http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۶، اسفند ۱۳۹۱ ص ص ۱۹-۲۹

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۴/۴
پذیرش ۹۱/۵/۱۹
ارائه در سایت ۹۱/۹/۳۰

مطالعه عددی میزان اهمیت مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای در مدلسازی محیط متخلخل بستر چیلرهای جذب سطحی

مهدی مهدوی‌خواه[۱]، حمید نیازمند[۲*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* مشهد ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴، niazmand@um.ac.ir

چکیده- به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد چیلر باید بستر ماده متخلخل جاذب را با استفاده از معادلات حاکم و فرضیات مناسب مدلسازی کرد. یکی از فرض‌هایی که تاثیر زیادی در حجم محاسبات دارد و معادلات حاکم بر بستر را ساده تر می‌کند فرض فشار یکنواخت برای بستر است. برای برخی شرایط مدلسازی بایستی مقدار فشار در بستر محاسبه شود و در واقع نمی‌توان از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد، اما در برخی شرایط می‌توان فرض فشار یکنواخت در بستر را درنظر گرفت و حجم معادلات را تا حد زیادی کاهش داد. در این مطالعه، با مقایسه معادلات حاکم در دو حالت فشار یکنواخت و فشار غیریکنواخت، یک عدد بدون بعد معرفی شده و با مقایسه نتایج، یک مقدار حدی برای آن به‌دست آمده است. با استفاده از این پارامتر قبل از شروع مدلسازی می‌توان پیش‌بینی کرد که آیا نیاز به محاسبه توزیع فشار در بستر وجود دارد یا می‌توان از مقاومت انتقال برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد.

کلیدواژگان: تقریب فشار یکنواخت، چیلر جذب سطحی، مدلسازی، محیط متخلخل

Numerical study of the importance of inter particle mass transfer resistance in the modeling of porous bed of adsorption chillers

M. Mahdavikhah[1], H. Niazmand[2*]

1- MSc., Mech. Eng., Ferdowsi Univ., of Mashhad, Iran
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ., of Mashhad, Iran
* P. O. B. 9177948944 Mashhad, niazmand@um.ac.ir

Abstract- In order to investigate the effect of various parameters on the adsorption chiller performance, the adsorbent bed should be modeled with appropriate governing equations and assumptions. One of the assumptions, which greatly influenced the modeling complexity and computation cost is the uniform pressure approach for the bed. For some of modeling conditions the pressure of the bed should be calculated and the inter particle resistance cannot be neglected. In this study with comparing the governing equations of uniform pressure and non-uniform pressure approach, a dimensionless number is introduced and a limiting value is determined with the help of numerical results. This parameter can be employed to decide about the appropriate bed pressure assumption prior to start the modeling process.

Keywords: Uniform Pressure Approach, Adsorption Chiller, Modeling, Porous Media

۱- مقدمه

سیستم‌های سرمایش جذبی را می‌توان به دو دسته جذب حجمی[1] و جذب سطحی[2] تقسیم‌بندی کرد. در واقع مهم‌ترین تفاوت این دو نوع چیلر در ماده جاذب آن‌ها می‌باشد به این صورت که در چیلرهای جذب حجمی ماده جاذب یک سیال است و ماده جذب‌شونده به صورت حجمی جذب می‌شود، اما در چیلرهای جذب سطحی ماده جاذب ذرات جامد هستند و ماده جذب‌شونده به صورت سطحی جذب می‌شود. چیلر جذب سطحی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است: محفظه‌های جاذب، کندانسور، اواپراتور و شیر اختناق. در کاربردهای صنعتی معمولا از دو محفظه در چیلر استفاده می‌شود به این دلیل عملکرد چیلر با دو محفظه جاذب تشریح می‌شود. در شکل ۱ طرح کلی از یک چیلر جذب سطحی نشان داده شده است.

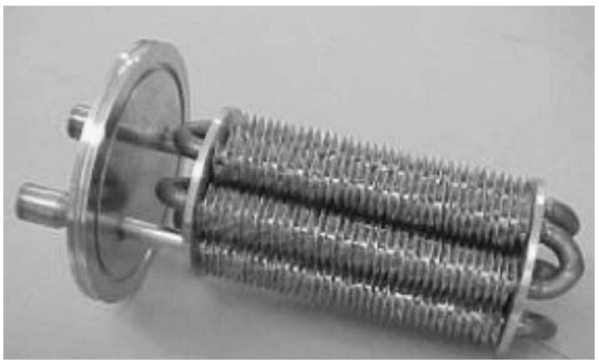
کندانسور

بستر **بستر**

اواپراتور

شکل ۱ شماتیک چیلر جذب سطحی با دو بستر جاذب

در داخل هر محفظه تعدادی مبدل حرارتی وجود دارد که از داخل لوله فلزی سیال حرارتی جریان دارد و اطراف لوله و بین فین‌ها بستر ماده جاذب است که از ذرات جاذب مانند سیلیکاژل پر شده است. در شکل ۱ هر محفظه دارای شش بستر می‌باشد و مناطق هاشورخورده بستر ذرات جاذب را نشان می‌دهد. ابتدا شیرهای ارتباطی بین محفظه‌ها و کندانسور و اواپراتور بسته است و آب گرم وارد لوله فلزی محفظه سمت چپ و آب خنک‌کننده وارد لوله فلزی محفظه سمت راست می‌شود. انتقال حرارت از لوله فلزی و فین‌ها به ذرات جاذب صورت می‌گیرد و بستر ذرات جاذب سمت چپ، که گرم شده است، شروع به احیای سیال عامل می‌کند و فشار محفظه تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد. در همین زمان سردشدن ذرات جاذب در محفظه سمت راست باعث می‌شود سیال عامل در ذرات جذب شده و فشار محفظه تا فشار اواپراتور کاهش یابد. در مرحله بعد شیر بین محفظه سمت چپ و کندانسور و شیر بین محفظه سمت راست و اواپراتور باز می‌شود. در این مرحله جریان آب گرم به داخل لوله‌های محفظه سمت چپ و آب سرد به داخل لوله‌های محفظه سمت راست ادامه می‌یابد. سیال عامل احیاشده در محفظه سمت چپ وارد کندانسور شده و پس از عبور از شیر اختناق و افت فشار وارد اواپراتور می‌شود. با جذب بخار سیال عامل از اواپراتور در محفظه سمت راست یک جریان در سیکل ادامه می‌یابد. این مرحله تا زمانی که هر دو بستر تا نزدیک مقدار اشباع برسند و تقریبا قابلیت جذب و احیا بیشتر سیال عامل را نداشته باشند ادامه می‌یابد. در این زمان در لوله‌های محفظه سمت چپ که تاکنون گرم می‌شد آب سرد و در لوله‌های محفظه سمت راست که تاکنون سرد می‌شد آب گرم جریان می‌یابد. در این مرحله فشار محفظه سمت چپ تا فشار اواپراتور کاهش می‌یابد و فشار محفظه سمت راست تا فشار کندانسور افزایش خواهد یافت و عکس مرحله اول انجام می‌شود. حال شیر بین محفظه سمت راست و کندانسور و شیر بین محفظه سمت چپ و اواپراتور باز شده و عکس مرحله دوم اتفاق می‌افتد. با اتمام این مرحله یک سیکل کامل طی شده است. در شکل ۲ یک نمونه بستر ماده جاذب، که دارای فین‌های حلقوی می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۲ بسترهای ماده جاذب با فین‌های حلقوی که داخل محفظه قرار می‌گیرند

