



شبیه‌سازی عددی تأثیر افزایش انتقال حرارت در بستر جاذب بر عملکرد سیستم جذب سطحی

میلاذ آذر فر¹، حمید نیازمند^{2*}، هدی طالبیان³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948944، niazmand@um.ac.ir

چکیده

با توجه به نگرانی فزاینده جامعه جهانی نسبت به افزایش مشکلات زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، توجه به سیستم‌های جذب سطحی در چند دهه گذشته افزایش یافته است. از اصلی‌ترین مشکلات این سیستم‌ها، ضعیف بودن انتقال حرارت در بستر جاذب به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن می‌باشد. در این مطالعه سعی شده است با مدل‌سازی عددی، تأثیر روش‌های بهبود انتقال حرارت در بستر جاذب بر عملکرد سیستم جذب سطحی بررسی شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به بکارگیری سطوح حرارتی گسترش یافته و افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب اشاره کرد. به کارگیری ذرات فلزی باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر بستر به میزان حداقل 100% می‌شود. نتایج نشان می‌دهند با کاهش فاصله و ارتفاع فین‌ها و نیز افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب زمان سیکل به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، که در نهایت موجب افزایش ظرفیت سرمایشی مخصوص سیستم جذب سطحی می‌شوند؛ هر چند که با کاهش فاصله فین‌ها تأثیر افزایش ذرات فلزی بر کاهش زمان سیکل و افزایش ظرفیت سرمایش مخصوص تضعیف می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند با افزایش ارتفاع فین‌ها ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی افزایش یافته در حالی که ظرفیت سرمایش مخصوص آن کاهش می‌یابد. از طرفی کاهش فاصله فین‌ها هم‌زمان باعث افزایش ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم جذب سطحی می‌گردد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 اسفند 1392

پذیرش: 18 فروردین 1393

ارائه در سایت: 26 شهریور 1393

کلیدواژگان:

انتقال حرارت

ضریب هدایت حرارتی

ذرات فلزی

جذب سطحی

زمان سیکل

Numerical simulation of heat transfer enhancement effect in adsorbent bed on the performance of adsorption system

Milad Azarfar¹, Hamid Niazmand^{2*}, Hoda Talebian³

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- 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 08 March 2014
Accepted 07 April 2014
Available Online 17 September 2014

Keywords:
Heat transfer
Thermal conductivity coefficient
Metal pieces
Adsorption
Cycle time

ABSTRACT

During the past few decades, growing global concern about environmental problems, caused by widespread use of fossil fuels, attracts more research attention toward adsorption systems technology. However, one of the main problems of these systems is the poor heat transfer rate in adsorbent bed due to its low thermal conductivity. In the present study, extended surfaces and metal piece additives are applied to the adsorbent bed in order to numerically investigate the effect of heat transfer enhancement on the adsorption system performance. Employing metal pieces increases effective thermal conductivity of the bed by at least 100%. Results indicate that decreasing fin space and fin height and adding metal pieces to the adsorbent bed reduce the cycle time which finally improves the system specific cooling power. However, it is worth mentioning that the effect of metal piece additives on the cycle time reduction and specific cooling power improvement decreases at smaller fin spaces. Moreover, results show that the increase of fin height improves the coefficient of performance while decreases the specific cooling power of the system. On the contrary, the reduction of fin space simultaneously increases the coefficient of performance and the specific cooling power of the adsorption system.

1- مقدمه

سیستم‌های جذب سطحی به دلیل بهره‌گیری از انرژی‌های هدر رفته و انرژی‌های تجدید پذیر نظیر انرژی خورشیدی و همچنین استفاده از مبردهایی سازگار با محیط زیست، در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند.

افزایش تقاضا برای مصرف انرژی، افزایش آلاینده‌ها و تخریب لایه اوزون به یکی از دغدغه‌های جهان امروز تبدیل شده است. بنابراین محققان در تلاش برای یافتن سیستم‌ها با کارایی بالاتر و سازگار با محیط زیست می‌باشند.

Please cite this article using:

M. Azarfar, H. Niazmand, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سیستم حاوی سیلیکاژل-متانول به ترتیب 16/3% و 24/2% در قیاس با سیلیکاژل بهبود می‌یابد.

با توجه به انتقال حرارت غیر پیوسته در بستر جاذب به دلیل وجود فضاهای خالی میان ذرات جاذب و پایین بودن ضریب انتقال هدایت حرارتی ماده جاذب، برای بهبود انتقال حرارت در بستر، علاوه بر روش‌های ذکر شده می‌توان با افزودن مواد مختلف نظیر ذرات فلزی به بستر جاذب ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب را افزایش و به کمک آن انتقال حرارت در بستر را بهبود بخشید [14]. دمیر [15] در یک مطالعه تجربی با استفاده از ماده جاذب سیلیکاژل در یک بستر استوانه‌ای و قرار دادن آن در یک حمام آب، به بررسی تغییرات دمایی بستر جاذب در حضور ذرات فلزی پرداخته است. نتایج وی نشان می‌دهد که افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب می‌تواند ضریب هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی آن‌را به ترتیب تا 24% و 157% افزایش دهد؛ بنابراین انتقال حرارت در بستر جاذب بهبود یافته و تغییرات دمایی بستر در بازه زمانی کوچک‌تری رخ می‌دهد. با این وجود دمیر تأثیر حضور ذرات فلزی بر پارامترهای عملکردی سیستم جذب سطحی نظیر ظرفیت سرمایشی مخصوص و ضریب عملکرد سیستم را بررسی نکرده است. پنگ و همکارانش [16] تأثیر به‌کارگیری کامپوزیت آلومینیوم-زئولیت را در یک سیستم جذب سطحی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با این روش ضریب هدایت حرارتی بستر افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد که زمان سیکل کاهش و ظرفیت سرمایشی مخصوص سیستم افزایش می‌یابد. رزک و همکارانش [17] تأثیر بهبود انتقال حرارت در بستر جاذب را بر ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم‌های جذب سطحی مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب می‌توان علاوه بر بهبود ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب، ظرفیت سرمایشی مخصوص را تا 25% بهبود داد. با این حال رزک از مقاومت برون ذره‌ای ذرات بستر جاذب صرف-نظر، و توزیع فشار را در بستر جاذب یکنواخت فرض کرده است.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم جذب سطحی باید بستر ماده متخلخل جاذب را با استفاده از معادلات حاکم و فرضیات مناسب مدل‌سازی کرد. یکی از فرض‌هایی که تأثیر زیادی در حجم محاسبات دارد و معادلات حاکم بر بستر را ساده‌تر می‌کند فرض فشار یکنواخت برای بستر است. اما از آنجایی که این مدل، قابلیت کاربرد در شرایط کلی را ندارد؛ لذا نمی‌تواند در بررسی تأثیر بسیاری از پارامترهای بستر بر کارایی سیستم، مورد استفاده قرار گیرد [18,19]. هم‌چنین همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد استفاده از سطوح حرارتی گسترش یافته یک روش مفید برای بهبود انتقال حرارت در سیستم جذب سطحی می‌باشد؛ با این حال این روش نمی‌تواند مقاومت حرارتی و انتقال حرارت غیر پیوسته بین ذرات جاذب را کاهش دهد. بهره‌گیری از ذرات فلزی در بستر جاذب می‌تواند یک روش مناسب برای بهبود نفوذ و هدایت حرارتی بستر جاذب باشد [15]. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی تأثیر بهبود انتقال حرارت ناشی از استفاده هم‌زمان از سطوح حرارتی گسترش یافته و ذرات فلزی در بستر جاذب بر روی سیستم جذب سطحی می‌باشد. بدین منظور با در نظر گرفتن توزیع فشار غیر یکنواخت در بستر جاذب، مدل عددی سه بعدی برای توصیف سیستم جذب سطحی ارائه می‌شود تا با به حداقل رسیدن فرضیات مدل سازی دقت نتایج افزایش یابد.

