



## تأثیر مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای بر پارامترهای عملکردی یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت فین دار

میلاذ محمدزاده کوثری<sup>1</sup>، سید بهزاد گل‌پرور<sup>1</sup>، حمید نیازمند<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
\* مشهد، صندوق پستی 9177948944، niazmand@um.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 08 دی 1395  
پذیرش: 02 اسفند 1395  
ارائه در سایت: 14 فروردین 1396  
کلید واژگان:

### چکیده

در این پژوهش، به کمک مدل انتقال گرما و جرم، بستر جاذب یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت 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 بسترهای جاذب شامل فین‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان 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 (یا 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 بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای 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 بسترهای با طول نسبتاً کوتاه در مقایسه با بسترهای نسبتاً بلند، تأثیر افزایش دمای منبع گرم در بهبود توان سرمایش مخصوص سیستم قابل توجه‌تر است.

چیلر جذب سطحی  
بستر جاذب  
مقاومت برون‌ذره‌ای  
مدل‌سازی عددی

## 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.

### 1- مقدمه

خورندگی، قابلیت کارکرد در محدوده وسیعی از دمای منبع گرم بین 50°C تا 600°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<sup>2</sup> و

سیستم‌های تبرید جذب سطحی<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> SCP: Specific cooling power

<sup>1</sup> Adsorption cooling systems

### Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 گرما می‌شود. مدت زمان جذب نیز با افزایش تخلخل، افزایش می‌یابد که می‌توان نتیجه گرفت مقاومت انتقال گرما 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. مدل‌سازی بستر جذب 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 جذب 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. مهدوی‌خواه و نیازمند [8] در مطالعه‌ی مشابه با استفاده از جفت سیلیکاژل SWS-1L-آب در یک مدل‌سازی 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 یکنواخت یا غیریکنواخت درون بستر جذب ارائه نمودند [9]. نیازمند و همکاران [10] در ادامه‌ی مطالعات خود، به منظور شناسایی شکل هندسی مناسب‌تر فین، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای هندسی جامع با مشخصه 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 جذب استوانه‌ای بدون فین در طول فرایند جذب پرداختند. نتایج نشان داد که مدت زمان فرایند جذب، بیشتر از مقاومت‌های انتقال جرم به مقاومت‌های انتقال گرما 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.

گل‌پرور و همکاران [12] در پژوهش خود عملکرد دو سیستم تبرید جذب سطحی با منابع حرارت اتلافی موتور شامل سیستم‌های آگزوزی و آب رادیاتور را مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که سیستم آگزوزی 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 آگزوز 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 جذب بر عملکرد سیستم، محدوده قطر 0.3-0.4mm مناسب‌ترین قطر برای بستر مورد بررسی که حاوی ذرات زئولیت 13X است، می‌باشد.

با توجه به پژوهش‌های بیان شده، مشخصات هندسی مبدل 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<sup>8</sup> هستند که از سطوح انتقال گرمایی زیادی برخوردارند و از آنجا که انتقال گرما نقشی اساسی در فرایندهای جذب و

ضریب عملکرد<sup>1</sup> نسبتاً پایین به دلیل انتقال گرما و انتقال جرم نسبتاً ضعیف درون بسترهای جذب<sup>2</sup> است که منجر به حجیم‌تر شدن این سیستم‌ها می‌شود [1]. استفاده از سطوح گسترش‌یافته و بسترهای نوع پوشش‌داده‌شده<sup>3</sup> از جمله روش‌هایی موثر در جهت بهبود سرعت فرایندهای انتقال گرما و جرم درون بستر می‌باشند. 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 سیستم انجام گیرد. با توجه به کثرت این پارامترها، طراحی و بررسی عملکرد چیلرهای جذب سطحی معمولاً به صورت مدل‌سازی عددی انجام می‌پذیرد. مدل‌های پیشنهادشده در زمینه‌ی طراحی عددی چیلرهای جذب سطحی را می‌توان از نظر دقت و پیچیدگی مدل‌سازی جزئیات فرایندهای انتقال گرما و انتقال جرم سیستم، به ترتیب به سه دسته کلی شامل مدل ترمودینامیکی، مدل پارامترهای متمرکز و مدل پارامترهای توزیع‌شده (مدل انتقال گرما و انتقال جرم) تقسیم نمود. از آنجا که در این مقاله از مدل انتقال گرما و جرم برای مدل‌سازی عددی یک چیلر جذب سطحی با نوع خاصی از مبدل بستر جذب استفاده شده است، لذا در ادامه به برخی از مطالعات انجام گرفته در حوزه‌ی مدل‌های انتقال گرما و جرم اشاره می‌شود.