1. Absorption
2. Adsorption

مهم‌ترین قسمت در چیلرهای جذب سطحی که آن‌ها را از سایر چیلرها متمایز می‌کند بستر ماده جاذب است و طراحی درست این قسمت تاثیر زیادی در عملکرد کلی چیلرهای جذب سطحی دارد. یکی از فرض‌هایی که در مطالعات مختلف برای مدلسازی بستر ماده جاذب درنظر گرفته می‌شود فرض فشار یکنواخت در بستر است و این بدین معنی است که از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای در بستر صرف‌نظر شده است. با استفاده از این فرض نیازی به محاسبه توزیع فشار در بستر وجود ندارد و می‌توان از جمله جابه‌جایی در معادله انتقال حرارت صرف‌نظر کرد. به این ترتیب حجم محاسبات تا حد زیادی کاهش می‌یابد. چوا و همکارانش[۱]، با استفاده از تقریب فشار یکنواخت، بستر ماده جاذب روی لوله‌های با فین‌های شعاعی را در مختصات استوانه‌ای مدلسازی کرده‌اند. در این مقاله، علاوه بر مطالعه تغییرات دما و جذب در یک سیکل نسبت به زمان، تاثیر زمان سیکل بر ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد چیلر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. وانگ و همکارانش[۲] با استفاده از حل معادلات حاکم با تقریب فشار یکنواخت برای ذرات سیلیکاژل اطراف لوله دارای فین‌های حلقوی در مختصات استوانه‌ای دو روش مختلف بازیابی حرارت را مقایسه کرده‌اند. در این مطالعه تاثیر دمای آب سردشده و زمان سیکل بر ظرفیت سرمایش و ضریب عملکرد سیستم برای دو روش مختلف بازیابی حرارت و سیکل ساده بررسی شده است. میازاکی و همکارانش[۳] یک زمان سیکل جدید برای بالا بردن راندمان چیلر و کاهش نوسانات آب سردشده سیلیکاژل-آب با دو بستر جاذب پیشنهاد کرده‌اند. ساها و همکارانش[۴] چیلر جذب سطحی را با فرض فشار یکنواخت بستر مدلسازی کرده و تاثیر زمان سیکل و دمای آب گرم را برای دو نوع جاذب RD و SWS-1L بررسی کرده‌اند. ریفل و همکارانش[۵] با استفاده از یک مطالعه عددی در مختصات استوانه‌ای نتایجی با حداکثر ۲۰ درصد خطا به‌دست آورده‌اند و تاثیر دمای آب گرم، آب خنک‌کننده و آب سردشونده را بر عملکرد چیلر محاسبه کرده‌اند. در این مقاله فشار بستر یکنواخت فرض شده و از تغییرات دمایی در جهت شعاعی برای لوله فلزی و سیال حرارتی صرف‌نظر شده و دمای فین یک‌بعدی فرض شده است. لیس و همکارانش[۶] بستر ماده جاذب سیلیکاژل-آب دارای فین‌های طولی را با استفاده از تقریب فشار یکنواخت به صورت دوبعدی در مختصات استوانه‌ای مدلسازی کرده‌اند. ال فادار[۷] با فرض فشار یکنواخت در مختصات استوانه‌ای تاثیر ضخامت ذرات جاذب روی لوله فلزی و دمای منبع حرارتی را بر عملکرد چیلر با جفت جاذب و جذب‌شونده کربن اکتیو و آمونیاک بررسی کرده‌اند. لواجاری و همکارانش[۸] استفاده از جفت کربن اکتیو-آمونیاک برای استفاده از انرژی خورشید را بررسی کرده‌اند. در این مقاله، از مختصات استوانه‌ای استفاده شده و فشار یکنواخت در بستر فرض شده و از انتقال حرارت جابه-جایی در اثر انتقال جرم شعاعی صرف‌نظر شده است.

برخی مطالعات انجام‌شده، علاوه بر فرض توزیع فشار یکنواخت، توزیع دما نیز یکنواخت فرض شده است[۹،۱۰،۱۱]. میازاکی و همکارش[۱۲] چیلر جذب سطحی را با فرض فشار و دمای یکنواخت با استفاده از پارامترهای بدون بعد جهت به‌دست آوردن مقدار بهینه زمان سیکل مدلسازی کرده‌اند. رزک و همکارانش[۱۳] تاثیر فاصله بین فین‌ها را بر عملکرد چیلر جذب سطحی با مبدل حرارتی دارای فین‌های مستطیلی بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که مقدار COP با افزایش فاصله بین فین‌ها مقدار کمی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، مقدار فشار و دما در بستر یکنواخت فرض شده است.

در برخی مطالعات، برای به‌دست آوردن نتایجی دقیق‌تر معادله مومنتوم را برای محاسبه توزیع فشار حل کرده‌اند. در این مطالعات، مقادیر فشار در بستر ماده جاذب محاسبه شده و جمله جابه‌جایی در معادله انرژی درنظر گرفته می‌شود. آنالیز فرایند انتقال در یک ناحیه متخلخل که بر اساس درنظر گرفتن مقاومت برون ذره‌ای باشد پیچیده‌تر است و گاهی اوقات نیاز است معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال حرارت تواما حل شوند. رستوکیا و همکارانش[۱۴] در یک مدلسازی عددی به صورت یک‌بعدی ذرات جاذب زئولیت پوشش داده شده اطراف لوله فلزی بدون فین در چیلر جذب سطحی را مدلسازی کرده‌اند. در این مطالعه، برای محاسبه توزیع فشار در بستر از قانون دارسی استفاده شده است. مارلتا و همکارانش[۱۵]، با استفاده از مطالعه عددی، ذرات جاذب اطراف لوله فلزی بدون فین را به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار داده‌اند و برای محاسبه توزیع فشار داخل بستر از رابطه ارگان استفاده کرده‌اند. در این مطالعه تغییرات پارامترهای مختلف مانند دمای میانگین، توان حرارتی، فشار و مقدار جذب میانگین برای یک

