

بررسی عددی تأثیر ساختار هندسی مبدل گرمایی صفحه-تخت بر عملکرد چیلر جذب سطحی

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

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

*مشهد، صندوق پستی 9177948944

چکیده

در این پژوهش با استفاده از مدل پارامترهای توزیع شده، برای نخستین بار بستر جاذب یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت دارای فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای با جفت کاری سیلیکاژل SWS-1L-آب به صورت سه‌بعدی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی شده است. به منظور شناخت بهتر رفتار دینامیکی بستر، در ابتدا تأثیر برخی از پارامترهای مهم بر عملکرد سیستم از جمله تغییرات میانگین فشار، دما و جذب لحظه‌ای بستر بر حسب زمان چرخه بررسی شده است. در ادامه یک مطالعه مقایسه‌ای جامع با مشخصه‌ی جرمی و طولی برابر، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترهای جاذب با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای انجام گرفته است. بدین منظور توزیع دما، جذب لحظه‌ای و فشار درون بستر به همراه الگوهای جربان بخار مبرد در زمان اتمام فرایندهای گرمایشی چرخه بعلاوه تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای بر عملکرد سیستم ارزیابی شده است. در این بررسی در طول بستر ثابت 20mm، محدودی تغییرات ارتفاع فین 8-20mm و فاصله‌ی بین فین‌ها 3-12mm در نظر گرفته شده است. تتابع نشان داد، بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای به استثنای شرایطی که متوسط فاصله‌ی بین فین‌ها 3mm و ارتفاع فین‌ها 14 و 20mm است، مشابه یکدیگر می‌باشند و در مشخصات هندسی اشاره شده، توان سرمایش مخصوص (SCP) بسترهای مستطیلی تقریباً 5% و 17% (به ترتیب برای ارتفاع فین 14 و 20mm) بهتر از بسترهای ذوزنقه‌ای است. بیشترین و کمترین SCP چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت، به ترتیب 882 و 163 W/kg برای کوچکترین و بزرگترین حجم بستر و شرایط در نظر گرفته شده در این پژوهش به دست آمد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ مرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۰۴ آبان ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۸ آذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

چیلر جذب سطحی

بستر جاذب

مبدل صفحه-تخت

مدل‌سازی عددی

Numerical investigation on the effect of flat-tube heat exchanger geometrical structure on the performance of adsorption chiller

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 04 August 2016
Accepted 25 October 2016
Available Online 18 December 2016

Keywords:
Adsorption chiller
Adsorbent bed
Flat-tube heat exchanger
Numerical modeling

ABSTRACT

In the present study, for the first time, adsorbent bed of SWS-1L/water adsorption chiller with rectangular and trapezoidal finned flat-tube heat exchanger has been simulated three dimensionally based on the distributed parameters model and finite volume method. Effects of some important parameters on the chiller performance such as bed averaged pressure, temperature and uptake variations with cycle time have been examined for better understanding of bed dynamic behavior. Also, a comparative study between two different configurations of adsorbent bed including rectangular and trapezoidal fins has been conducted based on identical length and adsorbent mass. For this purpose, bed temperature, uptake and pressure distributions as well as the vapor flow patterns at the end of heating cycle phases and also effects of fin height and spacing on the system performance have been studied. In this investigation at fixed bed length of 20mm, fin height and spacing variations have been examined in the range of 8-20mm and 3-12mm, respectively. Results indicated that the system performance with rectangular and trapezoidal adsorbent beds are almost similar except for those conditions in which fin spacing is 3mm and fin height is 14, 20mm. For the mentioned dimensions, the specific cooling power (SCP) of rectangular beds is almost 5% and 17% (for fin heights of 14 and 20mm, respectively) better than those of trapezoidal beds. Maximum and minimum SCP of adsorption chiller with flat-tube heat exchanger were obtained about 882 and 163W/kg for the smallest and the largest bed geometry and operating conditions considered in this study.

افزایش روز افرون نیاز به انرژی و تغییرات آب و هوایی به وجود آمده در اثر

۱- مقدمه

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مقاومت‌های انتقال گرما و انتقال جرم لایه‌ی جاذب ناچیز می‌باشند ولی انتقال گرما و جرم بین بستر جاذب و محیط در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌های انتقال گرما و جرم با درنظر گرفتن مقاومت‌های انتقال از این ویژگی پرخوردارند که توزیع زمانی مناسبی از پارامترهای چون دما، فشار و جذب را در نقاط مختلف بستر ارائه دهند که از این رو دقیق‌ترین مدل در بین مدل‌های دیگر می‌باشند. به طور کلی این مدل‌ها در برگیرنده‌ی چهار معادله‌ی حاکم اصلی به صورت معادلات دیفرانسیلی جزئی شامل معادله موازنۀ انرژی، معادله بقای جرم، معادله مومنتم و معادله حالت می‌باشند. به سبب پیچیدگی معادلات کوپل شده‌ی انتقال گرما و جرم، به طور کلی امکان حل تحلیلی برای این معادلات وجود ندارد و روش‌های حل عددی تنها امکان جایگزین برای شبیه‌سازی بسترها جاذب می‌باشند، اگرچه زمان محاسبات عددی برای این مدل‌ها نسبتاً سنگین و قابل ملاحظه است [4,3]. از آنجا که در این مقاله از مدل پارامترهای توزیع شده برای مدل‌سازی عددی یک چیلر جذب سطحی با نوع خاصی از مدل بستر جاذب استفاده شده است، لذا در ادامه به برخی از مطالعات انجام گرفته در حوزه‌ی مدل‌های انتقال گرما و جرم اشاره می‌شود.

علم و همکاران [6] در یک مطالعه عددی، عملکرد یک سیستم تبرید جذب سطحی دو بستره بدون فین را با جفت کاری سیلیکاژل-آب بررسی نمودند. در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر زمان تعویضی بین بسترها بر عملکرد سیستم، یک عدد بی‌بعد به نام سامد تعویضی⁸ معرفی شد و به ازای چهار پارامتر مؤثر در طراحی مبدل گرمایی، مقدار بهینه‌ی آن ارائه شد. نتایج نشان داد که پیکربندی مبدل گرمایی تأثیر زیادی بر زمان چرخه‌ی سیستم دارد و چنانچه زمان چرخه فراتر از مقدار بهینه‌ی آن تنظیم شود، عملکرد سیستم دچار افت می‌شود.

لواجاری و همکاران [7] به بررسی تأثیر وجود و همچنین ابعاد فین‌های خارجی پیرامون بستر استوانه‌ای بر عملکرد یک سیستم تبرید جذب سطحی خورشیدی پرداختند. نتایج مشخص کرد، بستر دارای فین از دمای بیشینه‌ی بیشتر، قطر بهینه‌ی بزرگتر، جرم به گردش درآمدۀ قابل توجه‌تر و درنتیجه عملکرد بهتری نسبت به بستر بدون فین برخوردار است.

نیازمند و داب‌زاده [8] برای مطالعه‌ی عددی یک چیلر جذب سطحی با بستر استوانه‌ای و فین‌های حلقوی از جفت کاری سیلیکاژل-RD-آب استفاده کردند. مدل‌سازی بستر جاذب در مطالعه‌ی آن‌ها به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد و به بررسی تأثیر پیکربندی بستر شامل ارتقای بستر، فاصله‌ی بین فین‌ها و همچنین قطر ذرات جاذب بر عملکرد سیستم پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد، به طور کلی برای دستیابی به یک توان سرمایش کل معین، استفاده از فین‌ها می‌تواند اندازه‌ی بستر را به طور چشمگیری کاهش دهد، اگرچه فین‌ها ضریب کارکرد⁹ سیستم را کاهش می‌دهند. علاوه برای هر بستر با پیکربندی مشخص، یک قطر بهینه برای دستیابی به ضریب کارکرد و توان سرمایش مخصوص بیشینه وجود دارد.

مهدوی خواه و نیازمند [9] 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 جاذب ارائه نمودند [10]. نیازمند و همکاران [11] در ادامه‌ی مطالعه‌ی

استفاده از سیستم‌های تبرید مرسوم، دلایلی کافی برای مطالعه و بکارگیری سیستم‌هایی است که از منابع انرژی تجدیدپذیر و انرژی گرمایی تلف شده استفاده می‌کنند. بر اساس تخمین برآورده شده توسط موسسه بین‌المللی تبرید در پاریس، تقریباً 15% از کل برق تولیدی در سراسر جهان صرف فرایندهای گوناگون تبرید و تهویه مطبوع می‌شود [1]. سیستم‌های تبرید تراکمی بخار مرسوم از انرژی برق زیادی استفاده می‌کنند که موجب اتمام منابع سوخت فسیلی گران‌بها می‌شوند. همچنین مبردهای استفاده شده در این سیستم‌ها به انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کنند. برخی از این مبردها مانند کلروفلوروکربن‌ها و هیدروکلروفلوروکربن‌ها دارای اثر تخریبی روی لایه‌ی اوزون [1] و هیدروفلوروکربن‌ها عامل گرمایش جهانی هستند [2]. از این رو برای رفع مشکلات فوق، سیستم‌های تبرید جذب سطحی¹ مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. اگرچه، ضعف اصلی سیستم‌های جذب سطحی، توان سرمایش مخصوص² نسبتاً پایین به دلیل انتقال گرما و جرم ضعیف درون بستر جاذب³ است. از این رو، بهبود فرایندهای انتقال گرما و جرم درون بستر جاذب با استفاده از سطوح گسترش یافته مانند فین‌ها به عنوان یک موضوع حائز اهمیت در زمینه‌ی طراحی چیلرهای جذب سطحی مطرح می‌شود.

با توجه به کشت پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد چیلرهای جذب سطحی، مطالعه و بهینه‌سازی این سیستم‌ها نسبت به هر یک از این پارامترها با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی متعدد مقرن به صرفه نخواهد بود. بنابراین مدل‌سازی عددی می‌تواند به عنوان جایگزین قابل قبول در این حوزه مطرح شود. مطالعات عددی در زمینه طراحی چیلرهای جذب سطحی را می‌توان از نظر دقت و پیچیدگی مدل‌سازی جزئیات فرایندهای انتقال گرما و انتقال جرم سیستم، به سه دسته کلی تقسیم نمود [4,3]: مدل ترمودینامیکی، مدل پارامترهای متمرکز⁴ و مدل پارامترهای توزیع شده⁵ (مدل انتقال گرما و انتقال جرم).