ژانگ و وانگ [2] در یک مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن مقاومت‌های انتقال جرم درون‌ذره‌ای<sup>4</sup> و برون‌ذره‌ای<sup>5</sup> به شبیه‌سازی لوله‌ی دوتایی استوانه‌ای دارای فین‌های شعاعی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از جفت زئولیت 13X-آب، تأثیر پیکربندی بستر جذب شامل ابعاد بستر، تعداد فین‌ها و نفوذپذیری<sup>6</sup> 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 درون‌ذره‌ای می‌تواند به عنوان یک عامل محدودکننده‌ی 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 بهینه می‌تواند مقدار سرمایش تولیدی را تا دو برابر مقدار آن در 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<sup>7</sup> بستر بعلاوه‌ی قطر ذرات جذب زئولیت 13X پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، در عین حال که قطر ذرات جذب 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 اواپراتور، 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 جذب حلقوی بدون فین پرداختند. در این مطالعه، از مقادیر مختلف تخلخل برای بستر

<sup>1</sup> COP: Coefficient of performance

<sup>2</sup> Adsorbent bed

<sup>3</sup> Coated type adsorbents

<sup>4</sup> Intra-particle resistance

<sup>5</sup> Inter-particle resistance

<sup>6</sup> Permeability

<sup>7</sup> Porosity

<sup>8</sup> Flat-tube heat exchanger

سیال کاری) می‌شود. قابل ذکر است که مبدل جذب سطحی در یک محفظه<sup>1</sup> قرار می‌گیرد و بخارهای میرد در آن جمع می‌گردد. به منظور مدل‌سازی عددی یک چرخه‌ی جذب سطحی ابتدا لازم است که هندسه‌ی مناسب مبدل گرمایی براساس هندسه واقعی شبیه‌سازی 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 محدوده‌ی حل عددی در نظر گرفته شده است (شکل 1). سپس می‌بایست معادلات انتقال جرم و انتقال حرارت سیال حامل انرژی، کانال فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال جرم و انتقال جرم مربوط به مواد جذب و سیال میرد به صورت همزمان حل شوند. به جزئیات روش و الگوریتم حل عددی مسئله در مرجع [15] 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 1).

## 2-1- فرضیات مدل‌سازی

در این پژوهش از فرضیات زیر استفاده شده است [7-10]:

- 1- سیال عامل در فاز جذب‌شده به صورت مایع و در فاز احیاءشده به صورت گاز کامل در نظر گرفته شده است.
- 2- تمامی ذرات جذب‌کروی شکل بوده و دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند و به صورت یکنواخت در بستر توزیع شده‌اند.
- 3- بین ذرات جذب، سیال عامل جذب‌شده و بخار احیاءشده تعادل دمایی وجود دارد.
- 4- به استثنای چگالی بخار میرد، سایر خواص میرد، خواص سیال ناقل گرما، کانال فلزی، فین‌ها و مواد جذب ثابت در نظر گرفته شده است.
- 5- فشار ترمودینامیکی و دمای محفظه‌ی حاوی بستر جذب نسبت به مکان یکنواخت و نسبت به زمان متغیر فرض شده است. در حالیکه فشار و دمای بستر جذب تابعی از مکان و زمان در نظر گرفته شده است.

## 2-2- معادلات حاکم

بر اساس فرضیات بیان شده، معادلات انتقال گرمای مربوط به حوزه‌های سیال حامل انرژی، کانال فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال جرم و انتقال جرم مربوط به مواد جذب و سیال میرد باید به صورت همزمان حل

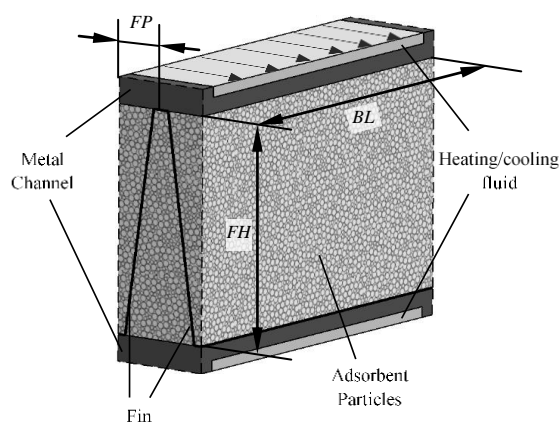


Fig. 1 Schematic of numerical solution domain in trapezoidal beds

شکل 1 شماتیکی از محدوده حل عددی در بسترهای دوزنقه‌ای

<sup>1</sup> Chamber

احیای میرد درون بستر را ایفا می‌کند، لذا استفاده از آن‌ها به عنوان مبدل‌های جذب سطحی قابل توجه است. سانتاماریا و همکاران [14] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی رفتار دینامیکی یک چیلر جذب سطحی دارای مبدل صفحه-تخت با فین‌های دوزنقه‌ای و مقایسه‌ی آن با یک مبدل ایده‌آل شامل دانه‌های جاذب آزاد قرارگرفته بر روی یک صفحه‌ی فلزی تحت فرایندهای فشار ثابت پرداختند. جفت‌کاری استفاده شده در پژوهش آن‌ها زئولیت AQSOA FAM Z02-آب بود. نتایج آن‌ها نشان داد که برای ذرات جاذب با قطر 0.3 تا 0.7 میلی‌متر رفتار دینامیکی تنها تابعی از نسبت سطوح انتقال گرما به جرم مواد جاذب است، درحالیکه برای ذرات با اندازه‌ی خیلی کوچک یا خیلی بزرگ به ترتیب مقاومت‌های انتقال جرم برون‌ذره‌ای و درون‌ذره‌ای 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 50-66% توان سرمایش مخصوص مبدل ایده‌آل را داراست.