سیکل نسبت به زمان نشان داده شده است. در مرجع [۱۶] تاثیر مقدار بازیابی حرارت بر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص را برای چند پارامتر مختلف بررسی کرده‌اند. در این مطالعه از رابطه دارسی برای محاسبه توزیع فشار در بستر استفاده شده است. فرنی و همکارانش[۱۷] ذرات جاذب زئولیت روی لوله بدون فین را در مختصات استوانه‌ای به صورت یک‌بعدی در امتداد شعاع مدلسازی کرده‌اند. در این مقاله دما و فشار در بستر غیریکنواخت فرض شده و از قانون دارسی به عنوان معادله مومنتوم استفاده شده است. وو و همکارانش[۱۸] مدلسازی دوبعدی را با فرض دما و فشار غیریکنواخت در بستر ذرات زئولیت روی لوله بدون فین و استفاده از قانون دارسی انجام داده‌اند. ژانگ[۱۹] یک مدل سه‌بعدی همراه با محاسبه توزیع فشار را برای ذرات جاذب اطراف یک لوله فلزی با فین‌های طولی در مختصات استوانه‌ای مطالعه کرده است. در این مقاله، از رابطه دارسی برای محاسبه فشار در بستر استفاده شده است. نیازمند و داب‌زاده[۲۰] چیلر جذب سطحی با فین‌های حلقوی را با حل معادلات حاکم بر حوزه‌های مختلف در دستگاه مختصات استوانه‌ای به صورت دوبعدی و تقارن محوری مدلسازی کرده‌اند. همچنین، مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای و درون ذره‌ای درنظر گرفته شده و توزیع فشار در بستر محاسبه شده است.

فرض فشار یکنواخت تنها هنگامی معتبر است که نرخ انتقال حرارت به بستر یا از بستر به قدرکافی کم باشد[۲۳،۲۲]. لیونگ و همکارش[۲۱] بر اساس تحلیل مرتبه بزرگی دو معیار کلی ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد در چه شرایطی می‌توان از فرض فشار یکنواخت در بستر استفاده کرد. یکی از این دو معیار معمولا برای شرایط مختلف ارضا می‌شود، ولی برقراری شرط دوم را که بر اساس مقاومت انتقال جرم کوچک است باید برای شرایط مختلف بررسی کرد. به این منظور یک عدد بدون بعد معرفی شده که به وسیله آن بتوان صحت فرض فشار یکنواخت را محک زد. نکته‌ای که کاربرد عدد بدون بعد ارائه‌شده را محدود می‌نماید این است که مقدار بعضی از پارامترهایی که در رابطه ارائه‌شده وجود دارد قبل از انجام مدلسازی معلوم نیست و بنابراین نمی‌تواند قبل از انجام مدلسازی تعیین کند که آیا می‌توان از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد یا باید توزیع فشار داخل بستر را محاسبه کرد. با توجه به مطالب فوق، تاکنون معیار مناسبی جهت پیش‌بینی میزان اعتبار فرض فشار یکنواخت در بستر چیلرهای جذب سطحی ارائه نشده است که به وسیله آن قبل از شروع مدلسازی بتوان تصمیم گرفت که آیا می‌توان از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد یا خیر. در این مطالعه، با استفاده از آنالیز مرتبه بزرگی دو روش مبتنی بر فرض فشار یکنواخت و فشار متغیر در بستر، یک پارامتر بدون بعد معرفی شده و یک مقدار حدی برای آن بر مبنای مقایسه نتایج عددی در شرایط کارکردی مختلف ارائه شده است. در این رابطه تمام متغیرها قبل از انجام مدلسازی قابل محاسبه می‌باشند و می‌توان تشخیص داد که آیا نیاز است مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای درنظر گرفته شود یا می‌توان از فرض فشار یکنواخت در بستر استفاده کرد و حجم محاسبات را تا حد زیادی کاهش داد.

۲- معادلات حاکم

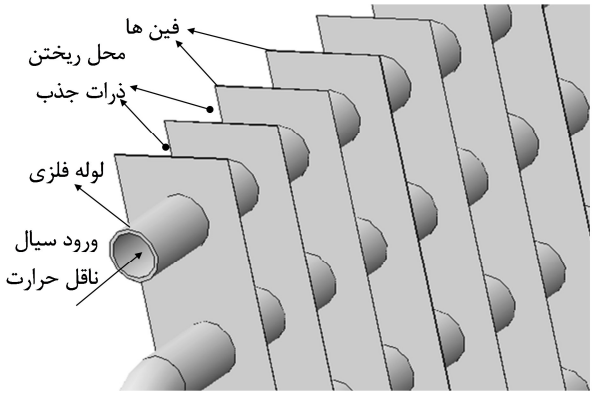
چیلرهای جذب سطحی معمولا از یک یا چند محفظه تشکیل شده است که بستر ماده جاذب داخل آن قرار دارد. برای انتقال حرارت از منبع حرارتی و منبع خنک‌کننده به ذرات جاذب بستر، از سیال حرارتی استفاده می‌شود. سیال حرارتی می‌تواند بین دو صفحه یا بین دو استوانه هم‌مرکز جریان داشته باشد، اما معمولا از داخل لوله عبور می‌کند و بستر ماده جاذب در اطراف لوله قرار دارد. برای افزایش نرخ انتقال حرارت می‌توان داخل بستر فین قرار داد. در هندسه مورد بررسی سیال حرارتی داخل لوله فلزی جریان دارد و هر دو بستر دارای فین‌های حلقوی و مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در شکل ۳ چهار حوزه حل شامل سیال حرارتی، لوله فلزی، فین‌ها و بستر ماده جاذب برای یک مبدل حرارتی، که ذرات جاذب بین فین‌های مستطیلی ریخته می‌شود، نشان داده شده است. با توجه به ظرفیت سرمایش مورد نظر تعداد مشخصی از این مبدل‌ها داخل محفظه‌ها قرار می‌گیرد.

برای مدلسازی سیال حرارتی می‌توان معادلات مربوط به سیال شامل پیوستگی، مومنتوم و انتقال حرارت را همراه با شرایط مرزی مناسب حل کرد. همچنین در اکثر کاربردهای عملی جریان داخل لوله آشفته است و بایستی معادلات توربولانسی نیز حل شوند. حل معادلات کلی برای مدلسازی

باعث افزایش زمان و هزینه خواهد شد و معمولا از تغییرات دما در امتداد مماسی و شعاعی صرف‌نظر می‌شود و تنها معادله انتقال حرارت یک‌بعدی در امتداد جریان درنظر گرفته می‌شود. بنابراین کافی است مقدار انتقال حرارت منتقل‌شده از سیال حرارتی به لوله فلزی با استفاده از عدد ناسلت محاسبه شده و به صورت جمله چشمه در معادله انتقال حرارت لحاظ شود [۱۹،۱۵]. در کاربردهای صنعتی، عدد رینولدز سیال حرارتی داخل لوله بالاست. به عنوان مثال، در این مطالعه کمترین عدد رینولدز حدود ۴۰۰۰ است. با توجه به این مطلب، از انتقال حرارت هدایت در مقابل انتقال حرارت جابه‌جایی در امتداد محور لوله فلزی صرف‌نظر شده است. برای اطمینان از صحت این فرض یک آنالیز مقیاسی انجام گرفت و مشاهده شد مقدار انتقال حرارت هدایت در امتداد لوله بسیار کوچک‌تر از انتقال حرارت جابه‌جایی در امتداد لوله است. برای محاسبه توزیع دما در جسم لوله فلزی بایستی معادله انتقال حرارت هدایت در مختصات استوانه‌ای حل شود. در این مطالعه، معادله به صورت سه‌بعدی درنظر گرفته شده است، اما با توجه به ناچیزبودن تغییرات در امتداد شعاعی و مماسی می‌توان با حل یک‌بعدی معادله نتایجی با دقت مناسب به‌دست آورد. همچنین مقدار حرارت منتقل‌شده از لوله فلزی به فین‌ها به صورت جمله چشمه در حجم کنترل‌هایی که فین روی آن‌ها قرار گرفته لحاظ شده است.