در مدل ترمودینامیکی جزئیات فرایندهای انتقال گرما و انتقال جرم در بستر جاذب در نظر گرفته نمی‌شوند و تنها به تحلیل قوانین اول و دوم پرداخته می‌شود. همچنین فرض می‌شود که جاذب⁶ و جذب‌شونده⁷ همواره در تعادل ترمودینامیکی هستند. این مدل‌ها معمولاً به صورت معادلات جبری نسبتاً ساده بر اساس سیستم حالت پایا بیان می‌شوند و در تحلیل کیفی یا شبه کیفی سیستم مفید می‌باشند [4,3].

برخلاف مدل ترمودینامیکی، مدل متمرکز از نظر زمانی مدلی گذرا است و معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیلی معمولی بیان می‌شود. معادلات اصلی در مدل پارامترهای متمرکز معمولاً موازنۀ انرژی، موازنۀ جرم و جذب تعادلی می‌باشند [5-3]. به منظور ساده‌سازی تحلیل بر اساس این مدل عموماً فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- دمای بستر جاذب یکنواخت است.
- مبرد (جذب‌شونده یا سیال کاری) بصورت یکنواخت در بستر جاذب جذب می‌شود و به صورت غلظت متوسط می‌تواند توصیف شود.
- سرعت جذب بالا بوده و در هر لحظه فازهای جامد و گاز در تعادل ترمودینامیکی می‌باشند.

¹ Adsorption cooling system

² SCP: Specific cooling power

³ Adsorbent bed

⁴ Lumped parameters model

⁵ Distributed parameters model

⁶ Adsorbent

⁷ Adsorbate

⁸ Switching frequency

⁹ COP: Coefficient of performance

بستر بر حسب زمان چرخه بررسی می‌شود. در ادامه یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای جامع با مشخصه‌ی جرمی و طولی یکسان، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترها جاذب با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای انجام می‌گیرد. بدین منظور توزیع دما، جذب لحظه‌ای و فشار درون بستر به همراه الگوهای جریان بخار مبرد در زمان اتمام فرایندهای گرمایشی چرخه بعلاوه‌ی تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای بر عملکرد سیستم ارزیابی می‌شود.

2- مدل‌سازی عددی

در کاربردهای عملی 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 می‌شود. قابل ذکر است که مبدل در یک محفظه قرار می‌گیرد و بخارهای مبرد 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 می‌شود. شایان ذکر است که نیازمند و همکاران [11] نشان دادند که با در نظر گرفتن قسمت کوچکی از بستر جاذب شامل سه فین، عملکرد سیستم به خوبی مدل‌سازی یک بستر شامل پنجاه فین پیش‌بینی می‌شود. پس از ایجاد هندسه‌ی مناسب، می‌باشد معادلات انتقال گرمایی مربوط به حوزه‌های سیال ناقل گرما، کانال فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال گرما و انتقال جرم مربوط به مواد جاذب و سیال مبرد به صورت همزمان حل شوند. در شکل 1 یک نمونه‌ی واقعی از مبدل صفحه-تخت با فین‌های ذوزنقه‌ای و در شکل 2 فرایندهای انتقال گرما و جرم مبدل مذکور به تصویر کشیده شده است. محدوده‌ی حل عددی نیز در شکل 3 نشان داده است.

2- فرضیات مدل‌سازی

در این پژوهش از فرضیات زیر استفاده شده است [8-11,13]:

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

2- معادلات حاکم

بر اساس فرضیات بیان شده، معادلات حاکم برای سیال حامل انرژی، کانال

پیشین [9] به منظور شناسایی شکل هندسی مناسب‌تر فین، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای هندسی جامع بر روی فین‌های صفحه‌ای مربعی و حلقه‌ای انجام دادند. در مطالعه‌ای دیگر طالبیان و همکاران [12] به تحلیل اگزرسی بستر جاذب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین تخریب اگزرسی در مرحله احیای فشار ثابت رخ می‌دهد. نیازمند و همکاران [13] در ادامه‌ی مطالعات خود به بررسی تأثیر هندسه‌ی بستر و دمای سیال ناقل گرمایی ورودی بر روی قطر بهینه ذرات جاذب سیلیکاژل پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد بهینه سیستم به ازای تمامی حالات مختلف بررسی شده در مطالعه‌ی آن‌ها، در محدوده‌ی قطر ذرات بین 0.3 تا 0.4 میلی‌متر حاصل می‌شود. آذرفر و همکاران [14] در ادامه‌ی تحقیقات پیشین با توجه به پایین بودن ضریب انتقال گرمایی رسانشی مواد جاذب، تأثیر افزودن ذرات فلزی بر بهبود انتقال گرمایی بستر را بررسی نمودند. گلپرور و همکاران [15] در پژوهش خود عملکرد دو سیستم تبرید جذب سطحی با منابع حرارت اتلافی موتور شامل سیستم‌های اگزرسی و آب رادیاتوری را مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که سیستم اگزرسی نه تنها در تولید سرمایش توانمندتر است بلکه در شرایط محیطی متغیر نیز عملکرد بهتری دارد.

سولماس و همکاران [16] با استفاده از جفت‌کاری سیلیکاژل-آب به بررسی تأثیر شرایط عملکردی سیستم بر مقدار جذب میانگین درون بستر جاذب استوانه‌ای بدون فین در طول فرایند جذب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار مبرد به گردش درآمده در سیستم، با افزایش فشار اوایل‌تور و دمای منبع گرم و با کاهش فشار کندانسور و دمای منبع سرد، افزایش می‌یابد. بعلاوه، مدت زمان فرایند جذب، بیشتر از مقاومت‌های انتقال جرم به مقاومت‌های انتقال گرما حساس است. نتیجه دیگر آن‌ها این بود که 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.

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-تخت¹ هستند که از سطوح انتقال گرمایی زیادی برخوردارند و از این رو، استفاده از آن‌ها به عنوان مبدل‌های جذب سطحی قابل توجه است. سانتاماریا و همکاران [17] 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. آن‌ها 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.

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌ها در مبدل‌های صفحه-تخت بر عملکرد یک چیلر جذب سطحی تک بستره است. بدین منظور برای نخستین بار از یک مدل سه‌بعدی و با در نظر گرفتن هر دو نوع مقاومت انتقال جرم درون‌ذره‌ای² و برون‌ذره‌ای³ برای شبیه‌سازی بستر مبدل‌های مذکور استفاده شده است. بعلاوه، سیلیکاژل SWS-1L به عنوان جاذب و آب به عنوان جذب‌شونده در نظر گرفته شده است. به منظور شناخت رفتار دینامیکی بستر، در ابتدا تغییرات میانگین فشار، دما و جذب لحظه‌ای

¹ Flat-tube heat exchanger

² Intra-particle mass transfer resistance

³ Inter-particle resistance

$$\int_{cv} (\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} dV + \int_{cs} (\rho C_p) \vec{u} T \cdot d\vec{A} = \int_{cs} (k \vec{\nabla} T)_f \cdot d\vec{A} + S_{f-chan} \quad (1)$$

2-2-2- کanal فلزی
معادله انرژی کanal آلمینیومی به صورت معادله رسانش گذرای سه بعدی می باشد و به شکل رابطه (2) بیان می شود:

$$\int_{cv} (\rho C_p)_{chan} \frac{\partial T_{chan}}{\partial t} dV = \int_{cs} (k \vec{\nabla} T)_{chan} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

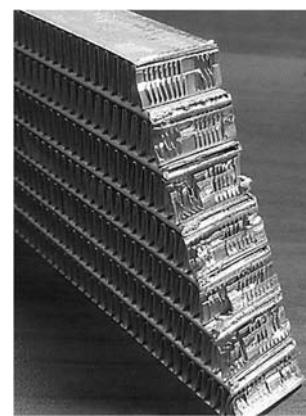


Fig. 1 Real trapezoidal finned flat-tube heat exchanger [17]

شکل 1 نمونه‌ی واقعی از مبدل صفحه-تخت با فین‌های ذوزنقه‌ای [17]

3- فین‌ها
موازنۀ انرژی برای فین‌های آلمینیومی به دلیل ضخامت ناچیز فین‌ها به صورت متتمرکز در جهت ضخامت فین و به صورت دو بعدی در جهت‌های دیگر حل می شود (رابطه (3)).

$$\int_{cv} (\rho C_p)_{fin} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{cs} (k \vec{\nabla} T)_{fin} \cdot d\vec{A} + S_{chan-fin} + S_{fin-b} \quad (3)$$

4-2-2- بستر مواد جاذب
معادله بقای انرژی بستر جاذب با فرض اتلاف ویسکوز ناچیز به صورت رابطه (4) نوشته می شود:

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cs} (\rho_g C_p g \vec{u}_g T_b) \cdot d\vec{A} = \int_{cs} (k \vec{\nabla} T)_b \cdot d\vec{A} + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (4)$$

که در آن ρC_p ظرفیت گرمایش کلی بستر و ΔH و $\partial w / \partial t$ به ترتیب گرمای جذب و نرخ جذب می باشند.

$$\rho C_p = \varepsilon_t (\rho C_p)_g + \rho_b (1 + w) C_{p(s,a)} \quad (5)$$

گرمای ویژه جفت جاذب/جذب‌شونده است [19] و ε_t تخلخل

کلی بستر می باشد که با رابطه (6) محاسبه می شود:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b) \varepsilon_p \quad (6)$$

برای محاسبه نرخ جذب می توان از مدل نیرو محركه‌ی خطی¹ استفاده نمود. این مدل در واقع مقاومت درون‌ذره‌ای برای جذب و احیای سیال عامل را در نظر می گیرد [20,9].

$$\frac{dw}{dt} = \left[\frac{15 D_{so} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right)}{R_p^2} \right] (w^* - w) \quad (7)$$

که w^* و w به ترتیب مقادیر جذب تعادلی و جذب لحظه‌ای می باشند. مقادیر w^* و ΔH براساس تئوری پتانسیل پلائی² برای جفت کاری سیلیکاژن-آب محاسبه می شوند [21].