محمدزاده و همکاران [15] به صورت عددی به بررسی تأثیر ساختار هندسی بسترهای 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 بسترهای جاذب شامل فین‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای، به بررسی تأثیر ارتفاع و گام فین (به ترتیب در محدوده 8-20mm و 3-12mm) بر عملکرد بسترها پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد، در گام فین 3mm، ارتفاع فین 14-20mm و طول بستر ثابت 20mm، توان سرمایش مخصوص بسترهای مستطیلی شکل حدوداً 5% و 17% به ترتیب به ازای ارتفاع فین 14mm و 20mm بهتر از بسترهای دوزنقه‌ای 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 بُعد 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، بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای با مشخصه‌های جرمی و طولی یکسان در نظر گرفته شده و از منظر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای، 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. در این پژوهش، با استفاده از جفت‌کاری سیلیکاژل SWS-1L-آب، از یک مدل سه‌بعدی و با در نظر گرفتن فرایندهای انتقال گرما و هر دو نوع مقاومت انتقال جرم درون‌ذره‌ای و برون‌ذره‌ای برای مدل‌سازی بسترهای جاذب استفاده شده است.

## 2- 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 میرد

جدول 2 روابط تقریبی برای محاسبه‌ی میزان جذب تعادلی در بازه‌های مختلف  $\Delta F$  [20]

Table 2 Approximation equations for calculating  $w^*$  in different  $\Delta F$  ranges [20]

$\Delta F$ (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 داری با روابط (11,10) محاسبه می‌شود [21]:

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

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

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

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

با حل معادله‌ی (12) یا به عبارت دیگر با فرض عدم یکنواختی فشار بستر، در واقع مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای 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 معادله‌ی (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:

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

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

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

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

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

که  $L_v$  گرمای نهان تبخیر آب در دمای اواپراتور 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، کانال فلزی و فین‌ها به همراه شرایط اولیه و مرزی آن‌ها به علاوه‌ی روش مدل‌سازی محفظه به طور کامل در مرجع [15] بیان گردیده است، لذا در این مقاله تنها به بیان معادلات حاکم بستر جذب که مهم‌ترین جزء چیلر جذب سطحی است، پرداخته می‌شود.

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

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

$\rho C_p$  ظرفیت گرمایش کلی بستر و  $\Delta H$  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 جذب/جذب‌شونده [16] و  $\varepsilon_t$  و  $\rho_b$  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 محرکه‌ی خطی<sup>1</sup> 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  $\Delta H$  براساس تئوری پتانسیل پلانی<sup>2</sup> برای جفت کاری سیلیکاژل SWS-1L-آب محاسبه می‌شوند [20]. بدین صورت که ابتدا مقدار پتانسیل جذب پلانی ( $\Delta F$ ) از رابطه‌ی (7) با استفاده از فشار بستر و فشار اشباع متناظر در دمای بستر ( $P_{sat}$ ) محاسبه شده و سپس با توجه به بازه‌ی  $\Delta F$ ، معادله‌ی مربوط به تعیین میزان جذب تعادلی بر حسب (mol/mol) از جدول 2 تعیین می‌شود. برای محاسبه‌ی  $\Delta H$  بر اساس دما و فشار بستر جذب 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  $L_v = 43450$  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 جذب سیلیکاژل SWS-1L [16]

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

<sup>1</sup> LDF: Linear driving force model

<sup>2</sup> Polanyi potential theory

طولانی‌تر شود و در نتیجه‌ی این امر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای 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 گرمی 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 (با 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)، 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 برون‌ذره‌ای درون بستر افزایش می‌یابد.

شکل 3، تأثیر عرض و طول بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل با ارتفاع فین 14mm را بر پارامتر توان سرمایه‌ی مخصوص نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد، افزایش جرم مواد جاذب در جهت‌های طولی و عرضی بستر به ترتیب باعث افزایش مقاومت‌های انتقال جرم برون‌ذره‌ای و گرمایی درون بستر و به تبع آن، افزایش زمان چرخه می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش جرم جاذب، مقدار میرد در چرخش در هر چرخه و در نتیجه میزان سرمایه‌ی 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 برون‌ذره‌ای مربوط دانست. تأثیرپذیری SCP نسبت به تغییرات طول بستر به میزان انرژی سرمایه‌ی کل تولیدی نیز بستگی دارد. برای تحلیل بهتر این موضوع، شکل 4 که بیانگر تأثیر عرض و طول بستر بر میزان انرژی سرمایه‌ی کل تولیدی در اواپراتور یک چیلر جذب سطحی است به تصویر کشیده شده است. شایان ذکر است که انرژی سرمایه‌ی کل به میزان جرم جاذب استفاده‌شده در بستر بستگی دارد. در شکل 4، میزان انرژی سرمایه‌ی کل تولیدی به ازای هر ابعاد مشخص از هر یک از بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای یکسان می‌باشد. با توجه به شکل 4، در هر طول مشخص بستر، با افزایش گام فین و به سبب آن، افزایش خطی جرم مواد جاذب، سرمایه‌ی تولیدی نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش خطی طول بستر در هر گام فین مشخص نیز افزایش انرژی سرمایه‌ی 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 کندانسور و اواپراتور 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 (18,19) به ترتیب برای مراحل احیا و جذب فشار ثابت محاسبه می‌شود [24,10,8]:

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

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

که  $w_{\min}^*$  میزان جذب تعادلی کمینه در فشار کندانسور و دمای گرمایش سیال ناقل گرما و  $w_{\max}^*$  میزان جذب تعادلی بیشینه در فشار اواپراتور و دمای سرمایش سیال ناقل گرما می‌باشد.