2- شرح سیستم

شکل 1 نمایی از یک سیستم جذب سطحی با یک بستر جاذب می‌باشد.

ضعیف بودن انتقال حرارت در بستر جاذب را می‌توان از اصلی‌ترین معایب سیستم‌های جذب سطحی دانست. مطالعات متعددی در زمینه بهبود انتقال حرارت و جرم در بستر جاذب انجام شده است و راه‌کارهایی نظیر استفاده از سطوح حرارتی گسترش یافته، به کارگیری مواد جاذب با کارایی بهتر و بهره‌گیری از سیکل‌های ترمودینامیکی موثرتر ارائه شده‌اند [3,1].

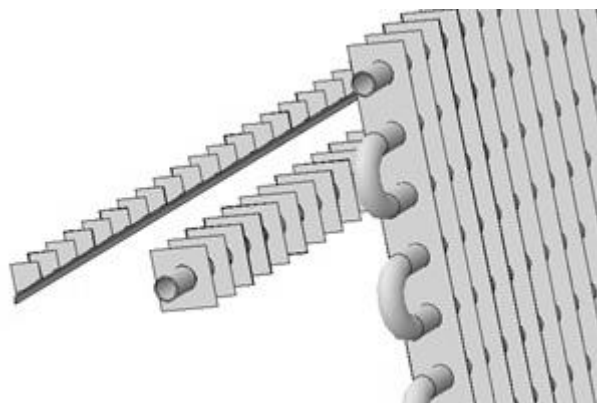
نیازمند و داب‌زاده [4] تأثیر سطوح حرارتی گسترش یافته را بر روی ضریب عملکرد و توان سرمایش مخصوص سیستم‌های جذب سطحی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تعداد فین ضریب عملکرد سیستم کاهش یافته در حالی که ظرفیت سرمایشی مخصوص افزایش می‌یابد. رزک [5] به کمک مدل‌سازی عددی به بررسی تأثیر فاصله فین‌ها بر عملکرد یک چیلر جذب سطحی پرداخته است. نتایج وی نشان می‌دهد که با کاهش فاصله فین‌ها و یا به عبارتی دیگر با افزایش تعداد فین‌ها، تعداد واحدهای انتقال¹ بستر جاذب افزایش یافته و از طرفی دیگر نسبت ظرفیت گرمایشی ماده جاذب به فین‌ها نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین ظرفیت سرمایشی چیلر تا حدود 3% افزایش می‌یابد.

لو و وانگ [6] تأثیر بازیابی جرم و حرارت را بر روی یک سیستم تهویه جذب سطحی بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند بهبود عملکرد سیستم جذب سطحی با کمک بازیابی جرم و حرارت تابع پارامترهای مختلفی از قبیل اختلاف فشار بین بستر جاذب در حال احیا و جذب، دمای احیا و جذب و نیز مدت زمان بازیابی جرم و حرارت می‌باشد. با این وجود نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که می‌توان با این روش ضریب عملکرد سیستم را بهبود بخشیده و آن‌را از 0/47 به 0/53 رساند. لئونگ [7] نیز در مطالعه‌ای نشان داد با به کارگیری بازیابی جرم و حرارت می‌توان ضریب عملکرد سیستم را 47% افزایش داد. دمیر [8] به بررسی تأثیر به کارگیری امواج مایکروویو جهت تامین گرمایش لازم در فرایند احیا، بر عملکرد سیستم جذب سطحی با جفت جاذب و جذب شونده سیلیکاژل-آب پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با به کارگیری امواج مایکروویو انرژی گرمایی به طور مستقیم و بی‌واسطه توسط میرد دریافت می‌گردد بنابراین در انرژی و زمان صرفه‌جویی می‌گردد. بدین ترتیب در این سیستم‌ها زمان سیکل تا 20% کاهش می‌یابد. دمیر نیز نشان داد که می‌توان با استفاده از امواج مایکروویو در فرایند احیا، میزان ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی را 61% بهبود بخشید.

تاکنون چندین ماده جاذب مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته‌اند. در این بین ماده جاذب سیلیکاژل به دلیل تخلخل بالا، خصوصیات جذبی پایدار و هزینه پایین به عنوان یکی از محبوب‌ترین ماده‌های جاذب به شمار می‌رود [9]. با این وجود انتقال حرارت ضعیف در سیلیکاژل باعث کاهش میزان جذب در بستر جاذب می‌شود که در نهایت از ظرفیت سرمایشی مخصوص کاسته می‌شود [11,10].

طالبیان و همکارانش [12] تأثیر قطر ذرات جاذب را بر عملکرد سیستم جذب سطحی بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد قطر بهینه ذرات جاذب متناظر با حداکثر ظرفیت سرمایشی مخصوص، تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل ابعاد فین و دمای آب گرم و خنک کننده می‌باشد؛ به طوری که با افزایش دمای آب گرم و خنک کننده قطر بهینه ذرات جاذب افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش ارتفاع و فاصله فین قطر بهینه آن به مقدار کمی کاهش می‌یابد. ژیا و همکارانش [13] در یک مطالعه تجربی به مقایسه ماده جاذب سیلیکاژل-متانول با سیلیکاژل خالص پرداخته‌اند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت سرمایشی مخصوص و ضریب عملکرد

1- Number of Transfer Units (NTU)



شکل 2 نمایی از مبدل حرارتی و حوزه مربوط به مدل‌سازی عددی

جدول 1 مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شرایط اصلی [21]

واحد	مقدار	علامت	پارامتر
mm	10	D_i	قطر داخلی لوله فلزی
mm	12	D_o	قطر خارجی لوله فلزی
mm	0/2	FT	ضخامت فین
mm	32	FH	ارتفاع فین
mm	8	FS	فاصله بین فین‌ها
kgm^{-3}	700	ρ_b	چگالی بستر
$Jkg^{-1}K^{-1}$	924	C_{pb}	ظرفیت گرمایی ویژه بستر
-	0/36	ϵ_b	تخلخل بستر
-	0/46	ϵ_p	تخلخل ذرات
$kJkg^{-1}$	2760	ΔH	گرمای جذب
K	283/15	T_{evap}	دمای اواپراتور
K	363/15	$T_{heating}$	دمای گرمایش
K	303/15	$T_{cooling}$	دمای خنک‌کاری
kgs^{-1}	0/03	\dot{m}_t	نرخ جریان جرمی سیال ناقل حرارت

در این مطالعه بستر جاذب به عنوان یک مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای با مقطع مربع شکل در نظر گرفته شده است. ذرات جاذب بستر از کامپوزیتی از سیلیکازل می‌باشد. همچنین لوله فلزی از جنس مس و فین‌ها آلومینیومی می‌باشند. آب به عنوان سیال عامل جذب شده در بستر جاذب، سیال ناقل حرارت و سیال درون کندانسور و اواپراتور، انتخاب شده است. در جدول 1 مقادیر متناظر با پارامترهای به کار رفته در مدل‌سازی عددی ارائه شده است.

