‌ای شکل نیز قابل تعمیم است. برای مطالعه *SCP* نیاز است که پارامترهای زمان چرخه و انرژی سرمایشی کل تولیدی مورد بررسی قرار گیرند. به منظور درک بهتر نحوه تغییرات این دو پارامتر بر حسب دمای منبع گرم، بهتر است نگاهی به نمودار میزان جذب میانگین سیال مبرد بیاندازیم. بدین منظور، نمودار میزان جذب میانگین سیال مبرد بر حسب زمان چرخه به ازای دماهای مختلف منبع گرم برای یک بستر جاذب نمونه با ابعاد 6mm , $FP=14\text{mm}$, $FH=6\text{mm}$ و $BL=20\text{mm}$ در شکل 11 نشان داده شده است. با افزایش دمای آب گرم ورودی، مقدار جذب تعادلی بیشینه (W_{\max}^*) ثابت می‌ماند، زیرا تابعی از دمای آب سرد ورودی است. این در حالی است که مقدار جذب تعادلی کمینه (W_{\min}^*) که تابعی از دمای آب گرم ورودی است، کاهش می‌یابد. در نتیجه با توجه به روابط 18 و 19، مقدار جذب حداقلی (W_{\min}) به صورت جزئی و مقدار جذب حداقلی (W_{\max}) به صورت تراکمی می‌یابد. بنابراین با افزایش دمای آب گرم ورودی، اختلاف محسوس‌تر کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش دمای آب گرم ورودی، اختلاف بین مقدارهای جذب حداقلی و حداقلی بیشتر می‌شود که بدان معناست که جرم مبرد در چرخش در هر چرخه و به تبع آن، انرژی سرمایشی کل تولیدشده در سیستم افزایش می‌یابد. شایان ذکر است، نرخ جذب مبرد با افزایش دمای آب گرم ورودی تقریباً ثابت می‌ماند، زیرا تابعی از دمای سرمایشی سیال حامل انرژی است، ولی نرخ احیا مستقیماً تحت تأثیر دمای آب گرم ورودی است. بنابراین با افزایش دمای آب گرم ورودی، نرخ احیا زیاد شده و منجر به کاهش زمان چرخه می‌شود.

در شکل 12 تأثیر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای و دمای منبع گرم بر پارامتر توان سرمایش مخصوص نشان داده شده است. به سبب افزایش دمای منبع گرم، زمان چرخه کاهش و از طرف دیگر انرژی سرمایشی تولیدی کل افزایش می‌یابد. در نتیجه، *SCP* افزایش می‌یابد. هرچند که تأثیر افزایش دمای منبع گرم بر بهبود *SCP*, برای بسترها با طول کوتاهتر محسوس‌تر است. افزایش دمای منبع گرم، منجر به بهبود فرایند انتقال گرما در حین فرایند احیا می‌شود. حال چنانچه مقاومت برون ذرهای نسبتاً کم باشد، این بهبود تأثیر قابل توجه‌تری بر افزایش *SCP* می‌گذارد. با توجه به شکل 12 و توضیحات بیان شده، در بستری با $FP=6\text{mm}$, $FH=14\text{mm}$, $BL=20\text{mm}$ و $TH=70^{\circ}\text{C}$ تا 100°C ، توان سرمایش مخصوص به ازای افزایش دمای منبع گرم از 70°C تا 100°C به افزایش دمای منبع گرم از 70°C تا 100°C نسبتاً کم است.