### 3- نتایج

در این بخش، بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای با مشخصه‌های گرمی و طولی یکسان در نظر گرفته شده‌اند و از منظر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای، تأثیر طول بستر بر عملکرد سیستم به ازای ارتفاع و گام‌های فین مختلف ارزیابی شده است. علاوه بر تأثیر طول بستر به ازای قطر ذرات جاذب و همچنین دماهای 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 اعتبارسنجی مدل عددی ارائه‌شده، در مرجع [15] بیان گردیده است.

### 3-1- تأثیر مقاومت برون‌ذره‌ای بر پارامترهای عملکردی بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل

به منظور بررسی تأثیر عرض و طول بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل (با مشخصه‌های گرمی 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 عامل 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 دوزنقه‌ای شکل	$Angle$	82	degree
دبی جرمی سیال حامل انرژی	$\dot{m}_f$	0.01	kg/s
قطر ذرات جاذب استفاده شده در بخش 1-3 و بخش 3-3	$d_p$	0.3	mm
تخلخل ذرات	$\epsilon_p$	0.52	-
تخلخل بستر	$\epsilon_b$	0.36	-
ضریب انتقال گرمای هدایت معادل بستر	$k_b$	0.2	W/m.K
چگالی ذرات جاذب بستر	$\rho_p$	1037	kg/m <sup>3</sup>
فشار اواپراتور	$P_{evap}$	1280	Pa
فشار کندانسور	$P_{cond}$	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 سرمایه‌ش کل، تأثیر محسوس‌تری بر کاهش *SCP* سیستم می‌گذارد. بطوریکه با توجه به شکل 3، در یک بستر مستطیلی شکل با  $FH=14\text{mm}$  و  $FP=3\text{mm}$ ، به ازای افزایش طول بستر از 20mm تا 60mm، توان سرمایه‌ش مخصوص سیستم از 822W/kg به 257W/kg (کاهش 69%) کاهش یافته است. در حالیکه این کاهش برای  $FP=12\text{mm}$ ، از 207W/kg به 141W/kg (کاهش 32%) می‌باشد. نتیجه‌ی مشهود دیگر از شکل 3 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 سرمایه‌ش کل تولیدی توجیه می‌شود. با توجه به شکل 4، در طول‌های کوتاه‌تر بستر در مقایسه با طول‌های بلندتر، میزان افزایش انرژی سرمایه‌ش 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 سرمایه‌ش کل تولیدی، تأثیر قابل توجه‌تری بر کاهش *SCP* سیستم دارد. بطوریکه با توجه به شکل 3، در یک بستر مستطیلی شکل با  $FH=14\text{mm}$  و  $BL=20\text{mm}$ ، به ازای افزایش گام فین از 3mm تا 12mm، توان سرمایه‌ش مخصوص سیستم از 822W/kg به 207W/kg (کاهش 75%) کاهش یافته است. در حالیکه این کاهش برای  $BL=60\text{mm}$ ، از 257W/kg به 141W/kg (کاهش 45%) می‌باشد.

با توجه به شکل 3 مشاهده می‌شود که در گام فین 3mm، توان سرمایه‌ش مخصوص بسترهای مستطیلی تا حدودی بهتر از بسترهای دوزنقه‌ای شکل است و در گام‌های دیگر فین، *SCP*، دو بستر تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. در مرجع [15] دلیل اختلاف بین *SCP* بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای که در ابعاد هندسی معینی از بسترها به وجود می‌آید، بیان گردیده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که با افزایش طول بستر از 20mm تا 60mm در  $FP=3\text{mm}$ ، اختلاف بین توان سرمایه‌ش مخصوص دو بستر از 42W/kg به 5W/kg کاهش یافته است. از طرف دیگر، چنانچه اختلافی بین زمان چرخه‌ی بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل وجود داشته باشد، با افزایش طول بستر میزان این اختلاف تقریباً ثابت می‌ماند (شکل 2). تنها عامل ایجاد اختلاف بین *SCP* بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای 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 دوزنقه‌ای می‌گذارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول بستر، اهمیت شکل هندسی بستر بر پارامتر عملکردی توان سرمایه‌ش مخصوص سیستم کمتر می‌شود.