معادله پیوستگی برای سیال عامل به صورت رابطه (8) می باشد:

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

سرعت بخار در بستر با استفاده از قانون دارسی با روابط (10,9) محاسبه می شود [22]:

$$\vec{u}_g = - \frac{K_d}{\mu_g} \vec{\nabla} P \quad (9)$$

¹ LDF: Linear driving force model
² Polanyi potential theory

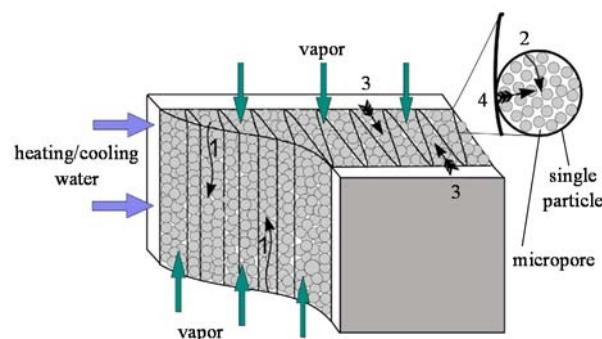


Fig. 2 Schematic of heat and mass transfer in trapezoidal finned flat-tube heat exchanger: 1-inter-particle diffusion, 2-intra-particle diffusion, 3-heat transfer between metal channel and adsorbent particles, 4-heat transfer between fins and adsorbent particles [18]

شکل 2 شماتیکی از فرایندهای انتقال گرما و جرم مبدل صفحه-تخت با فین‌های ذوزنقه‌ای: 1- دیفیوژن برون‌ذره‌ای، 2- دیفیوژن درون‌ذره‌ای، 3- انتقال گرما بین کanal فلزی و مواد جاذب، 4- انتقال گرما بین فین‌ها و مواد جاذب [18]

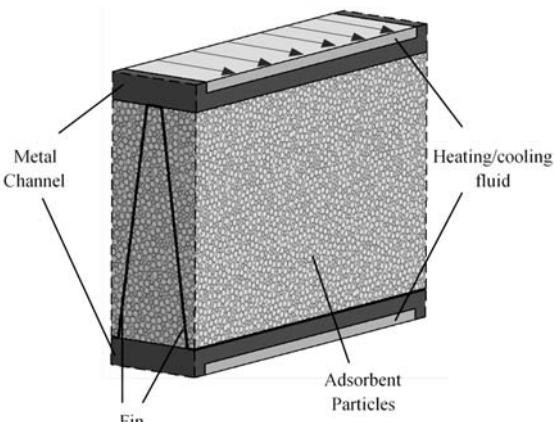


Fig. 3 Schematic of numerical solution domain in trapezoidal beds

شکل 3 شماتیکی از محدوده حل عددی در بسترها ذوزنقه‌ای

فلزی، فین‌ها و بستر مواد جاذب به صورت زیر بیان می شوند.

2-2-1- سیال ناقل گرما

معادله بقای انرژی سیال ناقل گرما به صورت یک بعدی در جهت عمق کanal و با فرض دمای متتمرکز در جهت‌های دیگر به صورت رابطه (1) حل می شود.

برای وجود دیگر از شرط گرادیان فشار صفر استفاده شده است. شرایط مذکور با توجه به شکل 4 به صورت روابط (20-16) بیان می‌شوند:

$$T|_{\text{all zones at } t=0} = T_{\text{cooling}} \quad (16)$$

$$P|_b \text{ at } t=0 = P_{\text{evap}}$$

$$T_f|_{\text{face}=2} = T_{\text{inlet}} = T_{\text{heating or cooling}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial n}|_{\text{face}=1} = 0$$

$$\frac{\partial T_{\text{chan}}}{\partial n}|_{\text{face}=1,2,3,4,5,6} = 0 \quad (18)$$

$$\int_{f-\text{chan}} (k \vec{\nabla} T)_{\text{chan}} \cdot d\vec{A} = S_{f-\text{chan}}$$

$$S_{f-\text{chan}} = - \int_{f-\text{chan}} h_{f-\text{chan}} (T_f - T_{f-\text{chan}}) dA \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{\text{fin}}}{\partial n}|_{\text{face}=1,2,3,4} = 0$$

$$S_{\text{chan-fin}} = - \int_{\text{chan-fin}} (k \vec{\nabla} T)_{\text{chan}} \cdot d\vec{A} \quad (19)$$

$$S_{\text{fin-b}} = - \int_{\text{fin-b}} (k \vec{\nabla} T)_b \cdot d\vec{A}$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial n}|_{\text{face}=1,2,3,4} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial P_b}{\partial n}|_{\text{face}=1,2} = 0$$

$$P_b|_{\text{face}=3,4} = P_{\text{cham}}$$

2-4-عملکرد سیستم

کنداسور و اوپراتور با استفاده از رابطه (21) مدل می‌شوند:

$$Q_{\text{evap/cond}} = \int_{\text{isobaric cooling/heating}} \dot{m}_g L_v dt \quad (21)$$

که L_v گرمای نهان تبخیر آب در دمای اوپراتور/کنداسور است [24].

توان سرمایش مخصوص از رابطه (22) محاسبه می‌شود:

$$SCP = \frac{Q_{\text{evap}}}{m_b \times t_{\text{cycle}}} \quad (22)$$

که m_b جرم مواد جاذب بستر است.

2-5-کنترل چرخه

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

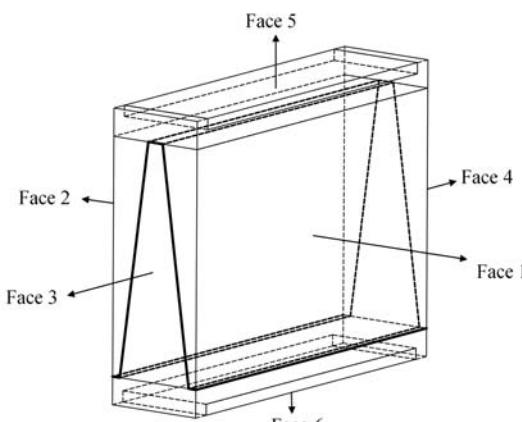


Fig. 4 وجوه مرزی حوزه حل

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon_b)^2} \quad (10)$$

که K_d نفوذپذیری بستر جاذب است [23].

با ترکیب معادلات (8) و (9)، معادله (11) برای محاسبه فشار بستر به دست می‌آید:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV = \int_{cs} \left(\rho_g \frac{K_d}{\mu_g} \vec{\nabla} P \right) \cdot d\vec{A} - \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (11)$$

با حل معادله (11) یا به عبارت دیگر با فرض عدم یکنواختی فشار بستر، در واقع مقاومت برون ذرهای در نظر گرفته خواهد شد.

مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده به کمک معادله حالت گاز کامل و فشار به دست آمده از معادله (11)، با رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$\rho_g = \frac{P}{R_g T_b} \quad (12)$$

2-5-2-محفظه

همان طور که پیشتر اشاره شد، مبدل گرمایی شامل سیال ناقل گرما، کانال فلزی، فین‌ها و بستر مواد جاذب در یک محفظه قرار می‌گیرد. بخار مبرد احیا شده از بستر برای ورود به کنداسور و همچنین بخار مبرد خارج شده از اوپراتور برای جذب در بستر در این محفظه جمع می‌گردد. فشار محفظه در فرایندهای احیا و جذب فشار ثابت به ترتیب برابر با فشار کنداسور و اوپراتور در نظر گرفته می‌شود. برای فرایندهای جرم ثابت، نیاز است که مقدار جرم کل ورودی یا خروجی از سطح مشترک بستر با محفظه در هر گام زمانی محاسبه شده و به کمک آن چگالی محفظه محاسبه می‌شود. دمای محفظه نیز برابر با میانگین دما روی سطح مشترک بستر با محفوظه فرض می‌شود. در نهایت فشار محفظه از معادله حالت گاز کامل به صوت روابط (13-15) محاسبه خواهد شد.

$$\dot{m}_g = \int_{\text{Interface}} (\rho \vec{u})_g \cdot d\vec{A} \quad (13)$$

$$\dot{m}_g = V_{\text{cham}} \frac{\partial \rho_{\text{cham}}}{\partial t} \quad (14)$$

$$P_{\text{cham}} = \rho_{\text{cham}} R_g T_{\text{cham}} \quad (15)$$

2-3-شرایط اولیه و مرزی

به دلیل نایابی بودن معادلات حاکم، شروع حل برنامه عددی نیازمند شرایط اولیه برای تمامی حوزه‌های مورد مطالعه می‌باشد. برای مقدار دمایی، از دمای سیال ناقل گرما در حالت سرمایش و برای مقدار فشار، از فشار اوپراتور استفاده شده است. همچنین میزان مبرد جذب شده اولیه در جذب تعادلی در فشار و دمای اولیه در نظر گرفته شده است. کمیت‌های موردنیاز دیگر بر اساس دما و فشار کاری مذکور مقداردهی اولیه شده‌اند.

برای حل معادلات حاکم دیفرانسیلی علاوه بر شرایط اولیه، با توجه به مرتبه معادلات و تعداد متغیرهای مستقل هر معادله به تعداد مشخصی از شرایط مرزی نیاز است. بدین منظور شرط مرزی معادله انرژی سیال ناقل گرما در ورودی، دمای گرمایش یا سرمایش سیال مناسب با فرایندهای احیا یا جذب در نظر گرفته شده است. برای شرایط مرزی معادلات انرژی حوزه‌های دیگر چنانچه حوزه‌ها در تماس با یکدیگر باشند، از فرض برای دما و شار گرمایی کل در سطح مشترک بین حوزه‌ها استفاده شده و در غیر اینصورت، شرط گرادیان دمای صفر در نظر گرفته شده است. در مورد شرایط مرزی معادله فشار بستر، برای وجود در تماس با محفوظه از فشار محفظه و

کامل به پایان رسد. معیارهای همگرایی در نظر گرفته شده به صورت روابط (25) می‌باشد:

$$\begin{aligned} \max |T_{\text{chan}}^{\text{m+1}} - T_{\text{chan}}^{\text{m}}| &< 0.005 \\ \max |T_{\text{fin}}^{\text{m+1}} - T_{\text{fin}}^{\text{m}}| &< 0.005 \\ \max |T_b^{\text{m+1}} - T_b^{\text{m}}| &< 0.005 \\ \max |P_b^{\text{m+1}} - P_b^{\text{m}}| &< 0.005 \end{aligned} \quad (25)$$

که m بیانگر تکرار در هر گام زمانی است.