3-1- فرضیات

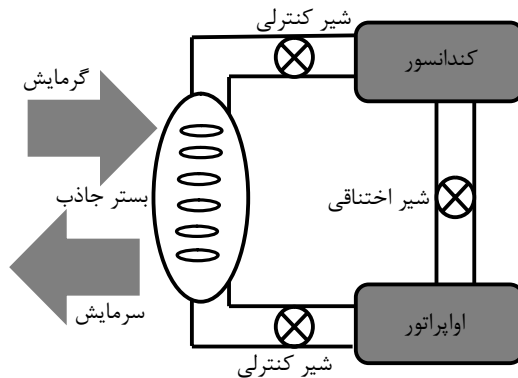
- به منظور حل معادلات حاکم در سیستم مذکور فرضیاتی در نظر گرفته شده که عبارتند از:
- تمامی ذرات ماده جاذب کروی شکل بوده و دارای تخلخل و اندازه یکسان می‌باشند.
- سیال عامل در فاز جذب شده به صورت مایع و در فاز احیا شده به صورت بخار با رفتار گاز کامل فرض شده است.
- اتلاف حرارت از بستر جاذب صفر فرض می‌شود. همچنین تأثیر انتقال حرارت تابشی در بستر چشم‌پوشی می‌گردد.
- کندانسور و اواپراتور به صورت ایده‌آل فرض می‌شوند.
- به استثنای چگالی سیال عامل، سایر خواص سیال عامل، خواص سیال ناقل انرژی، لوله فلزی، فین‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

کندانسور، اواپراتور، بستر جاذب، شیرهای کنترلی و اختناقی اجزای اصلی سیستم‌های جذب سطحی می‌باشند. بستر جاذب نوعی مبدل حرارتی است که ذرات جاذب متخلخل موجود در آن می‌توانند با جذب گرما سیال عامل را احیا و با دفع گرما آنرا جذب نمایند. به این ترتیب سیال عامل بدون صرف هیچ‌گونه توان مکانیکی در سیکل به گردش در می‌آید و بستر جاذب به عنوان کمپرسور حرارتی سیستم عمل می‌کند [3,20].

سیکل جذب سطحی از چهار فرایند تشکیل می‌گردد. در مرحله ابتدایی (گرمایش جرم ثابت) شیرهای کنترلی بسته می‌باشند. در همین زمان بستر جاذب توسط سیال حامل انرژی گرم شده و در مدت زمان اندکی، فشار بستر جاذب در اثر احیای سیال عامل به فشار کندانسور می‌رسد. سپس در مرحله دوم (گرمایش فشار ثابت) در حالی که همچنان بستر جاذب گرم می‌شود، شیر کنترلی بین کندانسور و بستر جاذب باز گردیده و سیال احیا شده در فشار ثابت به کندانسور وارد می‌شود. در این مرحله فشار بخار بستر جاذب ثابت مانده و تنها دمای آن بالا می‌رود. سیال عامل در کندانسور پس از تقطیر شدن از طریق شیر اختناقی وارد اواپراتور می‌شود. در نهایت زمانی که میزان سیال احیا شده به حد معینی برسد، شیرهای کنترلی همگی دوباره بسته شده و مرحله سوم (سرمايش جرم ثابت) آغاز می‌گردد. در این مرحله برخلاف مرحله آغازین، بستر جاذب توسط سیال حامل انرژی سرد شده و فشار بستر جاذب در مدت زمان کوتاهی در اثر جذب سیال عامل به فشار اواپراتور می‌رسد. مرحله نهایی (سرمايش فشار ثابت) با باز شدن شیر کنترلی بین اواپراتور و بستر جاذب، شروع می‌گردد. در این مرحله بستر جاذب همچنان در حال سرد شدن می‌باشد. بنابراین سیال عامل در فشار ثابت جذب شده و این امر باعث ایجاد خلاء در بستر جاذب می‌شود. به علت مکش ایجاد شده، سیال عامل تبخیر شده در اواپراتور وارد بستر جاذب شده و جذب آن می‌گردد. پس از جذب درصد معینی از سیال عامل در مواد جاذب، شیرکنترلی بین بستر و اواپراتور بسته شده تا با شروع مرحله‌ی گرمایش جرم ثابت، سیکل از سر گرفته شود.

3-2- مدل‌سازی عددی

حوزه مدل‌سازی عددی شامل بستر جاذب، فین‌ها، لوله فلزی و سیال ناقل حرارت می‌باشد. برای حل معادلات حاکم در بستر جاذب از دستگاه مختصات عمومی به صورت سه بعدی استفاده می‌شود. مدل‌سازی کامل بستر جاذب به دلیل حجم بالای محاسبات و تعداد زیاد شبکه مورد نیاز امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین با توجه به شکل 2، به دلیل وجود تقارن می‌توان معادلات حاکم را تنها برای یک چهارم اطراف یک لوله حل نمود و حجم محاسبات را تا حد قابل توجهی کاهش داد.



شکل 1 شمایی از سیستم جذب سطحی با یک بستر جاذب

3-2- معادلات حاکم

به منظور مدل‌سازی عددی بستر جاذب می‌بایست تمامی معادلات حاکم بر حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی، فین‌ها و مواد جاذب به صورت هم‌زمان حل گردند.

3-2-1- سیال ناقل حرارت

در معادله انرژی حاکم بر سیال ناقل حرارت با توجه به بزرگ بودن عدد رینولدز، از جمله هدایت نسبت به جمله جابه‌جایی در امتداد محور لوله فلزی صرف‌نظر شده است. بنابراین معادله انرژی به صورت یک بعدی و در امتداد محور طولی لوله فلزی حل می‌گردد [22]. طبق رابطه (1) داریم:

$$\int_{cv} \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_f C_{pf} \vec{U} T_f) dV = -Q_{fluid-tube} \quad (1)$$

گرمای منتقل شده از سیال ناقل حرارت به لوله فلزی به صورت رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$Q_{fluid-tube} = -h_f A (T_{fluid} - T_{tube-wall}) \quad (2)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی¹ بین سیال و جدار داخلی لوله فلزی با کمک مقدار ناسلت به دست می‌آید. طبق رابطه (3) داریم:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^m \quad (3)$$

در معادله 3، ضریب m برای فاز سرمایش و گرمایش به ترتیب عبارت است از 0/3 و 0/4 [23].

3-2-2- لوله فلزی

با به کارگیری مختصات استوانه‌ای معادله انرژی برای لوله به صورت سه بعدی و گذرا حل شده است [22]. طبق رابطه (4) داریم:

$$\int_{cv} \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial t} dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_t \nabla T_t) dV + Q_{tube-fin} \quad (4)$$

3-2-3- فین

با توجه به ضخامت ناچیز فین‌ها انتقال حرارت هدایت در آن به صورت دو بعدی در صفحه عمود بر محور طولی لوله فلزی در نظر گرفته شده است. این معادله با توجه به هندسه فین‌ها در دستگاه مختصات عمومی حل شده است [22]. طبق رابطه (5) داریم:

$$\int_{cv} \rho_{fin} C_{fin} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_{fin} \nabla T_{fin}) dV + Q_{tube-fin} \quad (5)$$

3-2-4- بستر ماده جاذب

مدل‌سازی بستر جاذب شامل ذرات متخلخل، سیال عامل جذب شده در آن‌ها و حرکت بخار احیا شده در بین ذرات است. در اکثر مطالعات گذشته از فرض توزیع فشار یکنواخت در بستر جاذب استفاده شده است. با این وجود استفاده از این روش نمی‌تواند برای تمامی شرایط، نتایج مطلوب را به دست آورد [18,19]. بنابراین با وجود افزایش قابل توجه حجم محاسبات، در این مطالعه توزیع فشار غیر یکنواخت در بستر جاذب فرض شده است. به عبارتی دیگر مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای نیز در نظر گرفته شده است. معادله انرژی حاکم بر بستر جاذب به صورت رابطه (6) است [22].

$$\int_{cv} (\rho_{sg,w} C_{sg,w} + x \rho_m C_m) \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_g C_{pg} \vec{U} T_b) dV = \int_{cv} \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T_b) dV + \int_{cv} (1-x) \rho_b C_b \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (6)$$

در معادله انرژی w معرف مقدار جذب در هر لحظه می‌باشد که می‌توان آن را توسط رابطه نیرو محرکه خطی² به صورت زیر محاسبه نمود. در واقع این معادله مقاومت انتقال جرم درون ذره‌ای را در جذب و احیا سیال عامل، اعمال می‌کند. طبق رابطه (7) داریم:

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

که در آن w^* جذب تعادلی در دما و فشار بستر می‌باشد [24,25].