برای بررسی تأثیر ارتفاع و طول بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای بر زمان چرخه، بسترهای جاذب با گام فین 3mm در نظر گرفته شده‌اند و نتایج این بررسی در شکل 5 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 یا طول بستر، مقاومت گرمایی یا برون‌ذره‌ای و به تبع آن زمان چرخه افزایش می‌یابد، هرچند که *SCP* افت می‌کند (شکل 6). با توجه به شکل‌های 5 و 6، مجدداً مشاهده می‌شود که مشابه شکل‌های 2 و 3، با افزایش طول بستر در عین حال که اختلاف بین زمان چرخه‌ی بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل در گام فین 3mm و ارتفاع‌های فین 14mm و 20mm، تقریباً ثابت می‌ماند ولی

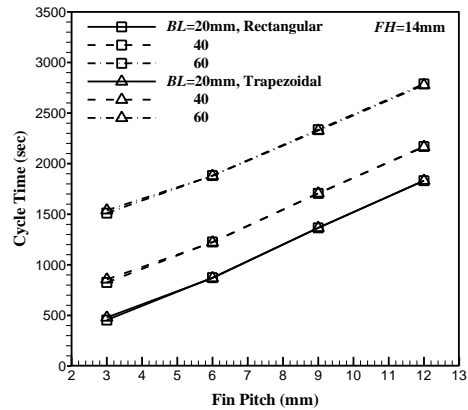


Fig. 2 Variations of cycle time with fin pitch for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

شکل 2 تغییرات زمان چرخه بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای

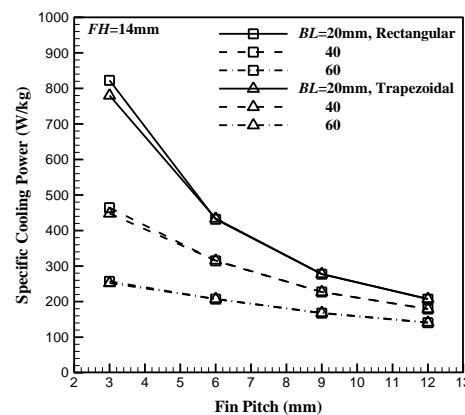


Fig. 3 Variations of specific cooling power with fin pitch for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

شکل 3 تغییرات توان سرمایه‌ش مخصوص بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای

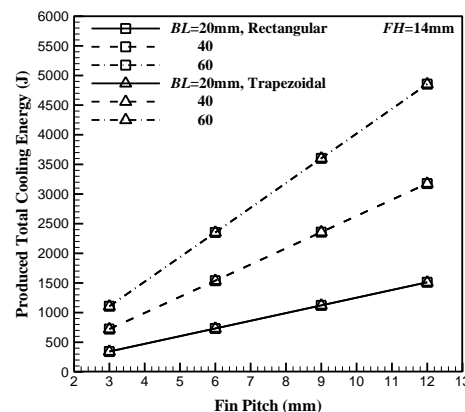


Fig. 4 Variations of produced total cooling energy with fin pitch for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

شکل 4 تغییرات انرژی سرمایه‌ش کل تولیدی بر حسب گام فین در طول‌های بستر مختلف برای بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای

گام‌های کوچکتر فین در مقایسه با گام‌های بزرگتر فین مقدار جرم جاذب بستر کمتر است، میزان افزایش سرمایه‌ش 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 دوزنقه‌ای شکل با طول ثابت 20mm نشان داده شده است. از آنجا که برای مقایسه عملکرد بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای 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 بسترها تقریباً یکسان بوده و بنابراین  $COP$  بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای به ازای تمامی 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 می‌یابند. بدیهی است که افزایش انرژی سرمایشی موجب تقویت  $COP$  و افزایش انرژی گرمایی باعث تضعیف  $COP$  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 تولیدشده 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 جذب‌شده در ذرات جاذب باید به بستر داده شود. بدیهی 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) نسبت به گرمای محسوس انتقالی به سیستم (گرمای هدر رفته) به طور جزئی افزایش می‌یابد و به سبب آن،  $COP$  سیستم نیز با توجه به شکل 7 به صورت جزئی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است از آنجا که در هر ارتفاع، عرض و طول مشخص از بسترهای جاذب مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل، جرم فلز فین‌های مستطیلی شکل به مقداری جزئی بیشتر از جرم فلز فین‌های دوزنقه‌ای است، لذا سهم گرمای هدر رفته در بسترهای مستطیلی بیشتر از بسترهای دوزنقه‌ای است و از این رو با توجه به شکل 7،  $COP$  بسترهای مستطیلی به صورت جزئی کمتر از  $COP$  بسترهای دوزنقه‌ای می‌باشد.

چنانچه 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 محاسبه ضریب عملکرد وارد نمی‌شود، بنابراین تغییر طول بستر تأثیری بر ضریب عملکرد بسترهای مبدل مدل 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  $SCP$  بسترها کم می‌شود. بطوریکه با توجه به شکل 6، در بستری با  $FP=3mm$  و  $FH=20mm$ ، به ازای افزایش طول بستر از 20mm تا 60mm، اختلاف توان سرمایش مخصوص بین بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای از 115W/kg به 13W/kg کاهش یافته است.