با توجه به شکل 5 که استقلال نتایج عددی از تعداد شبکه‌بندی حوزه حل را نشان می‌دهد، به منظور کاهش هزینه محاسبات عددی تعداد 11 شبکه در فاصله‌ی بین فین‌ها، تعداد 16 شبکه در جهت ارتفاع فین و تعداد 21 شبکه در جهت طول بستر به عنوان شبکه پایه انتخاب شد. شایان ذکر است که شبکه‌بندی انتخاب شده برای یک بستر جاذب مستطیلی با ارتفاع فین 8mm و فاصله‌ی بین فین 3mm در نظر گرفته شده است. از این رو برای هماهنگی نتایج مربوط به تأثیر ابعاد هندسی بستر، شبکه‌بندی پایه متناسب با تغییر ابعاد هندسی بسترها تغییر خواهد نمود.

4- اعتبارسنجی

از آنجا که نتایج تجربی برای چیلر جذب سطحی سیلیکاژل SWS-1L-آب با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مستطیلی لذوقهای موجود نیست، جهت اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در این مقاله، از نتایج تجربی رستوکیا و همکاران [26] استفاده شده است. آن‌ها در پژوهش خود از مبدل گرمایی با فین‌های حلقوی و جفت سیلیکاژل SWS-1L-آب استفاده کردند. بدین منظور، شبکه‌بندی مبدل جذب سطحی از مدل صفحه-تخت به مدل حلقوی تغییر داده شده و با حفظ معادلات حاکم و روش عددی استفاده شده در این مقاله، نتایج به دست آمده با نتایج تجربی رستوکیا و همکاران [26] تحت شرایط آزمایشگاهی بیان شده در پژوهش آن‌ها مقایسه شده است. در شکل 6 تغییرات زمانی میانگین دما و فشار بستر نمونه‌ی آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج مربوط به نمونه‌ی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. شایان ذکر است که اگرچه مبدل صفحه-تخت هندسه‌ی به مرتبه پیچیده‌تری از مبدل حلقوی دارد ولی مطابقت قابل قبول مشاهده شده بین نتایج عددی و تجربی درج شده در شکل 6، نشان‌دهنده‌ی مدل ریاضی و دقت روش عددی مناسب استفاده شده در این پژوهش است.

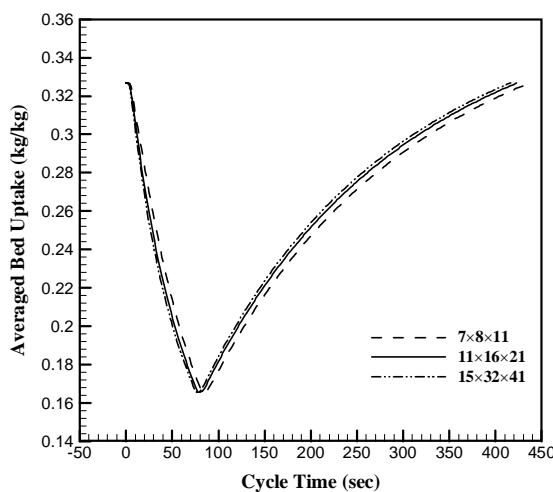


Fig. 5 Results mesh independency

شکل 5 استقلال نتایج از شبکه‌بندی

براساس رسیدن به درصد معینی از جذب نهایی است که با استفاده از روابط (24,23) به ترتیب برای مراحل احیا و جذب فشار ثابت محاسبه می‌شود

$$:[13,11,9]$$

$$w_{\min} = w_{\min}^* + 0.2(w_{\max}^* - w_{\min}^*) \quad (23)$$

$$w_{\max} = w_{\max}^* - 0.2(w_{\max}^* - w_{\min}^*) \quad (24)$$

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 اوپرатор و دمای سرمایش سیال ناقل گرما می‌باشد.

3- روش حل عددی و الگوریتم حل

معادلات حاکم برای سیال ناقل گرما و فین به ترتیب به صورت یکبعدی و دو بعدی در دستگاه مختصات کارتزین و برای کانال فلزی و بستر جاذب به صورت سه بعدی در دستگاه مختصات عمومی¹ حل می‌شوند. برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود² با در نظر گرفتن طرح تقاضل پیشرو برای جمله‌های زمانی و طرح تقاضل مرکزی برای جمله‌های پخش و همرفت استفاده شده است. معادلات منفصل شده در زبان برنامه‌نویسی فرترن³ با همزمان حل می‌شوند. به جزئیات کامل گسسته‌سازی معادلات و روش حل در مرجع [25] اشاره شده است.

الگوریتم حل مسئله بینین ترتیب است که ابتدا مشخصات هندسی به برنامه داده می‌شود. سپس با استفاده از این مقادیر، شبکه‌ی حل عددی تولید می‌شود. حل چرخه تبرید جذب سطحی از مرحله گرمایش جرم ثابت آغاز شده و با توجه به این نکته شرایط اولیه دما و فشار در حوزه‌های مختلف حل تعیین می‌شود. حل معادلات حاکم با تشخیص اینکه در هر زمان، سیستم تبرید در کدام یک از مراحل چرخه قرار دارد آغاز می‌شود، چرا که اعمال شرایط مرزی و نحوه محاسبه فشار محفظه در مراحل مختلف باهم متفاوت است. سپس، شرط پایان هر مرحله از چرخه بررسی می‌شود و در صورتی که شرط مربوطه ارضاء شود، سیستم وارد مرحله بعد می‌شود. پس از اینکه مرحله چرخه مشخص و شرط پایان مرحله بررسی شد، حل معادلات آغاز می‌شود. حل معادلات از معادله انرژی سیال ناقل گرما (معادله 1) که درون کانال فلزی جریان دارد، آغاز شده و پس از آن به ترتیب معادلات انرژی کانال (معادله 2) و فین (معادله 3) حل می‌شوند. با توجه به اینکه جمله نرخ تغییرات جذب در معادله انرژی بستر وجود دارد، قبل از حل معادله انرژی بستر، نرخ تغییرات جذب (معادله 7) محاسبه می‌شود. سپس به ترتیب معادله انرژی بستر (معادله 4) و معادله حالت بخار مبرد (معادله 12) به همراه معادلات فشار (معادله 11) و مومنت (معادله 9) بستر حل می‌شوند. در ادامه میزان دبی بخار مبرد ورودی یا خروجی به بستر جاذب (معادله 13) محاسبه شده و اگر چرخه در مراحل جرم ثابت باشد، فشار محفظه محاسبه می‌شود. سپس بررسی می‌شود که آیا معیار همگرایی در نظر گرفته شده برای حل معادلات ارضاء شده است یا خیر که در صورت همگرا نشدن، پس از تصحیح دمایهای مرزهای مشترک بین حوزه‌های مختلف مبدل، مجدداً مراحل حل معادلات از حل معادله انرژی سیال ناقل گرما شروع می‌شود و این حلقه ادامه دارد تا اینکه شرط همگرایی ارضاء شود. پس از همگرایی، سیستم یک گام زمانی به جلو پیش می‌رود و الگوریتم بیان شده ادامه می‌باید تا یک چرخه

¹ General coordinate system

² Finite volume method

³ FORTRAN

⁴ Alternating direction implicit method: (ADI method)

⁵ The tri-diagonal solver algorithm

جدول 1 مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی

Table 1 The geometrical specifications, thermodynamic properties, and operation conditions

واحد	مقدار	نماد	پارامتر
mm	2.42	D_h	قطر هیدرولیکی داخلی کاتال
mm	20	BL	طول بستر
mm	0.5	FT	ضخامت فین
degree	82	Angle	زاویه حاده در بسترهای ذوزنقه‌ای شکل
kg/s	0.01	\dot{m}_f	دبی جرمی سیال حامل انرژی
mm	0.3	d_p	قطر ذرات جاذب
-	0.52	ε_p	تخلخل ذرات
-	0.36	ε_b	تخلخل بستر
W/m.K	0.2	k_b	ضریب انتقال گرمایی هدایت معادل بستر
kg/m ³	664	ρ_b	چگالی توده‌ای بستر جاذب
C°	10	T_{evap}	دمای اواپراتور
C°	30	T_{cond}	دمای کندانسور
C°	90	$T_{heating}$	دمای سیال گرم ورودی
C°	30	$T_{cooling}$	دمای سیال سرد ورودی

ذرات جاذب، فشار در نقاط داخلی بستر بیشتر از فشار محفظه می‌شود و از این رو، فشار میانگین بستر نیز بیشتر از فشار محفظه خواهد بود (شکل 7). با گذشت زمان، نرخ احیای سیال عامل به تیریج کاهش یافته و در نتیجه فشار میانگین بستر به فشار کندانسور میل می‌کند. با کاهش مقدار مبرد جذب شده و رسیدن به حد معینی از آن، شیر ارتباطی بستر با کندانسور مجدد بسته شده و با سرد کردن ذرات جاذب، فرایند جذب مبرد به صورت جزئی در جرم ثابت بستر شروع می‌شود (مرحله سوم). این عمل باعث می‌شود، فشار محفظه تا فشار اواپراتور سریعاً کاهش یابد. پس از رسیدن فشار بستر به فشار اواپراتور در حالیکه شیر بین بستر و کندانسور بسته است، شیر بین بستر و اواپراتور باز شده و سرمایش بستر ادامه می‌یابد. در نتیجه اتصال محفظه به اواپراتور، فشار محفظه ثابت مانده و در حین کاهش دمای مواد جاذب، فرایند جذب در بستر تسريع می‌شود (مرحله چهارم). مجدداً مشاهده می‌شود که در این مرحله فشار میانگین بستر تا حدی کمتر از فشار محفظه است. همین اختلاف