در این مطالعه، از روش حجم کنترل برای حل معادله سه‌بعدی لوله فلزی استفاده شده است و در صورتی که از معادله یک‌بعدی استفاده شود باز هم می‌توان با استفاده از روش حجم کنترل معادله را حل کرد. ضخامت فین‌ها در اکثر کاربردهای صنعتی در حدود ۰/۲ تا ۰/۳mmاست و در این مطالعه مقدار ۰/۲mm درنظر گرفته شده است. با توجه به ضخامت کم فین‌ها، می‌توان از تغییرات دما در امتداد عمود بر صفحه فین (در جهت محور لوله) صرف‌نظر کرد. همچنین برای محاسبه فشار در محفظه که در واقع فضای خالی اطراف بستر می‌باشد، در مراحل جرم ثابت از روابط ترمودینامیکی استفاده شده و فشار و دما نسبت به مکان در هر گام زمانی یکنواخت درنظر گرفته شده است. با محاسبه شدت جریان جرمی خروجی از بستر که وارد محفظه شده و با استفاده از معادله پیوستگی در محفظه، مقدار چگالی سیال عامل موجود در محفظه به‌دست می‌آید و در نهایت با استفاده از رابطه گاز کامل، مقدار فشار محفظه در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. مقدار فشار محفظه در مراحل فشار ثابت گرمایش و سرمایش به‌ترتیب برابر فشار کندانسور و اواپراتور می‌باشد.



شکل ۳ چهار حوزه حل برای مبدل حرارتی با فین‌های مستطیلی

همان‌طور که اشاره شد، برای مدلسازی بستر ماده جاذب می‌توان از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد که در این صورت نیازی به محاسبه توزیع فشار در بستر نمی‌باشد. برای حل معادلات حاکم، از روش حجم کنترل استفاده شده است. فرضیات زیر برای مدلسازی بستر درنظر گرفته شده است:

- بستر جاذب از ذراتی با اندازه یکنواخت پر شده که دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند. در نمونه‌های تجربی از یک بازه برای قطر ذرات استفاده می‌شود. بنابراین، در واقعیت محیطی کاملا ایزوتروپ وجود ندارد، اما این فرض در تمامی مطالعاتی که روی بستر ماده جاذب چیلرهای جذب سطحی انجام شده درنظر گرفته می‌شود. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی نشان داده است این فرض برای شرایط بستر چیلر مورد قبول می‌باشد.
- اتلاف حرارت در سیکل جذب وجود ندارد.
- مقاومت حرارتی تماسی بین سطوح حرارتی و بستر ناچیز فرض شده است.
- تخلخل بستر یکنواخت فرض شده است.
- به استثنای چگالی سیال عامل، سایر خواص سیال عامل، مواد جاذب و سیال جذب‌شده ثابت درنظر گرفته می‌شود.
- سیال عامل در فاز جذب‌شده به صورت مایع و در فاز احیاشده به صورت بخار دارای رفتار گاز ایدئال فرض شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بستر با فرض فشار یکنواخت

معادله انرژی برای بستر ماده جاذب شامل جمله وابسته به زمان، جمله انتقال حرارت هدایت و جمله جذب می‌باشد. با استفاده از فرض توزیع فشار یکنواخت جمله جابه‌جایی در معادله انتقال حرارت حذف می‌شود.

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} d\forall = \int_{cs} \left(\lambda_b \vec{\nabla} T_b\right).\overrightarrow{dA} + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} d\forall \quad (۱)$$

که در آن جمله آخر گرمای جذب می‌باشد.

$$\rho C_p = \varepsilon_t(\rho_g C_{pg}) + \rho_b(C_{pb} + wC_{pa}) \quad (۲)$$

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

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1-\varepsilon_b)\varepsilon_p \quad (۳)$$

برای محاسبه شدت جریان جرمی خروجی از بستر معادله بقای جرم کلی برای بستر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{m}_g = -\left[\varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial w}{\partial t}\right] \forall_b \quad (۴)$$

۲-۲- معادلات حاکم بستر با فرض فشار غیریکنواخت

در رابطه انرژی، برای حالتی که مقدار مقاومت انتقال جرم درنظر گرفته می‌شود، جمله جابه‌جایی لحاظ خواهد شد و معادله حاکم به صورت زیر می‌باشد.

$$\int_{cv} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} d\forall + \int_{cs} \left(\rho_g\, C_{pg} \vec{u}_g\, T_b\right).\overrightarrow{dA} = \int_{cs} \left(\lambda_b \overrightarrow{\nabla} T_b\right).\overrightarrow{dA} + \int_{cv} \rho_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} d\forall \quad (۵)$$

موازنه جرم برای سیال عامل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} d\forall + \int_{cs} \left(\rho_g \vec{u}_g\right).\overrightarrow{dA} + \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} d\forall = 0 \quad (۶)$$

در این مطالعه از رابطه دارسی به عنوان معادله مومنتوم استفاده شده است[۲۴]. رابطه دارسی تنها برای جریان‌های ویسکوز با سرعت پایین مناسب است. این رابطه برای اعداد رینولدز بستر کوچک‌تر از یک دارای اعتبار است. در حوزه مورد مطالعه مقدار عدد رینولدز کوچک‌تر از یک می‌باشد و بنابراین رابطه دارسی برای مدلسازی انتخاب شده است. روابط دقیق‌تر مانند دارسی برینکمن و دارسی توسعه‌یافته دقت نتایج را مقدار ناچیزی افزایش خواهد داد، اما به دلیل پیچیدگی زیادی که در حل معادلات وارد می‌کند و اینکه رابطه دارسی دارای اعتبار می‌باشد در این مطالعه از رابطه دارسی استفاده شده است.