با توجه به نتایج بررسی شده، افزایش ارتفاع یا عرض بستر (ارتفاع یا گام فین) منجر به افزایش مقاومت انتقال گرما و از طرف دیگر افزایش طول بستر باعث افزایش مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای می‌شود. افزایش مقاومت‌های انتقال منجر به افزایش زمان چرخه می‌گردند. از طرف دیگر، با افزایش جرم جاذب میزان سرمایش کل تولید شده نیز افزایش می‌یابد. هرچند، این افزایش به میزانی نیست که اثرات کاهش‌ی افزایش جرم و زمان چرخه بر  $SCP$  را جبران کند. همچنین مشخص شد که در صورت وجود اختلاف بین  $SCP$  بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای 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،

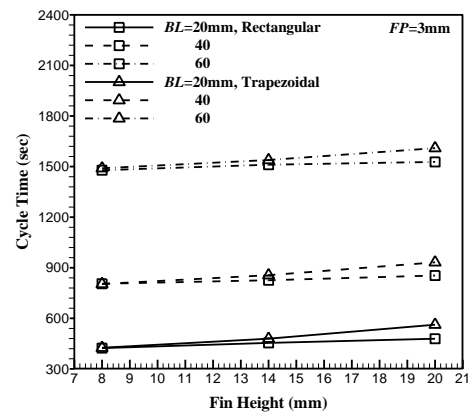


Fig. 5 Variations of cycle time with fin height for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

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

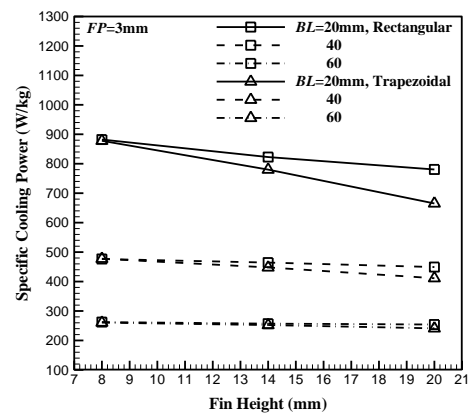


Fig. 6 Variations of specific cooling power with fin height for different bed lengths in rectangular and trapezoidal beds

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

به این هندسه با تقریب خوبی به بسترهای دوزنقه‌ای 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 درون ذره‌ای یاد می‌شود. از سوی دیگر در اثر افزایش قطر، نفوذپذیری بستر افزایش می‌یابد (رابطه 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 درون ذره‌ای و برون ذره‌ای می‌شود. کاهش قطر ذرات تأثیر معکوسی بر فرایندهای انتقال جرم دارد، بطوریکه با کاهش نفوذپذیری بستر و افزایش مقاومت بین ذره‌ای، گرادیان فشار در طول بستر افزایش می‌یابد، هرچند که مقاومت درون ذره‌ای کاهش می‌یابد [24]. از آنجا که با تغییر قطر ذرات جاذب، مقاومت‌های درون ذره‌ای و بین ذره‌ای همزمان و در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند، لذا انتظار می‌رود در هر بستر با هندسه و شرایط عملکردی مشخص، برآیند 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 SCP 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 وابسته نبوده و در نتیجه COP تغییر نمی‌کند. برای بستری 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 0.2mm تا 0.9mm 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 برآیند مقاومت‌های انتقال جرم درون ذره‌ای و برون ذره‌ای است. با کاهش و یا افزایش قطر ذرات از مقدار بهینه، زمان چرخه به ترتیب به علت افزایش نسبی مقاومت بین ذره‌ای و یا مقاومت درون ذره‌ای 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 اواپراتور به ازای تغییر قطر ذرات (با توجه به معیارهای کنترل چرخه) تقریباً ثابت می‌ماند، لذا حداکثر 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 درون ذره‌ای تأثیر نمی‌گذارد، اما با افزایش طول بستر مسیر عبور سیال مبرد از میان ذرات جاذب طولانی‌تر شده و در نتیجه مقاومت بین ذره‌ای افزایش می‌یابد که منجر به افزایش زمان چرخه و در نتیجه کاهش SCP می‌شود. از آنجا که افزایش طول بستر در جهت تقویت مقاومت برون ذره‌ای است و در قطر ذرات جاذب کوچکتر، نقش مقاومت برون ذره‌ای به مراتب بیشتر از مقاومت درون ذره‌ای است، لذا در ذرات با قطر کوچکتر تغییرات زمان چرخه و

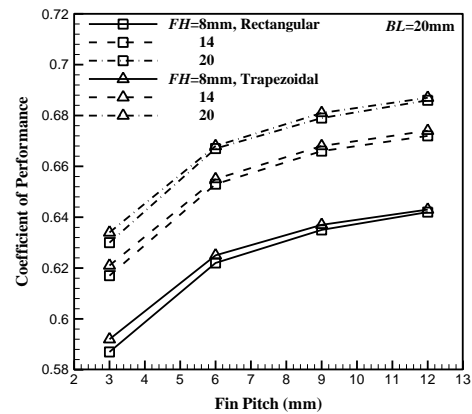


Fig. 7 Variations of coefficient of performance with fin pitch for different fin heights in rectangular and trapezoidal beds