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت در بستر جاذب، افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب می‌باشد. این روش ضریب هدایت حرارتی بستر جاذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب برای محاسبه λ_{eff} ، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب می‌توان از رابطه ارائه شده توسط همیلتون برای مخلوط‌های دو فازی استفاده نمود [27,26]. طبق رابطه (8) داریم:

$$\lambda_{eff} = \frac{k_{sg} [k_m + (n-1)k_{sg} - (n-1)x(k_{sg} - k_m)]}{k_m + (n-1)k_{sg} + x(k_{sg} - k_m)} \quad (8)$$

که در آن ضریب n تابع هندسه ذرات فلزی مورد استفاده می‌باشد [17]. خصوصیات فیزیکی ذرات فلزی استفاده شده در بستر جاذب در جدول 2 ارائه شده است.

معادله پیوستگی برای سیال عامل [22] طبق رابطه (9) عبارت است از:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{cv} \nabla \cdot (\rho_g \vec{U}_g) dV = \int_{cv} (x-1) \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (9)$$

سرعت سیال عامل در بستر ماده جاذب توسط قانون دارسی محاسبه می‌گردد [28,22]. طبق رابطه (10) داریم:

$$\vec{U}_g = -\frac{k_{app}}{\mu} \nabla P \quad (10)$$

در نهایت از رابطه گاز کامل برای محاسبه مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده می‌توان استفاده نمود [4]. طبق رابطه (11) داریم:

$$P = \rho_g R_g T_b \quad (11)$$

3-3- عملکرد سیستم

در سیستم جذب سطحی ظرفیت سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد به صورت روابط (12) و (13) تعریف می‌شوند:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (12)$$

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_b t_{cycle}} \quad (13)$$

3-4- شرایط مرزی

معادله انرژی حاکم بر سیال ناقل حرارت به صورت یک بعدی و در امتداد محور طولی لوله فلزی حل می‌گردد؛ بنابراین تنها یک شرط مرزی نیاز دارد. لذا دمای سیال ورودی به لوله فلزی برای مراحل گرمایش و سرمایش به ترتیب برابر با دمای آب گرم و آب خنک کننده در نظر گرفته می‌شود.

در سایر معادلات انرژی در سطوح مشترک بین بستر، لوله فلزی و فین‌ها شرط مرز دمایی به صورت بقای شار حرارتی فرض می‌شود. در حالی که در سایر مرزها گرادیان دمایی صفر در نظر گرفته می‌شود.

جدول 2 خصوصیات فیزیکی ذرات فلزی اضافه شده به بستر جاذب [17,15]

نوع فلز	λ_m (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kgm ⁻³)	C_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	n
آلومینیوم	237	2702	903	1/031
مس	401	8933	385	1/047

2- Linear driven force

1- Heat transfer coefficient

منظور برای جملات زمانی از طرح تفاضل پیش‌رو³ و برای جملات جابه‌جایی و پخش⁴ از طرح تفاضل مرکزی⁵ استفاده شده است. در نهایت معادلات به کمک روش ADI⁶ و استفاده از الگوریتم حل ماتریس سه قطری⁷، به صورت هم‌زمان حل شده‌اند.

3-6- شبکه بندی حوزه حل

برای حل معادلات نواحی بین فین‌ها، سیال ناقل حرارت، لوله فلزی و فین‌ها شبکه‌بندی می‌شوند. در شکل 3 نحوه شبکه‌بندی حوزه حل ارائه شده است. شبکه‌بندی سیال ناقل حرارت و لوله فلزی در مختصات استوانه‌ای صورت گرفته است. با این وجود به دلیل هندسه خاص فین‌های صفحه‌ای، استفاده از مختصات دستگاه عمومی و شبکه‌بندی در این مختصات اجتناب‌ناپذیر است. تعداد شبکه برای ناحیه بین دو فین در امتداد محور لوله فلزی $12 \times 12 \times 6$ می‌باشد. با انتخاب این تعداد شبکه برای ناحیه بین دو فین تنها 2% خطا نسبت به شبکه ریزتر با تعداد $24 \times 24 \times 12$ وارد محاسبات می‌شود. با توجه به شکل 3 تعداد شبکه در امتداد محور لوله فلزی برای سیال ناقل حرارت و لوله فلزی برابر با تعداد شبکه برای ناحیه متخلخل بین دو فین می‌باشد.

از آن‌جا که در مراحل جرم ثابت، تغییرات فشار و دمایی بستر شدید می‌باشد، بنابراین گام زمانی باید به قدر کافی کوچک باشد. اما در مراحل فشار ثابت تغییرات فشار و دما آهسته‌تر می‌باشد. بنابراین گام زمانی برای این مراحل بزرگ‌تر انتخاب شده است. با انتخاب گام زمانی $0/04$ ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی $0/2$ ثانیه برای مراحل فشار ثابت، نتایجی با اختلاف 0/1% نسبت به گام زمانی دو برابر کوچک‌تر ایجاد می‌شود.

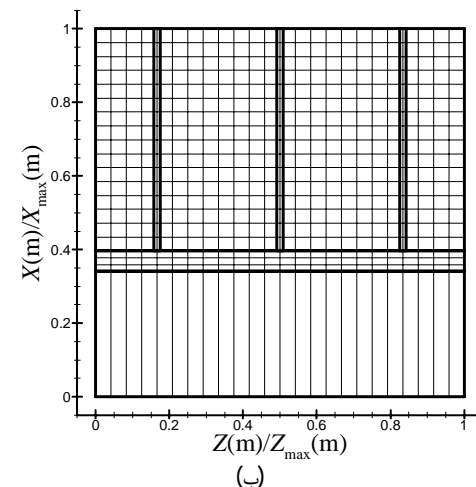
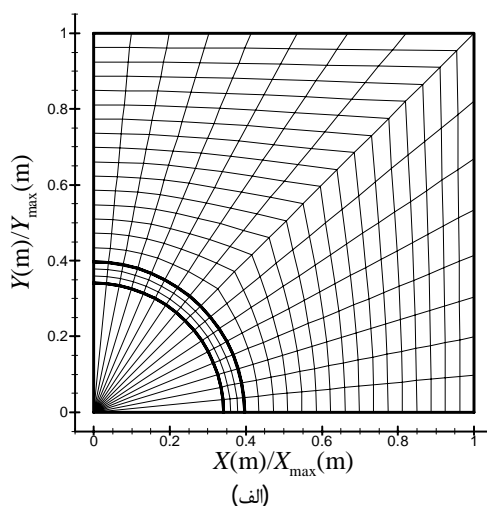
3-7- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت و دقت مدل‌سازی عددی نیاز است تا نتایج عددی با داده‌های یک نمونه تجربی مقایسه شود لذا اعتبارسنجی این مطالعه با تطبیق شرایط هندسی و عملکردی بستر مدل شده با نمونه آزمایشگاهی رستوکیا و همکارانش [29] انجام شده است.