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu_g} \vec{\nabla} P \quad (۷)$$

که در آن μ_g لزجت سیال عامل در فاز بخار و K_{app} نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب است[۲۶،۲۵]:

$$K_{app} = K_d + \frac{\varepsilon_p \mu_g}{\tau P} D_{ek} \quad (۸)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon_b)^2} \quad (۹)$$

$$D_{ek} = (1/D_m + 1/D_k)^{-1} \quad (۱۰)$$

$$D_m = 0.02628 \frac{\sqrt{{T_b}^3/M}}{P\sigma^2\Omega} \quad (۱۱)$$

$$D_k = 48.5 d_{Pore}\sqrt{T_b/M} \quad (۱۲)$$

$$d_{Pore} = 0.6166\, d_P \quad (۱۳)$$

مقدار شدت جریان جرمی خروجی از بستر در هر گام زمانی با انتگرال‌گیری از شدت جریان جرمی خروجی از حجم کنترل‌های روی سطح توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_g = \int_{interface} \rho_g \vec{u}_g.\overrightarrow{dA} \quad (۱۴)$$

در این روابط w مقدار جذب در هر لحظه می‌باشد که توسط رابطه نیرو محرکه خطی به شکل زیر محاسبه می‌شود و در واقع مقاومت درون ذره‌ای برای جذب و احیای سیال عامل را لحاظ می‌کند.

$$\frac{dw}{dt} = 15 D_{so} exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right)/R_P^2(w^* - w) \quad (۱۵)$$

که در آن w^* جذب تعادلی در دمای T_b و فشار P است.

۲-۳- شرایط اولیه

برای حل معادلات نیاز است شرایط اولیه در تمام حوزه‌های حل معلوم باشد. برای دمای حوزه‌های مختلف شامل سیال

حرارتی، لوله فلزی، فین‌ها، بستر و محفظه مقدار دمای سیال خنک‌کننده و برای فشار بستر و محفظه، فشار اواپراتور به عنوان شرایط اولیه درنظر گرفته شده است. مقادیر اولیه جذب و چگالی سیال عامل با استفاده از روابط مربوطه و با استفاده از مقادیر دما و فشار اولیه محاسبه شده‌اند. با توجه به اینکه توزیع دما و فشار در ابتدای هر سیکل مشخص نیست، حل معادلات با مقادیر اولیه شروع می‌شود و پس از حل چند سیکل نتایج حالت پایدار سیکلی به‌دست می‌آید؛ به این معنی که نتایج دو سیکل متوالی با هم یکسان می‌شوند.

۲-۴- شرایط مرزی

سیال حرارتی: در این مطالعه از انتقال حرارت در دو امتداد مماسی و شعاعی صرف‌نظر شده و از انتقال حرارت هدایت در مقابل انتقال حرارت جابه‌جایی در امتداد محور لوله نیز صرف-نظر شده است. بنابراین، تنها یک شرط مرزی برای دمای ورودی سیال حرارتی کافی است. برای دمای ورودی لوله، در صورتی که سیکل در مراحل گرمایش باشد، دمای آب گرم و در صورتی که در مراحل سرمایش باشد دمای آب خنک‌کننده درنظر گرفته می‌شود.

لوله فلزی: با توجه به اینکه از یک معادله انتقال حرارت هدایت سه‌بعدی در مختصات استوانه‌ای استفاده شده است، شش شرط مرزی برای حل معادله نیاز می‌باشد. برای دو صفحه فصل مشترک لوله فلزی با بستر و سیال حرارتی شرط مرزی بقای شار حرارتی و تساوی دما در مرز و برای چهار مرز دیگر مقدار گرادیان دما برابر صفر درنظر گرفته شده است.

فین‌ها: با توجه به کم‌بودن ضخامت فین‌ها، می‌توان از تغییرات دما در امتداد عمود بر صفحه فین صرف‌نظر کرد. بنابراین، برای فین‌های حلقوی که در مختصات استوانه‌ای می‌باشد، نیاز به دو شرط مرزی و برای فین‌های مستطیلی که در مختصات عمومی حل می‌شوند نیاز به چهار شرط مرزی وجود دارد. شرط مرزی برای مرز مشترک بین لوله فلزی و فین‌ها به صورت بقای شار حرارتی و تساوی دما در مرز درنظر گرفته شده و برای مرزهای دیگر شرط گرادیان دما برابر صفر فرض شده است.

بستر: برای معادله موازنه جرم، به جز برای صفحه فصل مشترک بستر و محفظه که شرط مرزی فشار برابر فشار محفظه می‌باشد، برای بقیه مرزها، تغییرات فشار عمود بر صفحه صفر درنظر گرفته شده است. در معادله انرژی، به جز برای صفحات فصل مشترک با فین‌ها و لوله فلزی که از شرط مرزی بقای شار حرارتی استفاده شده، برای بقیه مرزها، شرط گرادیان دما عمود بر صفحه برابر صفر درنظر گرفته شده است.

۳- معیار برای اعتبار فرض فشار یکنواخت

با استفاده از فرض فشار یکنواخت، حجم محاسبات تا حد زیادی کاهش می‌یابد، اما مقداری خطا در محاسبات وارد می‌شود. در صورتی که نتایج حاصل از حل معادلات در هر دو حالت فشار یکنواخت و فشار غیریکنواخت یکسان باشد، می‌توان گفت فرض فشار یکنواخت در بستر دارای اعتبار است و مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای ناچیز می‌باشد. در حل معادلات بستر هدف نهایی محاسبه شدت جریان جرمی خروجی از بستر، که در واقع سیال عامل در گردش سیکل تبرید است، می‌باشد. بنابراین، برای بررسی صحت فرض فشار یکنواخت و مقایسه نتایج، مقدار شدت جریان جرمی خروجی از بستر در دو حالت بر مبنای تحلیل مقیاسی تخمین زده شده‌اند. بنابراین:

$$\int_{interface} \rho_g \vec{u}_g . \overrightarrow{dA} \sim - \left[\varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} \right] \forall_b \quad (۱۶)$$

با استفاده از یک تحلیل مقیاسی می‌توان نشان داد:

$$\varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \ll \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} \quad (۱۷)$$

در این رابطه مقدار ε_t و w از نظر مقدار تقریبا دارای یک مقیاس می‌باشند (حدود ۰/۴)، اما مقدار چگالی بستر به مراتب بیشتر از چگالی سیال عامل در فاز گاز می‌باشد. بنابراین، جمله سمت راست بسیار بزرگ‌تر از جمله سمت چپ است. بنابراین می‌توان از جمله اول در مقابل جمله دوم سمت راست معادله ۱۶ صرف‌نظر کرد و رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\int_{interface} \rho_g \vec{u}_g . \overrightarrow{dA} \sim - \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} \forall_b \quad (۱۸)$$

با استفاده از رابطه گاز کامل و رابطه دارسی و پس از قرار دادن مقادیر مقیاسی (مشخصه) برای کمیات مربوطه، رابطه (۱۹) به‌دست می‌آید.