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

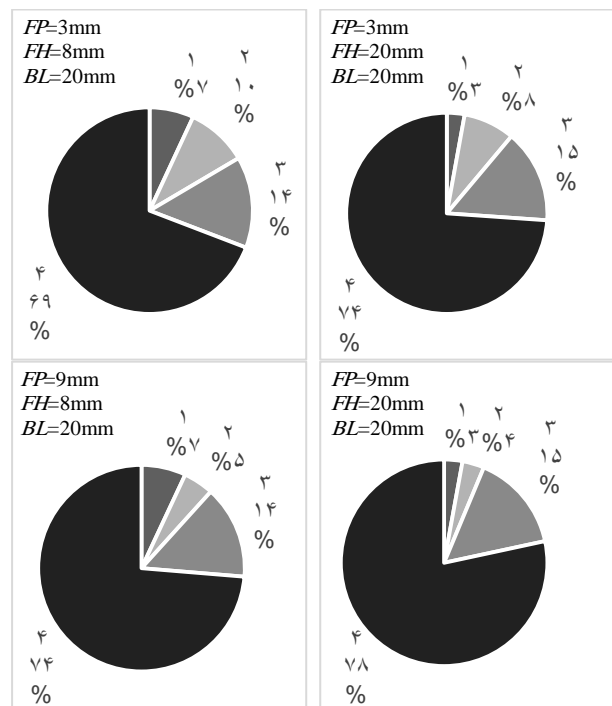


Fig. 8 Distribution of the supplied thermal energy between different parts of the heat exchanger with rectangular bed including: 1) metal channel, 2) fin, 3) adsorbent bed, 4) desorption heat

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 رفته) تقریباً ثابت می‌ماند. از این رو با افزایش طول بستر، COP تقریباً ثابت می‌ماند و در نتیجه بسترهای با طول 40mm و 60mm نیز رفتار نسبتاً مشابهی با بسترهای به طول 20mm (شکل 7) خواهند داشت.

### 3-2- تأثیر مقاومت برون ذره‌ای بر قطر بهینه ذرات جاذب

در این بخش، به منظور بررسی تأثیر مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای 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 بسترهای دوزنقه‌ای 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 میرد بیاندازیم. بدین منظور، نمودار میزان جذب میانگین سیال میرد بر حسب زمان چرخه به ازای دماهای مختلف منبع گرم برای یک بستر جاذب نمونه با ابعاد  $FP=6\text{mm}$ ،  $FH=14\text{mm}$  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 حداکثری ( $W_{max}$ ) به صورت جزئی و مقدار جذب حداقلی ( $W_{min}$ ) به صورت محسوس‌تر کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش دمای آب گرم ورودی، اختلاف بین مقدارهای جذب حداقلی و حداکثری بیشتر می‌شود که بدان معناست که جرم میرد در چرخش در هر چرخه و به تبع آن، انرژی سرمایشی کل تولیدشده در سیستم افزایش می‌یابد. شایان ذکر است، نرخ جذب میرد 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 برون‌ذره‌ای 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 بسترهای با طول کوتاه‌تر محسوس‌تر است. افزایش دمای منبع گرم، منجر به بهبود فرایند انتقال گرما در حین فرایند احیا می‌شود. حال چنانچه مقاومت برون‌ذره‌ای نسبتاً کم باشد، این بهبود تأثیر قابل توجه‌تری بر افزایش SCP می‌گذارد. با توجه به شکل 12 و توضیحات بیان‌شده، در بستری با  $FP=6\text{mm}$ ،  $FH=14\text{mm}$  و  $BL=20\text{mm}$ ، به ازای افزایش دمای منبع گرم از 70°C تا 100°C، توان سرمایش مخصوص

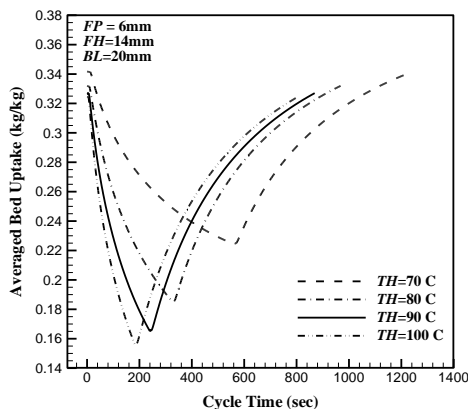


Fig. 11 Variations of averaged bed uptake with cycle time for different heating source temperature in rectangular bed

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

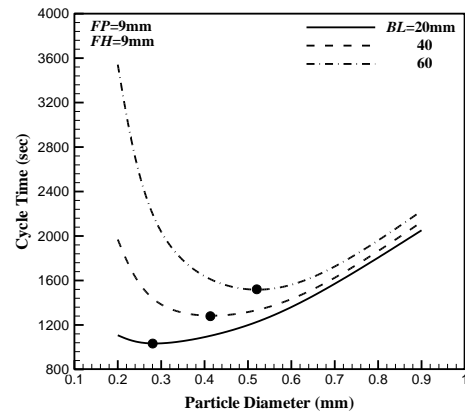


Fig. 9 Variations of cycle time with particle diameter for different rectangular bed lengths