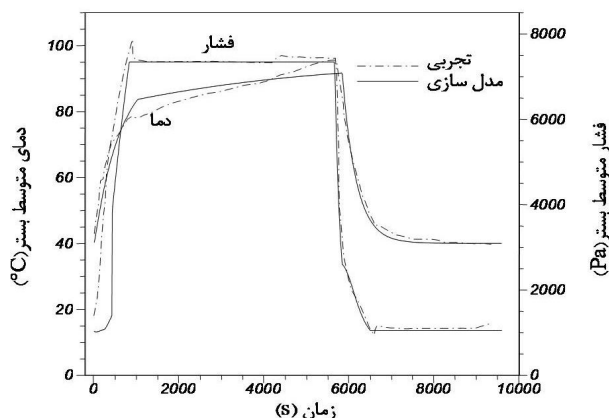
در این مطالعه تجربی از یک چیلر جذب سطحی با یک بستر جاذب استفاده شده است. مبدل حرارتی این سیستم از 8 ردیف لوله، تشکیل شده است. تعداد فین‌های حلقوی به کار رفته در هر ردیف 50 عدد و از جنس فولاد ضدزنگ می‌باشد. ارتفاع و فاصله فین‌ها به ترتیب 34mm و 7mm است. همچنین از ماده سلیکاژل به عنوان جاذب در بستر استفاده شده است. دمای آب گرم ورودی به سیستم 95°C و دمای آب خنک کننده 40°C می‌باشد.

در شکل 4 تغییرات دما و فشار میانگین بستر جاذب در مدت زمان یک سیکل کاری در نمونه آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی حاضر مقایسه شده است. با توجه به ساده‌سازی‌ها، فرضیات اعمال شده و نیز تعداد زیاد پارامترهای موثر در مدل‌سازی عددی، مشاهده می‌شود نتایج حل عددی دقت قابل قبولی دارد به طوری که در پیش‌بینی دما حداکثر خطا، حدود 6% می‌باشد.

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، می‌توان با افزودن ذرات فلزی ضریب هدایت حرارتی بستر را بهبود بخشید. برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی موثر بستر در این شرایط می‌توان از رابطه 8، بهره برد. صحت نتایج حاصل از این رابطه با نتایج مطالعه تجربی، توسط رزک و همکارانش [17] بررسی شده است.



شکل 3 شبکه‌بندی حوزه حل در دو صفحه عمود برهم



شکل 4 تغییرات دمای متوسط بستر در طول یک سیکل کاری در مدل عددی و مقایسه با نتایج تجربی

در نهایت برای معادله پیوستگی حاکم بر بستر جاذب، شرط مرزی فشار در فصل مشترک بستر با محفظه برابر با فشار محفظه، و در سایر مرزها تغییرات فشار در جهت عمود بر صفحه صفر فرض می‌شود.

3-5- روش گسسته‌سازی و حل معادلات

مجموعه معادلات انتگرالی حاکم بر حوزه حل، با استفاده از روش حجم کنترل¹ و طرح کاملاً ضمنی² به معادلات جبری گسسته می‌شوند. بدین

2- Fully implicit scheme
3- Forward differencing scheme
4- Diffusion
5- Central differencing scheme
6- Alternating direction implicit
7- Tri-diagonal solver algorithm

1- Control volume

جدول 3 مقادیر ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب برای درصدهای وزنی مختلف از ذرات فلزی

نوع ترکیب مواد موجود در بستر	λ_m (W / mK)	λ_{eff} (W / mK)	زمان مرحله اول (ثانیه)	زمان مرحله دوم (ثانیه)	زمان مرحله سوم (ثانیه)	زمان مرحله چهارم (ثانیه)
سیلیکاژل	-	0/1	67	1568	58	4446
سیلیکاژل با 5% وزنی آلومینیوم	237	0/251	57	1025	53	3311
سیلیکاژل با 10% وزنی آلومینیوم	237	0/420	54	868	52	3007
سیلیکاژل با 15% وزنی آلومینیوم	237	0/608	53	786	51	2879
سیلیکاژل با 5% وزنی مس	401	0/201	59	1125	53	3504
سیلیکاژل با 10% وزنی مس	401	0/313	56	962	52	3160
سیلیکاژل با 15% وزنی مس	401	0/438	54	874	51	2981

4- نتایج

برای بهبود ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب ذرات فلزی آلومینیوم و مس با درصدهای وزنی مختلف به بستر جاذب افزوده شده‌اند. در جدول 3 نتایج حاصل از حضور ذرات فلزی در بستر جاذب به ازای درصدهای وزنی مختلف ارائه شده است.

با توجه به جدول 3 مشاهده می‌شود که در صورت اضافه کردن ذرات فلزی، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. به طوری که با افزودن 5% وزنی ذرات فلزی آلومینیوم و مس به بستر جاذب، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب به ترتیب 151% و 101% بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش درصد وزنی ذرات فلزی، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب نیز افزایش می‌یابد. به طور مثال با افزایش درصد وزنی از 5% به 15% برای ذرات فلزی آلومینیوم و مس، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر به ترتیب 142% و 118% افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش ضریب هدایت حرارتی بستر مربوط به ذرات فلزی آلومینیوم با درصد وزنی برابر با 15% می‌باشد. با این وجود متناسب با افزایش میزان ذرات فلزی به بستر جاذب، میزان ماده جاذب نیز کاهش می‌یابد، که می‌تواند تأثیری منفی در عملکرد سیستم جذب سطحی داشته باشد [15].

همان‌گونه که در جدول 3 مشاهده می‌شود، بیشترین افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب به ازای یک درصد وزنی مشخص از ذرات فلزی، مربوط به ذرات آلومینیوم می‌باشد. این در حالی است که ذرات مس در قیاس با آلومینیوم ضریب هدایت حرارتی بزرگ‌تری دارند. با در نظر داشتن معادله 8 مشخص است که ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب، علاوه بر ضریب هدایت حرارتی ذرات فلزی، تابع شکل، اندازه و درصد حجمی (چگالی) ذرات فلزی نیز می‌باشد. بنابراین می‌توان کوچک‌تر بودن ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب برای ذرات مس در قیاس با آلومینیوم را ناشی از متفاوت بودن سایر پارامترها مذکور در معادله 8 دانست.

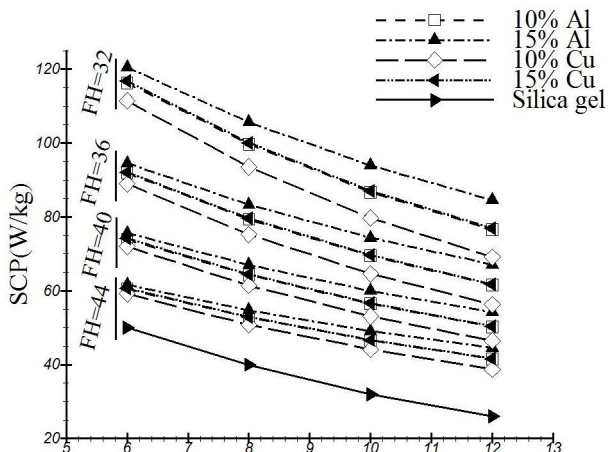
یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم جذب سطحی دارد، میزان جذب سیال عامل در ذرات جاذب است. از آن‌جا که بستر جاذب در مرحله گرمایش فشار ثابت به کندانسور و در مرحله سرمایش فشار ثابت به اواپراتور متصل است و به دلیل پایین بودن فشار و دما در اواپراتور نسبت به کندانسور، فرایند جذب در مرحله چهارم با سرعت کم‌تری نسبت به فرایند احیا در مرحله دوم انجام می‌گیرد، بنابراین در این مطالعه به منظور بهبود عملکرد سیستم، مدت زمان مراحل فشار ثابت بر اساس رسیدن به درصد معینی از جذب نهایی بستر تعیین شده است [30]. بدین ترتیب با توجه به جدول 3 مشخص است که زمان مرحله چهارم در قیاس با سایر مراحل طولانی‌تر می‌باشد. همچنین از آن‌جا که شرط خروج از مرحله گرمایش و سرمایش جرم ثابت به ترتیب رسیدن فشار محفظه جاذب به فشار کندانسور و فشار اواپراتور می‌باشد و با توجه به بسته بودن کلیه شیرهای متصل به