$$- \frac{P_{eq}}{R_g T_{eq}} \frac{P_{eq}}{\delta} \frac{K_{app}}{\mu_g} A \sim - \rho_b \frac{w_\infty}{t_{cycle}} \forall_b \quad (۱۹)$$

در این رابطه t_{cycle} زمان سیکل است. با استفاده از رابطه به‌دست آمده به شکل زیر می‌توان یک عدد بدون بعد به‌دست

آورد که می‌تواند در سنجش اعتبار فرض فشار یکنواخت مورد استفاده قرار گیرد. در واقع، این رابطه تنها پارامترهای تاثیرگذار و میزان اهمیت آن‌ها را معین می‌کند. بنابراین، برای تعیین مقدار عددی بازه پارامتر C، که بتوان در آن بازه از فرض فشار یکنواخت استفاده کرد، بایستی نتایج حاصل از دو حالت فشار یکنواخت و فشار متغیر مقایسه شوند.

$$C = \frac{\rho_b \frac{w_\infty}{t_{cycle}} \forall_b}{\frac{P_{eq}}{R_g T_{eq}} \frac{P_{eq}}{\delta} \frac{K_{app}}{\mu_g} A} \qquad (۲۰)$$

$$C = \frac{\rho_b w_\infty \forall_b R_g T_{eq} \delta \mu_g}{P_{eq}^2 K_{app} t_{cycle} A} \qquad (۲۱)$$

در این روابط δ طول معادل بستر است و برابر با طول میانگین مسیری است که سیال عامل باید در بستر طی کند تا از بستر خارج شود. به عنوان مثال، این مقدار برای ذرات جاذب اطراف لوله فلزی برابر ضخامت لایه جاذب روی لوله است. $\forall_b$ حجم بستر و A مساحت سطحی است که سیال عامل احیا در بستر از آن خارج شده و وارد محفظه می‌شود.

به منظور اطمینان از صحت عملکرد پارامتر به‌دست آمده در پیش‌بینی تاثیر پارامترهای مختلف در میزان خطای واردشده از فرض فشار یکنواخت در نتایج، مقدار پارامتر C برای حدود ۵۰ مورد مختلف با شرایط مختلف و تغییر پارامترهای موثر با فرض فشار یکنواخت و فشار متغیر مقایسه شده‌اند. این مقایسه برای هر دو نوع فین‌های استوانه‌ای و مستطیلی انجام شده و در جدول ۱ بازه برخی از پارامترها، که برای چک‌کردن رابطه به‌دست آمده تغییر داده شده، آورده شده است.

جدول ۱ حوزه تغییرات برخی پارامترها

پارامتر	نماد	واحد	حداقل	حداکثر
قطر ذرات	d_P	mm	۰/۰۶	۰/۸
طول معادل بستر	δ	mm	۴	۳۲
فشار اواپراتور	P_{evap}	Pa	۱۰۰۰	۵۶۰۰
فشار کندانسور	P_{cond}	Pa	۱۷۰۰	۹۴۰۰
جذب حداکثر	w_∞	kg/kg	۰/۳	۰/۸
چگالی بستر	ρ_b	kg/m^3	۷۰۰	۱۴۰۰
زمان سیکل	t_{cycle}	S	۴۰۰	۱۲۰۰۰

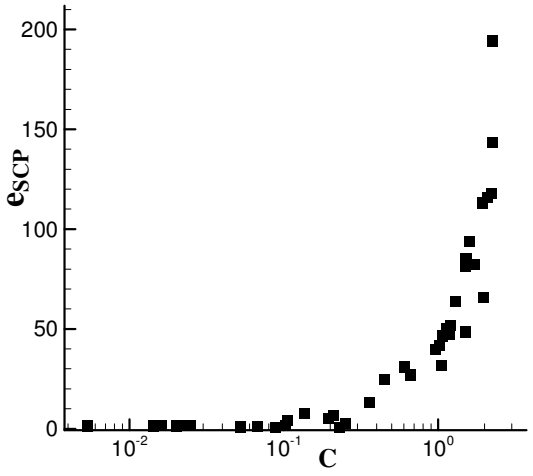
علاوه بر تغییر در این پارامترها، مقادیر ابعاد لوله فلزی، فاصله بین فین‌ها و جنس آن‌ها، شدت جریان جرمی سیال حرارتی، لزجت سیال عامل و تخلخل بستر نیز تغییر داده شده است تا تاثیر کلیه پارامترها بر مقدار خطا نشان داده شود.

در طراحی چیلرهای جذب سطحی، علاوه بر ضریب عملکرد پارامتر ظرفیت سرمایش مخصوص نیز از اهمیت زیادی برخوردار است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_b \times t_{cycle}} \qquad (۲۲)$$

در این رابطه Q_{evap} ظرفیت سرمایش و m_b جرم ماده جاذب است. مقدار خطا در ظرفیت سرمایش مخصوص برای فرض فشار یکنواخت که توسط رابطه زیر محاسبه شده نسبت به پارامتر C در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$e_{SCP} = \frac{\left|SCP_{non-uniform} - SCP_{uniform}\right|}{SCP_{non-uniform}} \qquad (۲۳)$$



شکل ۴ مقدار خطا در ظرفیت سرمایش مخصوص نسبت به پارامتر C

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای شرایط مدلسازی که در آن‌ها معیار C □۰/۱ برقرار باشد، اختلاف ناچیزی بین نتایج حاصل از مدلسازی با فرض فشار یکنواخت و مدلسازی با فرض فشار متغیر وجود دارد و در شرایطی که C □۰/۱ می‌باشد باید توزیع فشار در بستر محاسبه شود. با توجه به اینکه تاثیر تمامی پارامترهای درگیر در مسئله با تغییر در مقدار آن‌ها لحاظ شده، می‌توان گفت در عدد بدون بعد به‌دست آمده تاثیر تمامی پارامترها به‌خوبی نشان داده شده است. همچنین، این رابطه تاثیر تغییر در پارامترهایی که مستقیما در عدد بدون بعد مشاهده نمی‌شود را نیز به‌خوبی نشان می‌دهد.