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

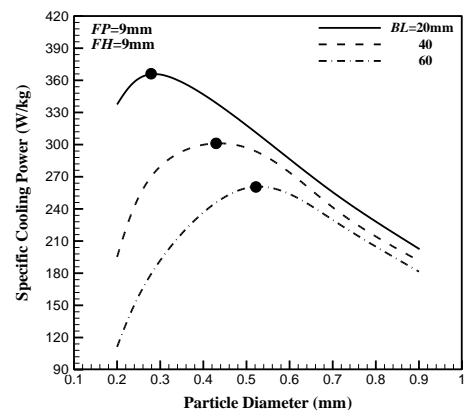


Fig. 10 Variations of specific cooling power with particle diameter for different rectangular bed lengths

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 337W/kg به 111W/kg (کاهش 67%) کاهش یافته است. در حالیکه این کاهش برای ذرات جاذب با قطر 0.9mm، از 196W/kg به 181W/kg (کاهش 8%) می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که در شکل‌های 9 و 10 مشاهده می‌شود، در هر بستر با ابعاد مشخص، با افزایش طول بستر غلبه مقاومت درون‌ذره‌ای بر برون‌ذره‌ای 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 0.3-0.5mm با نتایج آزمایشگاهی سانتاماریا و همکاران [14] که از بسترهای دوزنقه‌ای شکل با گام فین نسبتاً کوچک (در حدود 2mm) استفاده نمودند، همخوانی دارد.

### 3-3- تأثیر مقاومت برون‌ذره‌ای و دمای منبع گرم بر عملکرد سیستم

به منظور بررسی همزمان تأثیر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای و دمای منبع گرم بر عملکرد سیستم، فقط بسترهای مستطیلی شکل با ارتفاع 14mm، گام فین 6mm و طول‌های 20mm الی 60mm به عنوان بسترهای نمونه انتخاب

• افزایش طول بستر منجر به کاهش اختلاف  $SCP$  بین بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل در ابعاد  $FP=3mm$  و  $FH=14, 20mm$  می‌شود. در گام و ارتفاع‌های دیگر بستر که  $SCP$  بسترهای مستطیلی و دوزنقه‌ای تقریباً مشابه یکدیگر است، افزایش طول بستر منجر به ایجاد اختلاف بین  $SCP$  دو آرایش هندسی متفاوت از بسترها 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 برون‌ذره‌ای بر افزایش زمان چرخه و کاهش  $SCP$  سیستم در قطر ذرات نسبتاً کوچک در مقایسه با ذرات نسبتاً بزرگ به مراتب 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 منابع گرم (70-100°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 علائم

$BL$	طول بستر جاذب (m)
$FH$	ارتفاع فین (m)
$FP$	گام فین (m)
$P$	فشار (Pa)
$T$	دما (K)
$TH$	دمای منبع گرم (K) یا (°C)
$u$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$w$	مقدار میرد جذب شده در واحد جرم جاذب ( $kg/kg_b$ )
$w^*$	مقدار جذب تعادلی ( $kg/kg_b$ )

#### علائم یونانی

$\varepsilon$	تخلخل
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg\ m^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kg\ m^{-3}$ )

#### زیرنویس‌ها

$b$	بستر جاذب
$chan$	کانال فلزی
$cs$	سطح کنترل
$cv$	حجم کنترل

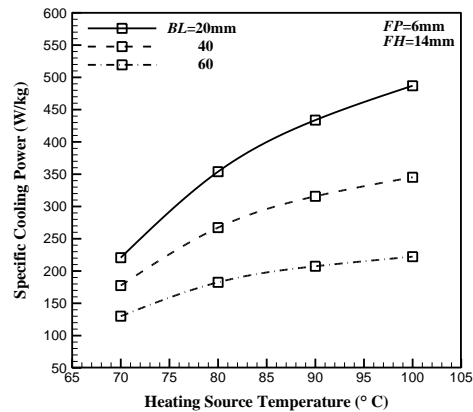


Fig. 12 Variations of specific cooling power with heating source temperature for different rectangular bed lengths

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

سیستم از 220W/kg تا 487W/kg (افزایش 121%) بهبود یافته است. در حالیکه این بهبود برای بستری به طول 60mm از 130W/kg تا 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 برون‌ذره‌ای 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  $COP$  صرف‌نظر 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 فین‌دار به صورت سه‌بعدی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی شد. به دنبال پژوهش پیشین، در ابتدا یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای از منظر مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترهای جاذب شامل فین‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای 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 3-12mm) ارزیابی شد. نتایج نشان داد:

- افزایش طول بستر موجب افزایش مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای 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. بعلاوه، 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. Girmik, Y. I. Aristov, Water adsorption dynamics on representative pieces of real adsorbents 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 CaCl<sub>2</sub>-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 CaCl<sub>2</sub>-in-silica gel composite sorbent, *Žurnal fizičeskoj 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-1L 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. Mahdavihah, Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 243-252, 2013.

فین	fin
فاز گاز	g
ذرات جاذب	p

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. Mahdavihah, 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. Mahdavihah, 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. Mahdavihah, 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. Yildırım, K. Bilen, Transient behavior of a