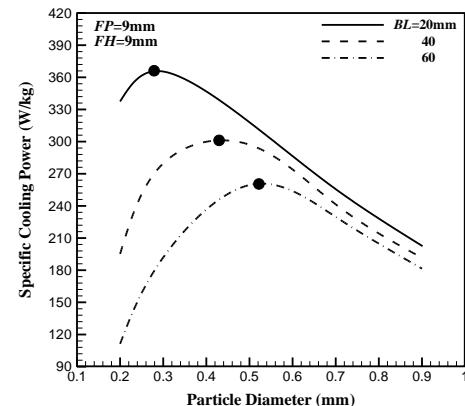


شکل 11 تغییرات میانگین جذب بستر بر حسب زمان چرخه در دماهای مختلف منبع

گرم بستر مستطیلی



شکل 9 تغییرات زمان چرخه بر حسب قطر ذرات در طول‌های مختلف بستر مستطیلی



شکل 10 تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب قطر ذرات در طول‌های مختلف بستر مستطیلی

SCP سیستم به ازای افزایش طول بستر بسیار محسوس‌تر است. بطوریکه با توجه به شکل 10، در بستری با ارتفاع و گام فین 9mm به ازای افزایش طول بستر از 20mm تا 60mm ، توان سرمایش مخصوص سیستم با ذرات جاذب به قطر 0.2mm از 111W/kg به 337W/kg افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 9 و 10 مشاهده می‌شود، در هر بستر با ابعاد مشخص، با افزایش طول بستر علبه مقاومت درون ذرهای بر برون ذرهای در قطرهای بهینه‌ی بزرگتری اتفاق می‌افتد. بطوریکه با افزایش طول بستر از 20mm به 60mm ، مقدار قطر بهینه از حدود 0.3mm به 0.5mm افزایش یافته است. شایان ذکر است که قطر بهینه به دست آمده در محدوده $0.3\text{-}0.5\text{mm}$ با نتایج آزمایشگاهی ساتماریا و همکاران [14] که از بسترها ذوزنقه‌ای شکل با گام فین نسبتاً کوچک (در حدود 2mm) استفاده نمودند، همخوانی دارد.

3-3- تأثیر مقاومت برون ذرهای و دمای منبع گرم بر عملکرد سیستم به منظور بررسی همزمان تأثیر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای و دمای منبع گرم بر عملکرد سیستم، فقط بسترها مستطیلی شکل با ارتفاع 14mm , گام 6mm و طول‌های 20mm الی 60mm به عنوان بسترها نمونه انتخاب

- افزایش طول بستر منجر به کاهش اختلاف SCP بین بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای شکل در ابعاد $FH=14$, $20mm$ و $FP=3mm$ می‌شود. در گام و ارتفاع‌های دیگر بستر که SCP بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای تقریباً مشابه یکدیگر است، افزایش طول بستر منجر به ایجاد اختلاف بین SCP دو آرایش هندسی متفاوت از بسترهای نمی‌شود.
- در ادامه، به بررسی تأثیر طول بستر ($20-60mm$) بر قطر بهینه ذرات جاذب بستر مستطیلی با ارتفاع و گام فین $9mm$ پرداخته شد و نشان داده شد:

 - تأثیر افزایش مقاومت برون ذرهای بر افزایش زمان چرخه و کاهش SCP سیستم در قطر ذرات جاذب نسبتاً کوچک در مقایسه با ذرات نسبتاً بزرگ به مرتب بیشتر است.
 - با افزایش طول بستر، مقدار قطر بهینه بستر بزرگتر می‌شود.
 - در پژوهش انجام گرفته، مقدار قطر بهینه به ازای طول‌های مختلف بستر، در محدوده $0.3-0.5mm$ به دست آمد.
 - با توجه به معیارهای کنترل چرخه، COP سیستم تحت تأثیر اندازه ذرات جاذب و طول بستر نیست.
 - در نهایت، تأثیر طول بستر ($20-60mm$) و دمای منبع گرم ($-70-100^{\circ}C$) بر عملکرد بستر مستطیلی شکل با ابعاد $FP=6mm$ و $FH=14mm$ بررسی شد. نتایج نشان داد:

 - در بسترهای با طول نسبتاً کوتاه در مقایسه با بسترهای نسبتاً بلند، تأثیر افزایش دمای منبع گرم در بهبود SCP قابل توجه‌تر است.