در رابطه (۲۱)، P_{eq} و T_{eq} به‌ترتیب فشار و دمای معادل است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

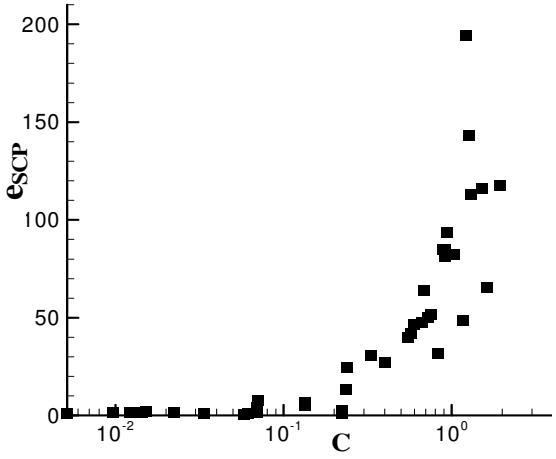
$$P_{eq} = \frac{P_{evap} t_{ads} + P_{cond} t_{des}}{t_{cycle}} \quad (۲۴)$$

$$T_{eq} = \frac{T_{cooling} t_{ads} + T_{heating} t_{des}}{t_{cycle}} \quad (۲۵)$$

که در آن t_{ads} زمان مراحل جذب و t_{des} زمان مراحل احیاست. در صورتی که مقادیر زمان جذب و احیا معین نباشد، با استفاده از یک تقریب اولیه به صورت زیر می‌توان مقادیر دما و فشار معادل را به‌دست آورد. در صورت استفاده از این معادلات، شکل ۵ حاصل می‌شود.

$$P_{eq} = \frac{P_{evap} + P_{cond}}{2} \quad (۲۶)$$

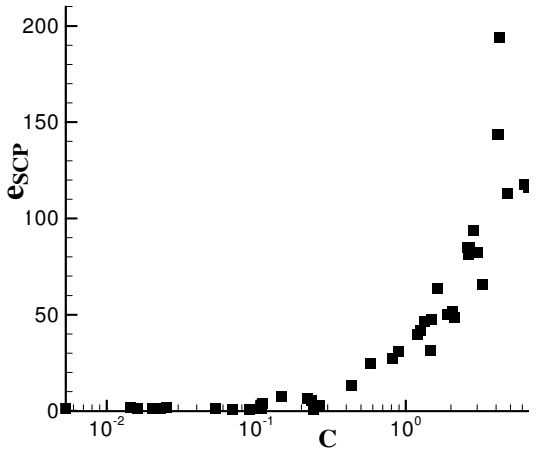
$$T_{eq} = \frac{T_{cooling} + T_{heating}}{2} \quad (۲۷)$$



شکل ۵ مقدار خطا با استفاده از رابطه تقریبی دما و فشار معادل

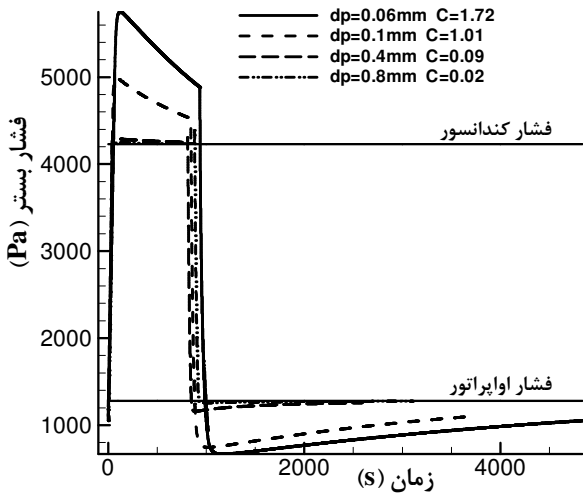
مقدار K_{app} با قراردادن دما و فشار معادل در روابط (۱۲) و (۱۱) توسط رابطه (۸) محاسبه می‌شود. برای به‌دست آوردن مقدار تقریبی نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب می‌توان تنها از رابطه (۹) استفاده کرد و از جمله دوم در معادله (۸) صرف‌نظر کرد. در صورت استفاده از مقدار تقریبی برای نفوذپذیری ظاهری بستر نتایج شکل ۶ حاصل خواهد شد.

یکی از پارامترهایی که تاثیر زیادی بر توزیع فشار داخل بستر دارد قطر ذرات جاذب می‌باشد. هرچه قطر ذرات جاذب کوچک‌تر باشد، مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای در بستر بیشتر شده و باعث می‌شود اختلاف فشار بیشتری در بستر وجود داشته باشد و فرض فشار یکنواخت از اعتبار کمتری برخوردار باشد. در عوض هرچه قطر ذرات جاذب بیشتر باشد، سیال احیاشده یا جذب شده با مقاومت کمتری از بین ذرات حرکت می‌کند و فشار یکنواخت‌تری در بستر وجود خواهد داشت. در شکل ۷ مقدار فشار میانگین بستر نسبت به زمان برای قطرهای مختلف ذرات جاذب با ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود فشار میانگین در قطرهای بزرگ‌تر مقدار کمتری از فشار ثابت کندانسور یا اواپراتور انحراف دارد و نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر فشار در بستر است. همچنین، مشاهده می‌شود در نمونه نشان داده شده برای قطر بیشتر از ۰/۴mm که C □ ۰/۱ است، فشار میانگین بستر انحراف زیادی نسبت به فشار ثابت کندانسور و اواپراتور دارد و نمی‌توان از فشار ثابت کندانسور یا اواپراتور برای بستر استفاده کرد.



شکل ۶ مقدار خطا با استفاده از رابطه تقریبی برای نفوذپذیری ظاهری بستر

شرایط نشان داده شده در شکل ۷ برای جفت جاذب و جذب‌شونده سیلیکاژل-آب است و مشاهده شد فرض فشار یکنواخت در بستر برای قطر ذرات بزرگ‌تر از ۰/۴mm دارای اعتبار می‌باشد. همان‌طور که در معادله (۲۱) مشاهده می‌شود، در صورتی که فشار کاری بستر بالاتر باشد، فرض فشار یکنواخت در قطرهای کوچک‌تر هم دارای اعتبار می‌باشد. به عنوان نمونه، جفت سیلیکاژل-آب در فشار حدود ۲۰۰۰ Pa کار می‌کند، در حالی که جفت کربن اکتیو-آمونیاک در فشار حدود 1×10^{6} Pa می‌باشد. بنابراین برای جفت کربن اکتیو-آمونیاک فرض فشار یکنواخت با شرایط مشابه شکل ۷ برای قطرهای کوچک‌تر نیز دارای اعتبار می‌باشد.



شکل ۷ مقدار فشار میانگین بستر برای قطرهای مختلف، P_{eq}=2000 Pa

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پس از مقایسه معادلات حاکم بر بستر ماده جاذب که در واقع یک محیط متخلخل است، در صورتی که از فشار غیریکنواخت استفاده شود یا فشار در بستر یکنواخت فرض شود، یک پارامتر بدون بعد به‌دست آمده است. سپس، با مقایسه نتایج حاصل از فشار یکنواخت و فشار غیریکنواخت برای بستر، یک مقدار حدی معرفی شد که قبل از مدلسازی می‌توان از آن در انتخاب معادلات حاکم بر بستر استفاده کرد. با مقایسه نتایج برای حدود ۵۰ شرایط مختلف، مشاهده شد هنگامی که مقدار پارامتر بدون بعد به‌دست آمده کمتر از ۰/۱ باشد، می‌توان از فرض فشار یکنواخت استفاده کرد. در رابطه به‌دست آمده تاثیر تمامی پارامترها به‌خوبی نشان داده شده است و می‌توان از آن برای شرایط مختلف استفاده کرد. در شرایطی که فشار کندانسور و اواپراتور بالاتر است، فرض فشار یکنواخت در قطرهای کوچک‌تر نیز دارای اعتبار می‌باشد. مثلا برای جفت جاذب کربن اکتیو-آمونیاک که فشار کاری بالاتر دارد، در قطرهای پایین تر از حد اعتبار فرض فشار یکنواخت در جفت سیلیکاژل-آب می‌توان از مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای صرف‌نظر کرد.