محفظه جاذب در این مراحل، زمان آن‌ها بسیار کوتاه است. با این وجود با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب و افزایش درصد وزنی آن‌ها، مشاهده می‌شود که زمان مراحل چهارگانه کاهش یافته و این کاهش برای مراحل دوم و چهارم در قیاس با مراحل اول و سوم بسیار بیشتر می‌باشد. به طور مثال زمان مرحله چهارم در حضور ذرات مس با درصدهای وزنی 5%، 10% و 15% به ترتیب 21%، 29% و 33% کاهش می‌یابد. با حضور ذرات فلزی و افزایش درصد وزنی آن‌ها، ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب افزایش یافته و به دنبال آن انتقال حرارت در بستر جاذب بهبود می‌یابد. بنابراین بر واضح است که با حضور ذرات فلزی و افزایش درصد وزنی آن‌ها، زمان مراحل چهارگانه کاهش یابد.

همچنین با توجه به اینکه ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب در حضور ذرات آلومینیوم در قیاس با ذرات مس، افزایش بیشتری را به ازای درصدهای وزنی مختلف دارا می‌باشد، بنابراین زمان سیکل در حضور ذرات آلومینیوم در تمامی مراحل چهارگانه، نسبت به ذرات مس کاهش بیشتری دارد. در شکل‌های 5 و 6 تغییرات زمان یک سیکل کامل بر حسب ارتفاع و فاصله فین‌ها رسم شده است. با کاهش فاصله فین‌ها، زمان سیکل کاهش می‌یابد. زیرا با کاهش فاصله فین‌ها، سطح انتقال حرارت افزایش یافته و به دنبال آن سرعت انتقال حرارت و انتقال جرم در بستر افزایش می‌یابد.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد در این‌جا نیز مشاهده می‌شود که در حضور ذرات فلزی زمان کاری سیکل کاهش می‌یابد. که این کاهش با افزایش درصد وزنی این ذرات افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود با افزایش فاصله فین‌ها، تأثیر حضور ذرات فلزی بر زمان کاری سیکل نیز افزایش می‌یابد. به طوری که در فاصله فین برابر با 8mm و وجود 5، 10 و 15 درصد وزنی ذرات آلومینیوم، زمان کاری سیکل به ترتیب تنها 21%، 26% و 28% کاهش می‌یابد. در حالی که در ارتفاع فین برابر با 12mm و حضور ذرات آلومینیوم با همان درصدهای وزنی، زمان کاری سیکل به ترتیب 6%، 8%، 36% و 46% کاهش می‌یابد. واضح است در صورت افزایش فاصله فین‌ها، سطح انتقال حرارت به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. ولی از آن‌جا که ضخامت فین‌ها ناچیز می‌باشد، میزان ماده جاذب در بستر، با افزایش و یا کاهش فاصله فین‌ها تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین میزان ذرات فلزی نیز با تغییر فاصله فین‌ها تقریباً ثابت می‌ماند. به همین دلیل در فاصله فین‌های بزرگ به علت کاهش زیاد سطح انتقال حرارت نسبت به فاصله فین‌های کوچک‌تر، تأثیر مثبت افزایش ذرات فلزی بر زمان سیکل بیشتر می‌شود.

در شکل 6 مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع فین زمان سیکل نیز افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ارتفاع فین، میزان جرم ماده جاذب افزایش یافته و به پیروی از آن مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای در بستر جاذب افزایش می‌یابد. بنابراین انتقال حرارت در ذرات جاذب به خوبی صورت نمی‌گیرد و زمان کاری سیکل افزایش می‌یابد.



فاصله فین (میلی متر)

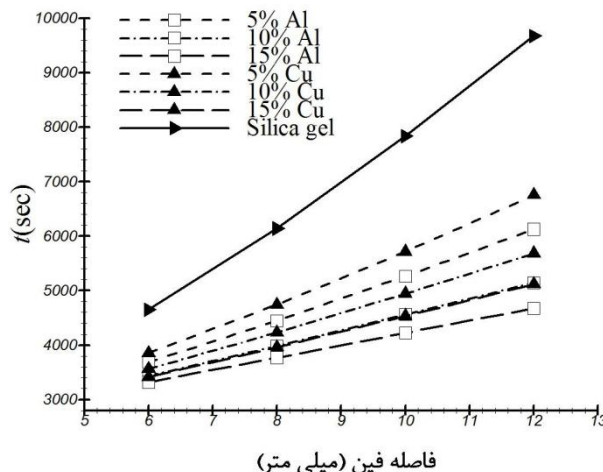
شکل 8 تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم بر حسب فاصله فین و ارتفاع فین به ازای ذرات مختلف فلزی

از آن‌جا که با افزایش ارتفاع فین و سطح انتقال حرارت، میزان جرم ماده جاذب به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین ذرات فلزی نیز به همان میزان در بستر جاذب افزایش می‌یابند. به همین دلیل تأثیر حضور ذرات فلزی در بستر جاذب، بر زمان کاری یک سیکل برای تمامی ارتفاع فین‌ها تقریباً یکسان می‌باشد.

در نهایت با توجه به شکل‌های 5 و 6 مشخص است که می‌توان با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب در ارتفاع و فاصله‌های کوچک فین، زمان کاری سیکل را، به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. با این وجود افزودن ذرات فلزی در فاصله‌ها و ارتفاع بزرگ‌تر فین‌ها، می‌تواند تأثیر مثبت محسوس‌تری نسبت به فاصله و ارتفاع کوچک‌تر فین‌ها داشته باشد.

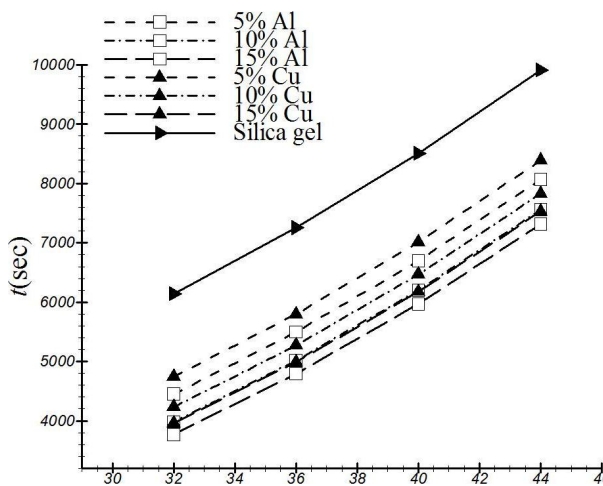
در شکل 7 تغییرات ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی بر حسب تغییرات ارتفاع و فاصله فین به ازای ذرات فلزی مختلف ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع فین، ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی افزایش می‌یابد. در توضیح این مطلب باید اشاره کرد که انرژی حرارتی داده شده به سیستم جذب سطحی را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول صرف تأمین انرژی لازم برای فرایند احیا می‌شود و بخش دوم انرژی حرارتی است که صرف گرم کردن لوله فلزی، فین‌ها و ذرات فلزی می‌شود. این مواد در مراحل سرمایش جرم ثابت و سرمایش فشار ثابت دوباره سرد می‌شوند. بنابراین این بخش از انرژی حرارتی ورودی به سیستم جذب سطحی بدون آن‌که به طور مستقیم در فرایند احیا و در نتیجه ایجاد سرمایش دخالت داشته باشد، اتلاف می‌شود. نیازمند و مهدوی‌خواه [31] نشان دادند که با افزایش ارتفاع فین نسبت انرژی هدر رفته به انرژی حرارتی مفید کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش ارتفاع فین، میزان جرم ماده جاذب افزایش یافته و انرژی حرارتی مورد نیاز برای گرمایش بستر جاذب افزایش می‌یابد. با این وجود با افزایش میزان ماده جاذب، انرژی سرمایشی تولید شده نیز افزایش می‌یابد، که این افزایش، بر افزایش انرژی مصرف شده غلبه کرده و در نهایت ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی با افزایش ارتفاع فین افزایش می‌یابد.