5- فهرست عالیم

طول بستر جاذب (m)	BL
ارتفاع فین (m)	FH
گام فین (m)	FP
فشار (Pa)	P
دما (K)	T
دمای منبع گرم (K) یا ($^{\circ}C$)	TH
سرعت ($m s^{-1}$)	u
مقادیر مبرد جذب شده در واحد جرم جاذب (kg/kg_b)	w
مقدار جذب تعادلی (kg/kg_b)	w^*
عالیم یونانی	
تخلخل	ε
لرجت دینامیکی ($kg m^{-1}s^{-1}$)	μ
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ
زیرنویس‌ها	
بستر جاذب	b
کanal فلزی	$chan$
سطح کنترل	cs
حجم کنترل	cv

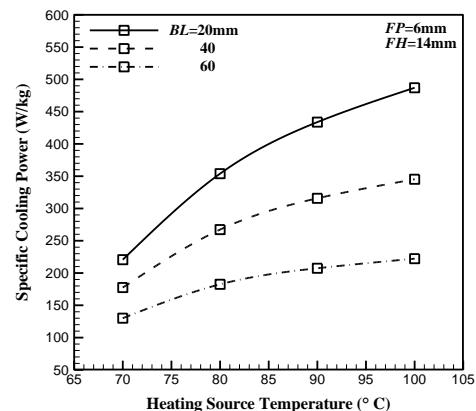


Fig. 12 Variations of specific cooling power with heating source temperature for different rectangular bed lengths

شکل 12 تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب دمای منبع گرم در طول‌های مختلف بستر مستطیلی

سیستم از $220W/kg$ تا $487W/kg$ (121% افزایش) بهبود یافته است. حالیکه این بهبود برای بستری به طول $60mm$ از $130W/kg$ به $222W/kg$ (71% افزایش) می‌باشد.

شایان ذکر است، از آنجا که هدف و تمرکز اصلی این مقاله، بررسی تأثیر طول بستر یا به عبارت دیگر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای بر پارامترهای عملکردی چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت است و همچنین در بخش 1-3 نشان داده شد که تغییر طول بستر بر پارامتر ضریب عملکرد تقریباً بی‌تأثیر است، لذا در این بخش از مطالعه COP صرف نظر شده است.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، با استفاده از مدل انتقال گرما و جرم، بستر جاذب یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت فین دار به صورت سه‌بعدی و به روش مقایسه‌ای از منظر مقاومت انتقال جرم برون ذرهای، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترهای جاذب شامل فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان انجام گرفت. بر این اساس، تأثیر طول‌های مختلف بستر ($20-60mm$) بر پارامترهای عملکردی توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد سیستم به ازای ارتفاع و عرض‌های مختلف بستر (ارتفاع فین $8-20mm$ و گام فین $12-3$) ارزیابی شد. نتایج نشان داد:

- افزایش طول بستر جاذب افزایش مقاومت انتقال جرم برون ذرهای در بین ذرات جاذب بستر می‌شود ولی مادامی که ارتفاع و عرض بستر (یا ارتفاع و گام فین) ثابت بماند، افزایش طول بستر تأثیری بر مقاومت گرمایی درون بستر نمی‌گذارد. از این رو، افزایش طول بستر بر پارامتر COP تقریباً بی‌تأثیر است ولی منجر به افزایش زمان چرخه و کاهش SCP سیستم می‌گردد.
- در بسترهای با ضخامت عرضی نسبتاً کوچک در مقایسه با بسترهای نسبتاً عریض، تأثیر افزایش طول بستر بر کاهش SCP سیستم قابل توجه‌تر است. علاوه، در بسترهای با طول نسبتاً کوتاه در مقایسه با بسترهای نسبتاً بلند، تأثیر افزایش ضخامت عرضی بستر بر کاهش SCP سیستم نیز محسوس‌تر است.

cylindrical adsorbent bed during the adsorption process, *Applied Energy*, Vol. 142, pp. 115-124, 2015.