۵- علایم و نشانه‌ها

A	مساحت (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)
D_k	پخشندگی نودسن (m^2/s)
D_m	پخشندگی کانتینیوم (m^2/s)
d_p	قطر ذرات جاذب (m)
E_a	انرژی فعال‌سازی (J/kg)
K_{app}	نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب (m^2)
K_d	نفوذپذیری بستر (m^2)
M	جرم مولکولی (kg/mol)
P	فشار (Pa)
SCP	ظرفت سرمایش مخصوص (w/kg)
t	زمان(s)
T	دما (K)
U	سرعت (m/s)

علائم یونانی

ΔH	گرمای جذب (J/kg)
ε	تخلخل
λ	ضریب انتقال حرارت هدایت $(W.m.K^{-1})$
μ	ویسکوزیته $(N/m.s)$
σ	قطر برخورد

زیرنویس‌ها

a	ماده جذب‌شده
ads	مراحل جذب
b	بستر ماده جاذب
$cond$	کندانسور
des	مراحل احیا
$evap$	اواپراتور
f	سیال حرارتی
g	فاز بخار سیال عامل احیا شده
p	ذره جاذب
t	مقدار کلی

۶- مراجع

[1] Chua H., Ng K., Wang W., Yap C., Wang X., "Transient Modeling of a Two-Bed Silica Gel-Water Adsorption Chiller", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 659-669.

[2] Wang X., Chua H. T., "A Comparative Evaluation of Two Different Heat-Recovery Schemes as

Applied to a Two-Bed Adsorption Chiller", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2007, pp. 433-443.

[3] Miyazaki T., Akisawa A., Saha B., El-Sharkawy I., Chakraborty A., "A New Cycle Time Allocation for Enhancing the Performance of Two-Bed Adsorption Chillers", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, 2009, pp. 846-853.

[4] Saha B. B., Chakraborty A., Koyama S., Aristov Y. I., "A New Generation Cooling Device Employing Cacl2-in-Silica Gel-Water System", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 516-524.

[5] Riffel D., Wittstadt U., Schmidt F., Belo F., Leite A., Ziegler F., "Transient Modeling of an Adsorber using Finned-Tube Heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp. 1473-1482.

[6] Ilis G. G., Mobedi M., Ülkü S., "A Dimensionless Analysis of Heat and Mass Transport in an Adsorber with Thin Fins; Uniform Pressure Approach", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, 2011, pp. 790-797.

[7] El Fadar A., Mimet A., Perez-Garc M., "Modelling and Performance Study of a Continuous Adsorption Refrigeration System Driven by Parabolic Trough Solar Collector", *Solar Energy*, Vol. 83, 2009, pp. 850-861.

[8] Louajari M., Mimet A., Ouammi A., "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, 2011, pp. 690-698.

[9] Di J., Wu J., Xia Z., Wang R., "Theoretical and Experimental Study on Characteristics of a Novel Silica Gel-Water Chiller under the Conditions of Variable Heat Source Temperature", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, 2007, pp. 515-526.

[10] Habib K., Saha B. B., Chakraborty A., Koyama S., Srinivasan K., "Performance Evaluation of Combined Adsorption Refrigeration Cycles", *international journal of refrigeration*, Vol. 34, 2011, pp. 129-137.

[11] Miyazaki T., Akisawa A., Saha B. B., "The Performance Analysis of a Novel Dual Evaporator Type Three-Bed Adsorption Chiller", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, 2010, pp. 276-285.

[12] Miyazaki T., Akisawa A., "The Influence of Heat Exchanger Parameters on the Optimum Cycle Time of Adsorption Chillers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 2708-2717.

[13] Rezk A. R. M., Al-Dadah R. K., "Physical and Operating Conditions Effects on Silica Gel/Water Adsorption Chiller Performance", *Appl. Energy*, Vol. 89, 2012, pp. 142-149.

[14] Restuccia G., Freni A., Maggio G., "A Zeolite-Coated Bed for Air Conditioning Adsorption Systems: Parametric Study of Heat and Mass Transfer by Dynamic Simulation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, 2002, pp. 619-630.

[15] Marletta L., Maggio G., Freni A., Ingrasciotta M., Restuccia G., "A Non Uniform Temperature Non-Uniform Pressure Dynamic Model of Heat and Mass Transfer in Compact Adsorbent Beds", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 45, 2002, pp. 3321-3330.

[16] Leong K. C., Liu Y., "System Performance of a combined heat and Mass Recovery Adsorption Cooling Cycle: A Parametric Study", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, 2006, pp. 2703-2711.

[17] Freni A., Bonaccorsi L., Proverbio E., Maggio G., Restuccia G., "Zeolite Synthesised on Copper Foam for Adsorption Chillers: A Mathematical Model", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 120, 2009, pp. 402-409.

[18] Wu W., Zhang H., Sun D., "Mathematical Simulation and Experimental Study of a Modified Zeolite 13X-Water Adsorption Refrigeration Module", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 645-651.

[19] Zhang L., "A Three-Dimensional Non-Equilibrium Model for an Intermittent Adsorption Cooling System", *Solar energy*, Vol. 69, 2000, pp. 27-35.

[20] Niazmand H., Dabzadeh I., "Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in Adsorbent Beds with Annular Fins", *International Journal of Refrigeration,* Vol. 35, 2012, pp. 581-593.

[21] Li Yong, Sumathy K., "Comparison between Heat Transfer and Heat Mass Transfer Models for Transportation Process in an Adsorbent Bed", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 1587-1598.

[22] Hajji A., khalloufi S., "Theoretical and Experimental Investigation of a Constant-Pressure Adsorption Process", *heat and mass transfer*, Vol. 38, 1995, pp. 3349-3358.

[23] Hajji A., khalloufi S., "Improving the Performance of Adsorption Heat Exchangers using a Finned Structure", *heat and mass transfer*, Vol. 39, 1996, pp. 1677-1686.

[24] Leong K., Liu Y., "Numerical Modeling of Combined Heat and Mass Transfer in the Adsorbent Bed of a Zeolite/Water Cooling System", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, 2004, pp. 2359-2374.

[25] Demir H., Mobedi M., Ülkü S., "Effects of Porosity on Heat and Mass Transfer in a Granular Adsorbent Bed", *Int Commun Heat and Mass Tranf*, Vol. 36, 2009, pp. 372-377.

[26] Do D., *Adsorption analysis: equilibria and kinetics*, Vol. 2, Imperial College Press, London, 1998.