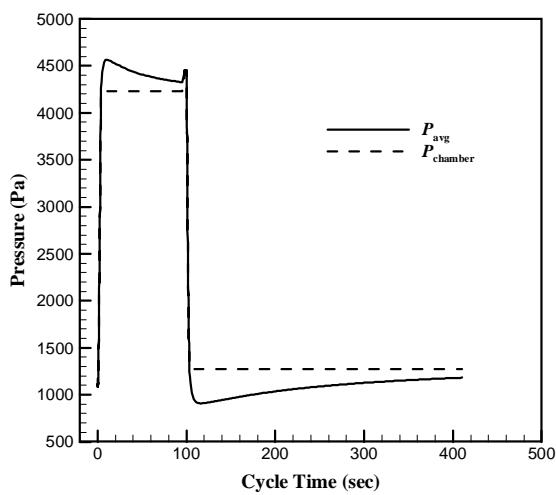


Fig. 7 Cycle time variations of the mean bed and chamber pressure in the sample trapezoidal bed with FH=14mm and averaged FS=3mm

شکل 7 تغییرات فشار میانگین بستر جاذب و فشار محفظه بر حسب زمان چرخه برای بستر نمونه ذوزنقه‌ای با ارتفاع فین 14mm و متوسط فاصله بین فین 3mm

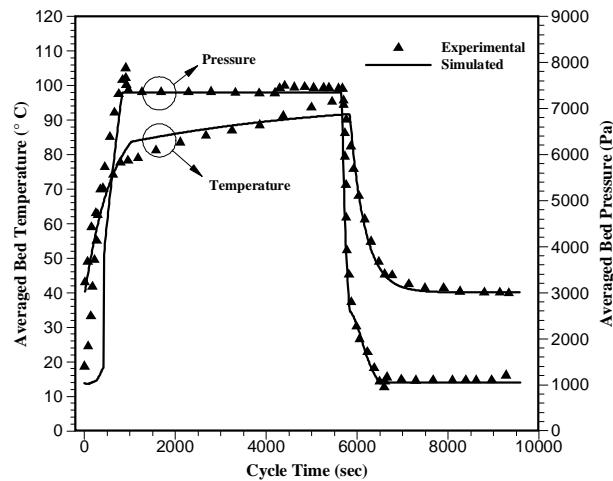


Fig. 6 Comparison between numerical and experimental time variations of the mean bed temperatures and pressures in annular heat exchanger
شکل 6 مقایسه تغییرات زمانی دما و فشار میانگین بستر به روش عددی و تجربی در مبدل حلقوی

5- نتایج

در این بخش به منظور شناخت بهتر چرخه ترمودینامیکی بستر یک چیلر جذب سطحی، در ابتدا تغییرات برخی از پارامترهای مهم سیستم از جمله میانگین فشار، دما و جذب لحظه‌ای بستر بر حسب زمان چرخه برای یک بستر جاذب نمونه با فین‌های ذوزنقه‌ای بررسی می‌شود. در ادامه یک مطالعه مقایسه‌ای جامع با مشخصه‌ی جرمی و طولی یکسان، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترهای جاذب با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای انجام می‌گیرد. بدین منظور بسترهای جاذب با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای که دارای ارتفاع فین 14mm و متوسط فاصله بین فین 3mm هستند به عنوان بسترهای انتخاب شده و توزیع دما، جذب لحظه‌ای و فشار درون بستر به همراه الگوهای جریان بخار مبرد در زمان اتمام فرایندهای گرمایشی چرخه برای آن‌ها بررسی می‌شود. در نهایت، تأثیر ارتفاع و فاصله بین فین‌ها بر عملکرد سیستم‌های با بستر مستطیلی و ذوزنقه‌ای به طور جامع ارزیابی می‌شود.

در جدول 1 مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی استفاده شده در شبیه‌سازی حاضر ارائه شده است.

5-1- چرخه ترمودینامیکی بستر جذب سطحی: فشار، دما و جذب میانگین

در شکل 7 تغییرات فشار میانگین بستر جاذب بعلاوه فشار محفظه و در شکل 8 تغییرات دمای میانگین بستر به همراه مقدار میانگین سیال جذب شده در فاز جامد بر حسب زمان چرخه گرمایش جرم ثابت (مرحله اول) که شیرهای ارتباطی بستر با کندانسور و اواپراتور بسته‌اند، افزایش دمای بستر باعث احیای جزئی سیال عامل و کاهش مقدار جذب شده و فشار بستر و محفظه افزایش می‌یابد. هنگامی که فشار داخل محفظه به فشار کندانسور برسد، شیر ارتباطی بستر با کندانسور باز شده و با تداوم گرمایش بستر، احیای سیال عامل در فشار ثابت محفوظه به صورت گستردگی آغاز خواهد شد. بخارهای مبرد در این مرحله وارد کندانسور شده و پس از عبور از شیر خفانش وارد اواپراتور می‌شوند (مرحله دوم). هنگامیکه فشار محفوظه به فشار کندانسور رسیده است، به دلیل مقاومت انتقال جرم در بین

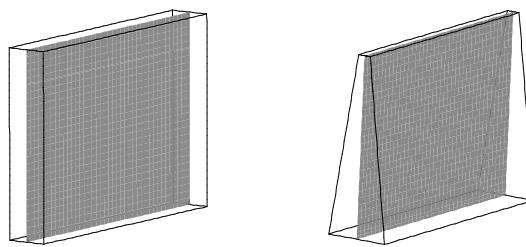


Fig. 9 صفحات میانی از بسترها جاذب

نمونه مستطیلی در لحظه‌ی اتمام فرایندهای گرمایشی سیستم نشان داده است. به دلیل تقارن موجود در هندسه مستطیلی و شرایط مرزی آن، بدینهی است که تمامی کانتورها نسبت به خطوط مرکزی عمودی و افقی گزرنده از صفحه نشان داده شده در شکل 9 دارای تقارن باشند. با توجه به کانتورهای توزیع دما، مناطقی از بستر که در تماس با سطوح گرم شده (اوله و فین) می‌باشند، از دمای بالاتری نسبت به نواحی میانی بستر برخوردارند. دمای بیشتر منجر به افزایش نرخ احیای سیال جذب شده می‌شود، بطوریکه در مناطق گرمتر بستر نسبت به مناطق سردتر، مقدار سیال عامل جذب شده باید کمتر باشد (شکل 11-b)، ولی با توجه به شکل 10 کانتورهای توزیع جذب و دمای بستر در لحظه‌ی پایان مرحله اول چرخه دارای تفاوت محسوسی با یکدیگر هستند. علت تفاوت مشاهده شده را اینگونه می‌توان توضیح داد که مناطق میانی بستر بیشترین فاصله را از سطوح انتقال گرمایشی دارند و طبیعی است که اثر انتقال گرمایشی دیرتر از مناطق در تماس با سطوح انتقال گرمایشی، به این مناطق برسد. بنابراین مناطق میانی بستر در مرحله ای جذب فشار ثابت از چرخه قبل، به دلیل انتقال گرمایشی کمتر نسبت به مناطق در تماس با سطوح سرد، سیال عامل کمتری را جذب کرده و در مرحله گرمایش جرم ثابت از چرخه جدید، ظرفیت جذب مقدار بیشتری از سیال عامل را دارند. بعلاوه با اتمام فرایندهای گرمایشی جرم ثابت، از آنجا که مدت زمان این فرایندهای گرمایشی بسیار کوتاه است، هنوز اثر گرمایشی از سطوح گرم به نواحی میانی بستر منتقل نشده است. در نتیجه فرایندهای احیا در این نواحی شروع نشده و در واقع فرایندهای جذب مبرد در این مناطق ادامه دارد. با توجه به شکل 10-c و توضیحات بیان شده، نواحی میانی بستر نواحی کم فشار و مناطق گرمتر بستر نواحی پرفشار خواهند بود. در این مرحله از چرخه، توزیع بخارهای مبرد پس از احیا از نواحی پرفشار بدین گونه است که بخشی از آن‌ها سبب افزایش فشار بستر و محفظه شده و بخش دیگر جذب نواحی کم فشار بستر می‌شوند. چنانچه در شکل 11-c مشاهده می‌شود، در پایان مرحله دوم چرخه، مناطق میانی بستر نسبت به مناطق در تماس با محفظه از فشار بالاتری برخوردار هستند. دلیل این امر، شرایط تحمیلی موجود در مساله شامل تقارن هندسی و مرزی مرتبط با مکان‌های خروج بخارهای مبرد از بستر بعلاوه توزیعات بیان شده در خصوص مقاومت انتقال جرم بروز ذرهای بستر (بخش 1-5) می‌باشد.