- [12] S. B. Golparvar, M. Mohammadzadeh Kowsari, H. Niazmand, Performance study of adsorption cooling system driven by waste heats of heavy trucks diesel engine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 281-292, 2016. (in Persian [فارسی](#))
- [13] S. B. Golparvar, M. Mohammadzadeh Kowsari, H. Niazmand, Optimization of longitudinal finned-tube adsorber bed in an exhaust waste heat driven adsorption cooling system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 767-778, 2016. (in Persian [فارسی](#))
- [14] S. Santamaria, A. Sapienza, A. Frazzica, A. Freni, I. S. Girnik, Y. I. Aristov, Water adsorption dynamics on representative pieces of real adsorbers for adsorptive chillers, *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 11-19, 2014.
- [15] M. Mohammadzadeh Kowsari, S. B. Golparvar, H. Niazmand, Numerical investigation on the effect of flat-tube heat exchanger geometrical structure on the performance of adsorption chiller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 345-356, 2016. (in Persian [فارسی](#))
- [16] Y. I. Aristov, Adsorptive transformation of heat: principles of construction of adsorbents database, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 42, pp. 18-24, 2012.
- [17] H. Hassan, Energy analysis and performance evaluation of the adsorption refrigeration system, *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2013, 2013.
- [18] S. Sircar, J. Hufton, Why does the linear driving force model for adsorption kinetics work?, *Adsorption*, Vol. 6, No. 2, pp. 137-147, 2000.
- [19] B. B. Saha, A. Chakraborty, S. Koyama, Y. I. Aristov, A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1, pp. 516-524, 2009.
- [20] M. Tokarev, B. Okunev, M. Safonov, L. Kheifets, Y. I. Aristov, Approximation equations for describing the sorption equilibrium between water vapor and a CaCl₂-in-silica gel composite sorbent, *Zurnal fizicheskoi himii*, Vol. 79, No. 9, pp. 1490-1493, 2005.
- [21] D. A. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Fourth Edition, pp. 5-6, New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [22] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, *Transport phenomena*, Second Edition, pp. 797, New York: Wiley, 2002.
- [23] J.-Y. San, H.-C. Hsu, Performance of a multi-bed adsorption heat pump using SWS-IL composite adsorbent and water as the working pair, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 8, pp. 1606-1613, 2009.
- [24] H. Niazmand, H. Talebian, M. Mahdavikah, Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 243-252, 2013.

fin	فین
g	فاز گاز
p	ذرات جاذب

6- مراجع

- [1] Y. I. Aristov, Adsorptive transformation and storage of renewable heat: Review of current trends in adsorption dynamics, *Renewable Energy*, 2016.
- [2] L. Z. Zhang, L. Wang, Effects of coupled heat and mass transfers in adsorbent on the performance of a waste heat adsorption cooling unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 195-215, 1999.
- [3] J. Li, M. Kubota, F. Watanabe, N. Kobayashi, M. Hasatani, Optimal design of a fin-type silica gel tube module in the silica gel/water adsorption heat pump, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 37, No. 4, pp. 551-557, 2004.
- [4] K. Leong, Y. Liu, Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 16, pp. 2359-2374, 2004.
- [5] Y. Liu, K. Leong, The effect of operating conditions on the performance of zeolite/water adsorption cooling systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 10, pp. 1403-1418, 2005.
- [6] H. Demir, M. Mobedi, S. Ülkü, Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 372-377, 2009.
- [7] H. Niazmand, I. Dabzadeh, Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 3, pp. 581-593, 2012.
- [8] M. Mahdavikah, H. Niazmand, Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 939-949, 2013.
- [9] M. Mahdavikah, H. Niazmand, Numerical study of the importance of inter particle mass transfer resistance in the modeling of porous bed of adsorption chillers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 19-29, 2013. (in Persian [فارسی](#))
- [10] H. Niazmand, H. Talebian, M. Mahdavikah, Bed geometrical specifications effects on the performance of silica/water adsorption chillers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 8, pp. 2261-2274, 2012.
- [11] İ. Solmuş, C. Yamalı, C. Yıldırım, K. Bilen, Transient behavior of a