برخلاف بسترها مستطیلی، بسترها ذوزنقه‌ای نسبت به خط مرکزی افقی گزرنده از صفحه‌ی میانی درج شده در شکل 9، تقارن هندسی ندارند و در نتیجه کانتورهای بسترها ذوزنقه‌ای فاقد تقارن نسبت به خط مرکزی افقی هستند (شکل‌های 12 و 13). با توجه به کانتورهای دما، مناطقی از بستر که در تماس با سطوح گرم شده می‌باشند، از دمای بالاتری نسبت به نواحی دیگر بستر برخوردارند. بعلاوه، از آنجا که جرم جاذب کمتری در مناطقی از بستر با حجم هندسی کوچکتر وجود دارد، لذا گرمایش این مناطق

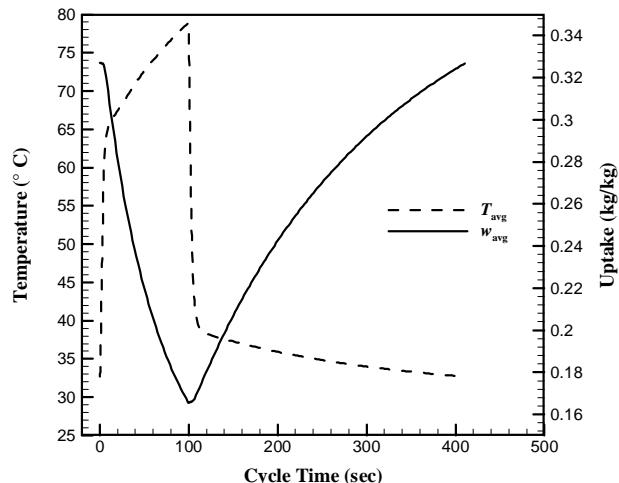


Fig. 8 تغییرات میانگین دمای بستر و سیال جذب شده بر حسب زمان چرخه برای ستر نمونه ذوزنقه‌ای با ارتفاع فین 14mm و متوسط فاصله بین فین 3mm

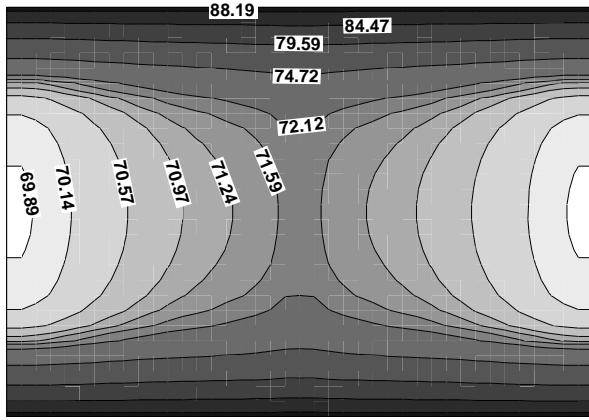
فشار باعث راندن بخارهای موجود در محفظه به لایه‌های میانی بستر شده تا در آنجا جذب مواد جاذب شوند. خلاصه ناشی از جذب سیال عامل توسط مواد جاذب منجر به مکش سیال عامل تبخیرشده در اوپراتور می‌شود. در این مرحله، تبخیر مبرد در اوپراتور منجر به تولید سرمایش در سیستم جذب سطحی می‌شود. شایان ذکر است، دلیل زیاد شدن فشار در شروع فرایند سوم به دلیل آن است که بستر تحت تأثیر مرحله ای احیای فشار ثابت، همچنان گرم بوده و به دلیل معیار خروج استفاده شده برای این مرحله (معادله 23) همچنان ظرفیت احیای سیال عامل وجود دارد. با این وجود تأثیر سرمایشی سیال حامل انرژی در زمان بسیار کوتاهی به تمامی نواحی بستر رسیده و منجر به کاهش سریع فشار می‌شود.

با توجه به شکل 8 مشاهده می‌شود، شبیه دمای میانگین بستر در مراحل جرم ثابت بیشتر از مراحل فشار ثابت است، این در حالی است که شبیه مقدار جذب میانگین در مراحل فشار ثابت بیشتر از مراحل جرم ثابت می‌باشد. در مراحل جرم ثابت به دلیل بسته بودن شیرهای اتصالی بین بستر با کندانسور و اوپراتور، مقدار جذب مبرد تقریباً ثابت می‌ماند، ولی از آنجا که بستر در مراحل فشار ثابت در اتصال با کندانسور و اوپراتور است، نرخ جذب و احیا سریع تر می‌باشد. در مورد شبیه دمای میانگین بستر می‌توان گفت که در مراحل جرم ثابت، مقدار جذب در داخل بستر تقریباً ثابت است و تمامی گرمایی داده/گرفته شده به‌از بستر صرف افزایش/کاهش دمای بستر می‌شود، ولی در مراحل فشار ثابت مقدار جذب یا احیای مبرد در حال تغییر است و مقداری از حرارت داده/گرفته شده به‌از بستر صرف تأمین گرمای جذب می‌شود، بنابراین افزایش یا کاهش دما با شبیه کمتری نسبت به مراحل جرم ثابت اتفاق می‌افتد.

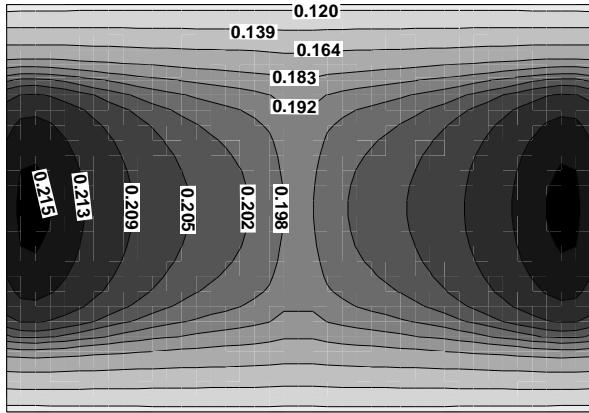
5-2- توزیع پارامترهای بستر: دما، جذب و فشار

در شکل 9 صفحات میانی از بسترها جاذب نمونه با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای جهت بررسی توزیع پارامترهای بستر که در ادامه بیان می‌شوند، به تصویر کشیده شده است.

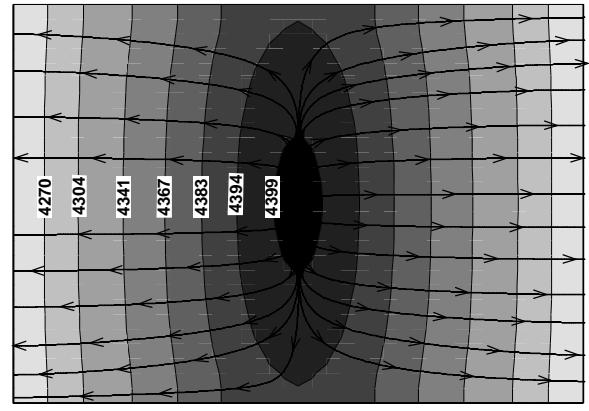
در شکل‌های 10 و 11 کانتورهای دما، مقدار جذب مبرد و فشار بستر به همراه الگوهای توزیع جریان بخار مبرد در صفحه‌ی میانی از بستر جاذب



(a)



(b)

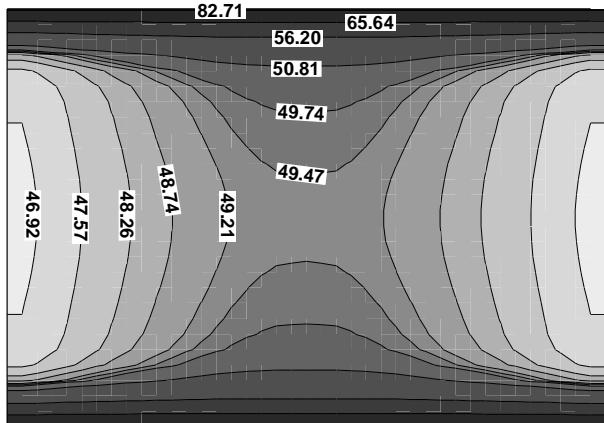


(c)

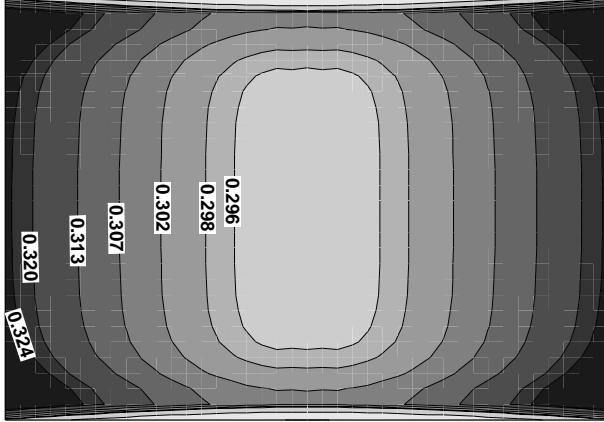
Fig. 11 Bed temperature, uptake and pressure distributions at the end of isobaric heating process in the sample rectangular bed: Top: temperature, middle: uptake, bottom: pressure and vapor flow pattern
شکل ۱۱ توزیع دما، مقدار جذب و فشار بستر در لحظه اتمام فرایند گرمایش فشار ثابت در بستر نمونه مستطیلی: (a) دما، (b) جذب مبرد، (c) فشار و الگوهای جریان بخار

جذب شده می‌شود و از طرف دیگر جرم جاذب بیشتر منجر به حجم بخار تولیدی بیشتر مبرد خواهد شد. این دو عامل در بسترهای ذوزنقه‌ای و در لحظه‌ی اتمام مراحل فشار ثابت درجهت تضعیف یکدیگر می‌باشند، بطوری که مناطق با جرم جاذب کمتر دارای دمای بیشتر و نرخ احیای بالاتری نسبت به مناطق با جرم جاذب بیشتر می‌باشند، درحالی که مناطق با جرم جاذب بیشتر با وجود اینکه دارای دمای کمتر و طبیعتاً نرخ احیای پایین‌تری نسبت به نواحی کم جرم بستر هستند ولی در نهایت از حجم بخارهای

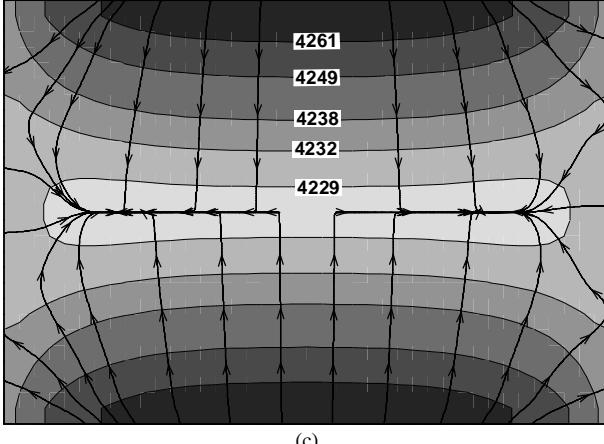
سریع‌تر و در نتیجه دمای این نواحی بالاتر از مناطقی از بستر با حجم هندسی بزرگ‌تر و جرم جاذب بیشتر است. تحلیل کانتورهای مقدار جذب در زمان پایان مراحل گرمایشی (شکل‌های b-12 و b-13) و همچنین میدان فشار و جریان مبرد در لحظه‌ی اتمام مرحله اول (شکل c-12) مشابه با توضیحات بیان شده در خصوص بسترهای مستطیلی می‌باشد، هرچند تحلیل میدان فشار در شکل c-13 نسبتاً پیچیده‌تر از شکل c-11 است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، دمای بیشتر منجر به افزایش نرخ احیای سیال



(a)

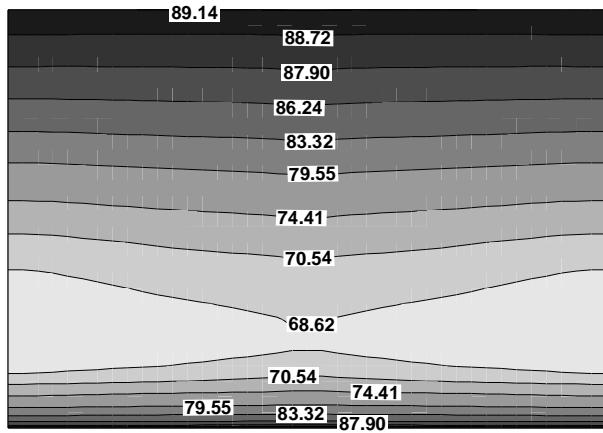


(b)

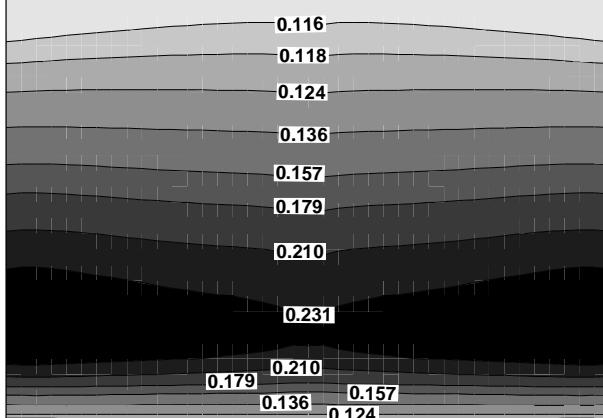


(c)

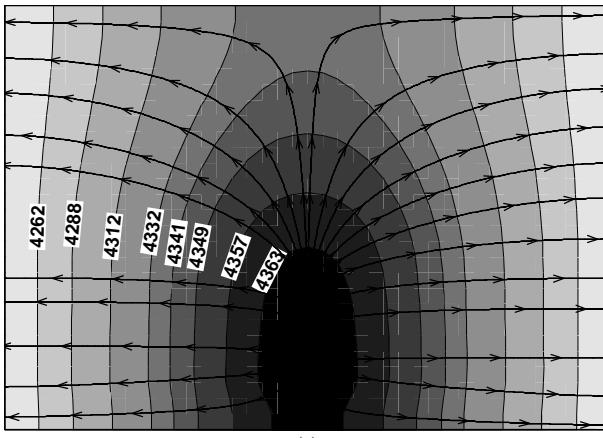
Fig. 10 Bed temperature, uptake and pressure distributions at the end of isosteric heating process in the sample rectangular bed: Top: temperature, middle: uptake, bottom: pressure and vapor flow pattern
شکل ۱۰ توزیع دما، مقدار جذب مبرد و فشار بستر در لحظه اتمام فرایند گرمایش جرم ثابت در بستر نمونه مستطیلی: (a) دما، (b) جذب مبرد، (c) فشار و الگوهای جریان بخار



(a)



(b)

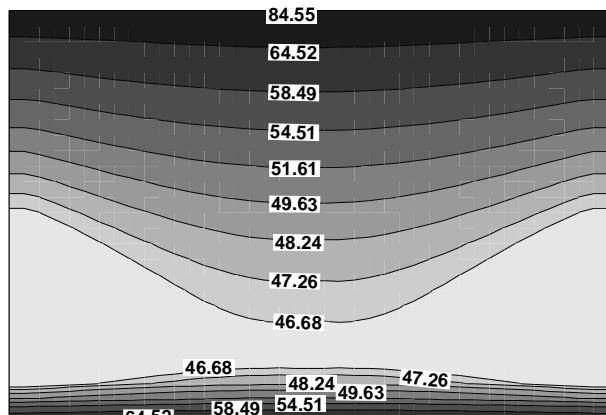


(c)

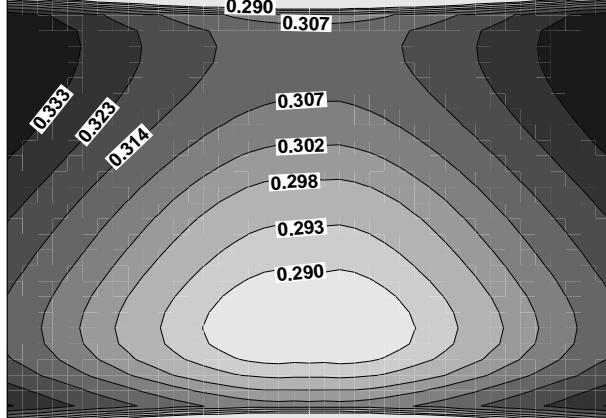
Fig. 13 Bed temperature, uptake and pressure distributions at the end of isobaric heating process in the sample trapezoidal bed: Top: temperature, middle: uptake, bottom: pressure and vapor flow pattern

شکل ۱۳ توزیع دما، مقدار جذب مبرد و فشار بستر در لحظه اتمام فرایند گرمایش فشار ثابت در بستر نمونه ذوزنقه‌ای: (a) دما، (b) جذب مبرد، (c) فشار و الگوهای جریان بخار

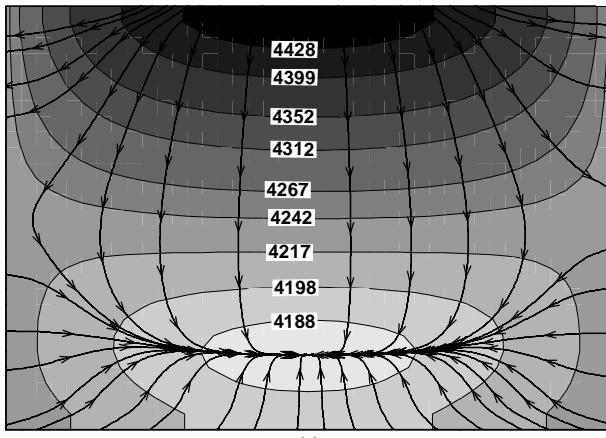
5- تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌ها بر عملکرد سیستم
در شکل ۱۴ تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌ها بر زمان چرخه بسترهای جاذب مستطیلی و ذوزنقه‌ای با مشخصه جرمی و طولی یکسان نشان داده شده است. صرف نظر از نوع هندسه فین، با افزایش ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌ها بدیهی است که جرم مواد جاذب موجود در بستر افزایش می‌یابد. ضریب رسانش گرمایی پایین ذرات جاذب بستر به عنوان عاملی در جهت تقویت تأثیر افزایش فاصله‌ی بین سطوح انتقال گرما منجر به انتقال گرمای



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Bed temperature, uptake and pressure distributions at the end of isosteric heating process in the sample trapezoidal bed: Top: temperature, middle: uptake, bottom: pressure and vapor flow pattern

شکل ۱۲ توزیع دما، مقدار جذب مبرد و فشار بستر در لحظه اتمام فرایند گرمایش جرم ثابت در بستر نمونه ذوزنقه‌ای: (a) دما، (b) جذب مبرد، (c) فشار و الگوهای جریان بخار

مبرد تولیدی بیشتری برخوردارند. با توجه به میدان فشار در لحظه‌ی اتمام مرحله دوم (شکل c-13) حجم بخار تولیدی بیشتر بر نرخ احیای کمتر غلبه کرده و مناطق با جرم جاذب بیشتر دارای بالاترین فشار در مرکز بستر هستند. حال این سوال مطرح می‌شود که با وجود تفاوت‌های مشاهده شده در خصوص توزیع پارامترهای بستر، عملکرد کدام یک از بسترهای مستطیلی و ذوزنقه‌ای تحت ابعاد متفاوت بستر بهتر می‌باشد؟

است (شکل 9). چنانچه بیشتر اشاره شد، در بستر ذوزنقه‌ای، جرم بیشتر منجر به انتقال گرمای آرامتر و نیز جرم کمتر باعث انتقال گرمای سریع تر می‌شود. هرچند در فاصله متوسط بین فین 3mm و ارتفاعهای بین 14 و 20mm، تأثیر جرم بیشتر بر جرم کمتر غلبه کرده و این امر به صورت مستقیم بر روی زمان چرخه (شکل 14) و درنتیجه SCP سیستم تأثیر می‌گذارد. شایان ذکر است، با کاهش افزایش سطح مقطع در قسمت‌های با حجم هندسی کوچکتر و بزرگتر در بستر ذوزنقه‌ای یا به عبارت دیگر با توزيع غیر یکنواخت تر جرم ذرات جاذب درون بسترها ذوزنقه‌ای نسبت به توزيع یکنواخت جرم در بسترها مستطیلی، اختلاف SCP دو بستر مستطیلی و ذوزنقه‌ای افزایش می‌یابد (ارتفاع فین 20mm نسبت به ارتفاع فین 14mm در متوسط فاصله بین فینی 3mm). این در حالی است که با توزيع یکنواخت تر جرم در بستر ذوزنقه‌ای، انتقال گرمای سریع تر در قسمت با جرم نسبتاً کمتر، ضعف انتقال گرمای کنتر در قسمت با جرم نسبتاً بیشتر بستر را پوشش داده و درنتیجه SCP بسترها ذوزنقه‌ای مشابه با بسترها مستطیلی می‌شود.

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از مدل پارامترهای توزيع شده، برای نخستین بار بستر جاذب یک چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت دارای فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای با جفت‌کاری سیلیکاژل 1L-SWS-آب به صورت سه‌بعدی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی شد. به منظور شناخت بهتر رفتار دینامیکی بستر، در ابتدا تأثیر برخی از پارامترهای مهم بر عملکرد سیستم از جمله تغییرات میانگین فشار، دما و جذب لحظه‌ای بستر بر حسب زمان چرخه بررسی شد. در ادامه، یک مطالعه مقایسه‌ای جامع با مشخصه‌ی جرمی و طولی یکسان، بین دو آرایش هندسی متفاوت از بسترها جاذب با فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای انجام گرفت. بدین منظور توزيع دما، جذب لحظه‌ای و فشار درون بستر به همراه الگوهای جریان بخار مبرد در زمان انعام فرایندهای گرمایشی چرخه بعلاوه‌ی تأثیر ارتفاع و فاصله بین فین‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای بر عملکرد سیستم ارزیابی شد. در این بررسی در طول پست ثابت 20mm، محدوده‌ی تغییرات ارتفاع فین 8-20mm و فاصله بین فین‌ها 3-20mm بود. نتایج نشان داد که عملکرد بسترها فین‌های 3-12mm در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که عملکرد بسترها مستطیلی و ذوزنقه‌ای به استثنای شرایطی که متوسط فاصله بین فین‌ها 3mm و ارتفاع فین‌ها 14 و 20mm است، مشابه یکدیگر می‌باشد و در مشخصات هندسی اشاره شده، توان سرمایش مخصوص بسترها مستطیلی تقریباً 5% و 17% (به ترتیب برای ارتفاع فین 14 و 20mm) بهتر از بسترها ذوزنقه‌ای است. بیشترین و کمترین توان سرمایش مخصوص چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت، به ترتیب 882 و 163W/kg برای کوچکترین و بزرگترین حجم بستر و شرایط در نظر گرفته شده در این پژوهش به دست آمد.

7- فهرست علایم

طول بستر جاذب (m)	BL
فاصله بین فین‌ها (m)	FS
ضریب انتقال گرمای هم‌رفت ($W\ m^{-2}K^{-1}$)	h
ضریب رسانش گرمایی ($W\ m^{-1}K^{-1}$)	k
(Pa)	P
دما (K) یا ($^{\circ}C$)	T

آهسته‌تر درون بستر و در نتیجه افزایش مدت زمان چرخه می‌شود. از طرف دیگر با افزایش جرم مواد جاذب، مقدار مبرد جذب و احیا شده یا به عبارت دیگر مقدار مبرد در چرخش در هر چرخه افزایش می‌یابد و این جرم مستقیماً بر انرژی سرمایشی کل تولید شده اثر می‌گذارد. در این بین، افزایش زمان چرخه و جرم ذرات جاذب بر افزایش تبرید کل غلبه کرده و با توجه به شکل 15 توان سرمایش مخصوص سیستم کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، در فاصله متوسط بین فین 3mm و ارتفاعهای بین 14 و 20mm توان سرمایش مخصوص بستر مستطیلی تقریباً 5% و 17% بهتر از بستر ذوزنقه‌ای مستطیلی و ذوزنقه‌ای با جرم جاذب فاصله و ارتفاع فین‌های دیگر، بسترها مستطیلی و ذوزنقه‌ای با جرم جاذب برابر عملکرد تقریباً یکسانی دارند. دلیل اختلاف SCP دو بستر ناشی از جرم کمتر ذرات جاذب موجود در قسمت با حجم هندسی کوچکتر و همچنین جرم نسبتاً بیشتر مواد جاذب در قسمت با حجم هندسی بزرگتر بستر ذوزنقه‌ای، نسبت به جرم یکنواخت توزيع شده جاذب در بستر مستطیلی

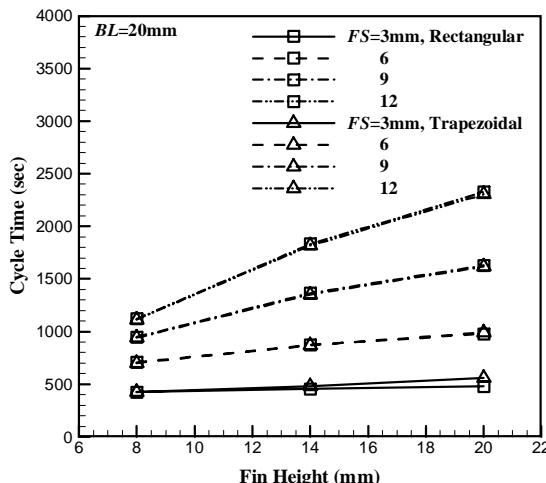


Fig. 14 تغییرات زمان چرخه بر حسب ارتفاع فین در فاصله‌های متفاوت بین فین‌ها

شکل 14 تغییرات زمان چرخه بر حسب ارتفاع فین در فاصله‌های متفاوت بین فین‌ها برای بسترها مستطیلی و ذوزنقه‌ای

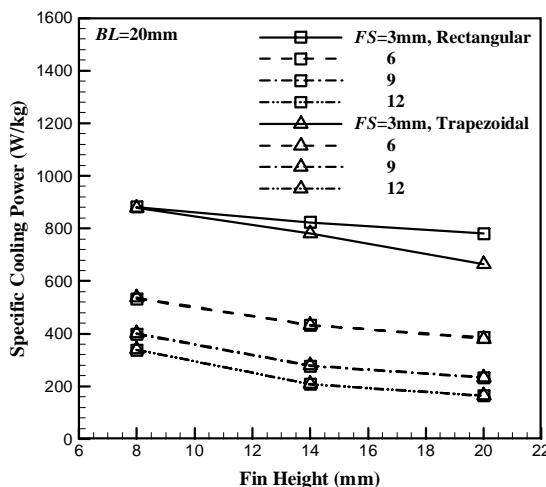


Fig. 15 تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب ارتفاع فین در فاصله‌های

مشخصات هندسی اشاره شده، توان سرمایش مخصوص بسترها مستطیلی و ذوزنقه‌ای

- [9] M. Mahdavikah, H. Niazimand, Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 939-949, 2013.
- [10] M. Mahdavikah, H. Niazimand, 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)
- [11] H. Niazimand, 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.
- [12] H. Talebian, M. Mamourian, H. Niazimand, Exergy analysis of the adsorbent bed in adsorption chillers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 70-78, 2014. (in Persian)
- [13] H. Niazimand, 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.
- [14] M. Azarfar, H. Niazimand, H. Talebian, Numerical simulation of heat transfer enhancement effect in adsorbent bed on the performance of adsorption system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 103-112, 2014. (in Persian)
- [15] S. B. Golparvar, M. Mohammadzadeh Kowsari, H. Niazimand, 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)
- [16] İ. Solmuş, C. Yamalı, C. Yıldırım, K. Bilen, Transient behavior of a cylindrical adsorbent bed during the adsorption process, *Applied Energy*, Vol. 142, pp. 115-124, 2015.
- [17] S. Santamaría, A. Sapienza, A. Frazzica, A. Freni, I. S. Girmik, Y. I. Aristov, Water adsorption dynamics on representative pieces of real adsorbers for adsorptive chillers, *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 11-19, 2014.
- [18] L. Gordeeva, A. Frazzica, A. Sapienza, Y. Aristov, A. Freni, Adsorption cooling utilizing the "LiBr/silica-ethanol" working pair: Dynamic optimization of the adsorber/heat exchanger unit, *Energy*, Vol. 75, pp. 390-399, 2014.
- [19] Y. I. Aristov, Adsorptive transformation of heat: principles of construction of adsorbents database, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 42, pp. 18-24, 2012.
- [20] S. Sircar, J. Hufton, Why does the linear driving force model for adsorption kinetics work?, *Adsorption*, Vol. 6, No. 2, pp. 137-147, 2000.
- [21] 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 fizicheskoy himii*, Vol. 79, No. 9, pp. 1490-1493, 2005.
- [22] D. A. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, Fourth Edition, pp. 5-6, New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [23] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, *Transport phenomena*, Second Edition, pp. 797, New York: Wiley, 2002.
- [24] 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.
- [25] M. Mohammadzadeh Kowsari, *Numerical modeling and structural investigation of adsorbent bed with flat-tube heat exchanger in adsorption chillers*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ferdowci University of Mashhad, 2016. (in Persian)
- [26] G. Restuccia, A. Freni, S. Vasta, Y. Aristov, Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modelling, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, No. 3, pp. 284-293, 2004.

u	سرعت (ms^{-1})
w	مقدار مبرد جذب شده در واحد جرم جاذب (kg/kg_b)
w^*	مقدار جذب تعادلی (kg/kg_b)
علایم یونانی	زیرنویس‌ها
ϵ	تخلخل
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
b	بستر جاذب
cham	محفظه
chan	کanal
cs	سطح کنترل
cv	حجم کنترل
f	سیال ناقل گرما
g	فاز گاز

8- مراجع

- B. Choudhury, B. B. Saha, P. K. Chatterjee, J. P. Sarkar, An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling, *Applied Energy*, Vol. 104, pp. 554-567, 2013.
- R. Critoph, Y. Zhong, Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 219, No. 3, pp. 285-300, 2005.
- L. Yong, K. Sumathy, Review of mathematical investigation on the closed adsorption heat pump and cooling systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, No. 4, pp. 305-338, 2002.
- A. Pesaran, H. Lee, Y. Hwang, R. Radermacher, H.-H. Chun, Review article: Numerical simulation of adsorption heat pumps, *Energy*, Vol. 100, pp. 310-320, 2016.
- Y. I. Aristov, Optimal adsorbent for adsorptive heat transformers: dynamic considerations, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 4, pp. 675-686, 2009.
- K. A. Alam, B. Saha, Y. T. Kang, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Heat exchanger design effect on the system performance of silica gel adsorption refrigeration systems, *International Journal of Heat And Mass Transfer*, Vol. 43, No. 24, pp. 4419-4431, 2000.
- M. Louajri, A. Mimet, A. Ouammi, Study of the effect of finned tube adsorber on the performance of solar driven adsorption cooling machine using activated carbon-ammonia pair, *Applied energy*, Vol. 88, No. 3, pp. 690-698, 2011.
- H. Niazimand, 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.