با افزایش فاصله فین‌ها از تعداد فین‌ها کاسته می‌شود. بنابراین بخشی از انرژی حرارتی که صرف گرم شدن فین‌ها می‌شود، کاهش می‌یابد. به همین دلیل نسبت انرژی هدر رفته به انرژی مفید نیز کاهش می‌یابد. با این وجود با افزایش فاصله فین‌ها، سطح انتقال حرارت کاهش یافته و به پیروی از آن



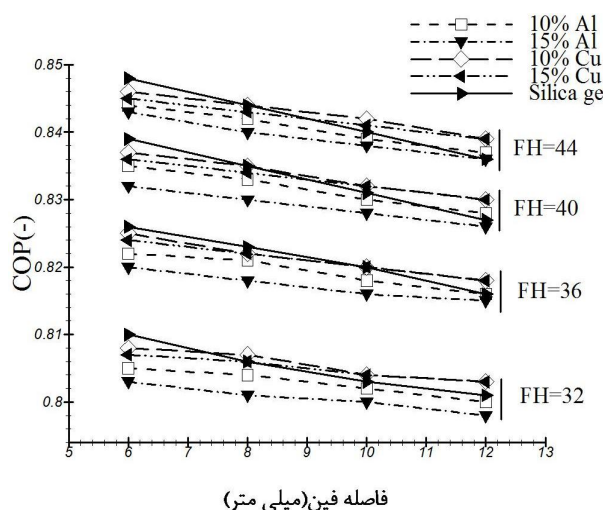
فاصله فین (میلی متر)

شکل 5 تغییرات زمان سیکل بر حسب فاصله فین به ازای ذرات فلزی مختلف (ارتفاع فین برابر با 32 میلی متر است).



ارتفاع فین (میلی متر)

شکل 6 تغییرات زمان سیکل بر حسب ارتفاع فین به ازای ذرات فلزی مختلف (فاصله فین برابر با 8 میلی متر است).



فاصله فین (میلی متر)

شکل 7 تغییرات ضریب عملکرد سیستم بر حسب فاصله فین و ارتفاع فین به ازای ذرات مختلف فلزی

در شکل 6 برخلاف شکل 5 مشاهده می‌شود که حضور ذرات فلزی در ارتفاع فین‌های کوچک و بزرگ، با نسبتی تقریباً مساوی زمان سیکل را کاهش می‌دهند.

مخصوص سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین نیاز است که نحوه به‌کارگیری ذرات فلزی در بستر جاذب با توجه به شرایط بهره‌برداری از سیستم جذب سطحی، مشخص گردد. در انتخاب نحوه استفاده از ذرات فلزی باید توجه داشت که کاهش ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی، هزینه‌های انرژی مورد نیاز برای به کار انداختن سیستم جذب سطحی را افزایش می‌دهد؛ در حالی که افزایش ظرفیت سرمایشی مخصوص، هزینه‌های اولیه اقتصادی ساخت سیستم و اندازه آن را کاهش می‌دهد. بنابراین در شرایطی که از انرژی‌های در حال هدر رفت و یا انرژی‌های رایگان نظیر انرژی خورشیدی برای تامین انرژی اولیه سیستم استفاده می‌شود، میزان ظرفیت سرمایشی مخصوص سیستم اهمیت می‌یابد؛ زیرا هزینه اندکی بابت انرژی حرارتی اولیه مورد نیاز سیستم پرداخت می‌شود و کاهش هزینه اولیه از نظر اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. اما در شرایطی که انرژی اولیه از منابع گران‌بهای نظیر سوخت‌های فسیلی تامین می‌گردد، میزان ضریب عملکرد سیستم اهمیت پیدا می‌کند.

از آنجا که اصلی‌ترین دلیل توجه به سیستم‌های جذب سطحی، توانایی آن‌ها در به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های هدر رفته و یا انرژی‌های با کیفیت پایین (منابع انرژی با دمای کاری پایین) است، لذا ظرفیت سرمایش مخصوص مهم‌ترین پارامتر در توصیف عملکرد سیستم‌های جذب سطحی می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده استفاده از ذرات فلزی در سیستم جذب سطحی، می‌تواند روشی مناسب و کارا در بهبود عملکرد سیستم باشد.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه سعی شده است تأثیر افزودن ذرات فلزی مختلف به بستر جاذب در حضور سطوح حرارتی گسترش یافته، بر عملکرد سیستم جذب سطحی بررسی شود. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب ضریب هدایت حرارتی موثر بستر را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید که میزان این افزایش تابع نوع، شکل و میزان ذرات فلزی اضافه شده به بستر جاذب می‌باشد. لذا با توجه به نتایج حاصل شده، بیش‌ترین افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر بستر، با افزودن ذرات آلومینیوم با درصد وزنی برابر با 15% به‌دست می‌آید.

نتایج نشان داد که با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب انتقال حرارت بهبود می‌یابد. بنابراین زمان مراحل چهارگانه سیکل کاهش یافته، که این کاهش برای مراحل فشار ثابت در مقایسه با مراحل جرم ثابت بسیار شدیدتر می‌باشد. بر این اساس می‌توان زمان سیکل را با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب و نیز افزایش میزان آن‌ها به همراه کاهش فاصله و ارتفاع فین‌ها تا حد زیادی کاهش داد. با این وجود تأثیر مثبت حضور ذرات فلزی در بستر جاذب بر روی زمان سیکل با افزایش فاصله فین‌ها، افزایش می‌یابد.

با بررسی نتایج مشخص شد که تأثیر حضور ذرات فلزی در بستر جاذب بر ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی ناچیز می‌باشد. هرچند این تأثیر اندک را می‌توان متاثر از فاصله و ارتفاع فین‌ها دانست. به علاوه نتایج نشان دادند که با افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم جذب سطحی بهبود یافته و هزینه‌های اقتصادی اولیه سیستم جذب سطحی کاهش می‌یابد.

6- فهرست علائم

A	سطح (m^2)
C_p	گرمای مخصوص در فشار ثابت ($J/kg \cdot K^{-1}$)

انتقال حرارت در بستر جاذب ضعیف می‌شود. تأثیر کاهش انتقال حرارت نسبت به کاهش انرژی هدر رفته، بیش‌تر می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل 7، همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله فین‌ها ضریب عملکرد سیستم کاهش می‌یابد.

در شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب و کاهش فاصله و ارتفاع فین‌ها، ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی کاهش می‌یابد. در توضیح این مطلب می‌بایست سه تأثیر عمده حضور ذرات فلزی در بستر جاذب را هم‌زمان در نظر گرفت.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر بستر جاذب و بهبود انتقال حرارت، تأثیر اول و مفید حضور ذرات فلزی در بستر جاذب می‌باشد. دیگر این‌که با افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب، میزان جرم ماده جاذب کاهش می‌یابد و در نهایت این‌که با حضور ذرات فلزی در بستر جاذب بخشی از انرژی حرارتی ورودی به سیستم جذب سطحی صرف گرم کردن آن‌ها می‌شود و به همین دلیل انرژی اتلافی افزایش می‌یابد. بنابراین در فاصله کوچک فین‌ها، از آن‌جا که سطح انتقال حرارت به میزان کافی مطلوب است، با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب انتقال حرارت بهبود چندانی نمی‌یابد. در حالی که به علت کاهش میزان جرم ماده جاذب و نیز افزایش انرژی اتلاف شده، تأثیر منفی حضور ذرات فلزی بر تأثیر مثبت آن‌ها غلبه کرده و باعث کاهش ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی می‌شوند. اما از سوی دیگر با افزایش فاصله فین‌ها سطح انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در حالی که میزان جرم ماده جاذب و ذرات فلزی تا حدودی ثابت باقی می‌مانند.

به همین دلیل با افزایش فاصله فین‌ها رفته رفته تأثیر مثبت افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر بستر بر تأثیرات منفی حضور ذرات فلزی در بستر جاذب غلبه پیدا کرده و باعث افزایش ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی می‌شوند. با دلایلی مشابه، حضور ذرات فلزی در ارتفاع کوچک فین‌ها نامطلوب می‌باشد.

در نهایت با مشاهده شکل 7 مشخص می‌شود که ذرات آلومینیوم، با وجود آن‌که ضریب هدایت حرارتی موثر بستر را بیش‌تر افزایش می‌دهند، در قیاس با ذرات مس، تأثیر مثبت کم‌تری بر ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی دارند. در این خصوص باید توجه داشت از آن‌جا که ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی تابع پارامترهای متعددی است، بررسی رفتار آن نیز امری پیچیده می‌باشد. بنابراین شاید بتوان تأثیر ذرات مس بر ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی در مقایسه با ذرات آلومینیوم را، ناشی از تأثیر سایر خصوصیات ذرات فلزی حاضر در بستر جاذب دانست. رزک و همکارانش [17] نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که ذرات مس در قیاس با ذرات آلومینیوم، تأثیر مطلوب‌تری بر ضریب عملکرد سیستم جذب سطحی دارند.

شکل 8 تغییرات ظرفیت سرمایش مخصوص را بر حسب فاصله و ارتفاع فین به ازای ذرات فلزی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع فین و به دنبال آن افزایش زمان سیکل، ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم جذب سطحی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش فاصله فین‌ها، به علت ضعیف شدن انتقال حرارت زمان سیکل افزایش می‌یابد. که این امر منجر به افزایش ظرفیت سرمایش مخصوص می‌شود. با این حال همان‌طور که قبلاً بیان شد، با افزایش ذرات فلزی به بستر جاذب زمان سیکل کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت سرمایش مخصوص سیستم جذب سطحی بهبود می‌یابد.

همان‌گونه که عنوان شد با افزودن ذرات فلزی به بستر جاذب، ضریب عملکرد سیستم در فاصله کوچک فین‌ها کاهش می‌یابد. در حالی که با افزودن ذرات فلزی و افزایش درصد وزنی آن‌ها در بستر جاذب ظرفیت سرمایشی

[7] K. C. Leong, Y. Liu, Numerical study of a combined heat and mass recovery adsorption cooling cycle, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 22, pp. 4761-4770, 2004.

[8] H. Demir, The effect of microwave regenerated adsorbent bed on the performance of an adsorption heat pump, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 134-142, 2013.

[9] M. N. Golubovic, H. D. M. Hettiarachchi, W. M. Worek, Sorption properties for different types of molecular sieve and their influence on optimum dehumidification performance of desiccant wheels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 17-18, pp. 2802-2809, 2006.

[10] F. Meunier, Solid sorption heat powered cycles for cooling and heat pumping applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, No. 9-10, pp. 715-729, 1998.

[11] T.-H. Eun, H.-K. Song, J. H. Han, K.-H. Lee, J.-N. Kim, Enhancement of heat and mass transfer in silica-expanded graphite composite blocks for adsorption heat pumps. Part II. Cooling system using the composite blocks, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 23, No. 1, pp. 74-81, 2000.

[12] H. Talebian, M. Mahdavihah, H. Niazmand, Adsorbent bed modeling to investigate the particle diameter effect for different adsorber conditions, *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 1, No. 3, pp. 41-54, 2011. (In Persian)

[13] C. X. Jia, Y. J. Dai, J. Y. Wu, R. Z. Wang, Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 15-16, pp. 2523-2534, 2006.

[14] X. Zheng, L. W. Wang, R. Z. Wang, T. S. Ge, T. F. Ishugah, Thermal conductivity, pore structure and adsorption performance of compact composite silica gel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, No. 0, pp. 435-443, 2014.

[15] H. Demir, M. Mobedi, S. Ülkü, The use of metal piece additives to enhance heat transfer rate through an unconsolidated adsorbent bed, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 4, pp. 714-720, 2010.

[16] P. Hu, J.-J. Yao, Z.-S. Chen, Analysis for composite zeolite/foam aluminum-water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 2, pp. 255-261, 2009.

[17] A. Rezk, R. K. Al-Dadah, S. Mahmoud, A. Elsayed, Effects of contact resistance and metal additives in finned-tube adsorbent beds on the performance of silica gel/water adsorption chiller, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 53, No. 2, pp. 278-284, 2013.

[18] L. Yong, K. Sumathy, 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, No. 8-9, pp. 1587-1598, 2004.

[19] 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, 2012. (In Persian)

[20] D. C. Wang, Y. H. Li, D. Li, Y. Z. Xia, J. P. Zhang, A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 344-353, 2010.

[21] H. Niazmand, H. Talebian, M. Mahdavihah, Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 243-252, 2013.

[22] 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.

[23] P. Dittus, W. L. Boelter, M., Heat transfer in automobile radiators of tubular type, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 1, pp. 3-22, 1985.

[24] B. B. Saha, A. Chakraborty, S. Koyama, Y. I. Aristov, A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1-2, pp. 516-524, 2009.

[25] E. Glueckauf, Theory of chromatography. Part 10. Formulae for diffusion into spheres and their application to chromatography, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 51, No. 0, pp. 1540-1551, 1955.

[26] S. C. Cheng, R. I. Vachon, The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 3, pp. 249-264, 1969.

[27] R. L. Hamilton, O. K. Crosser, Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962.

ثابت پخشندگی سطح (m²s) D_{so}

انرژی فعال‌سازی (Jkg⁻¹) E_a

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (Wm⁻²K⁻¹) h_f

نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب (m²) k_{app}

رسانندگی گرمایی موثر (Wm⁻¹K⁻¹) k_{eff}

عدد ناسلت (-) Nu

فشار (Pa) p

عدد پرانتل (-) Pr

انرژی حرارتی (J) Q

شعاع ذرات جاذب (m) R_p

ثابت جهانی گازها (Jmol⁻¹K⁻¹) R_u

عدد رینولدز (-) Re

زمان (sec) t

دما (K) T

بردار سرعت (ms⁻¹) U

حجم (m³) V

درصد حجمی (-) x

علایم یونانی

گرمای جذب (Jkg⁻¹) ΔH

تخلخل کلی (-) ϵ_i

رسانندگی گرمایی (Wm⁻¹K⁻¹) λ

مقدار متوسط سیال عامل جذب شده (kg_{sg}/kg_{ad}) w

چگالی (kgm⁻³) ρ

زیرنویس‌ها

ماده جاذب ad

بستر جاذب b

سیال f

بخار سیال عامل g

ذرات فلزی m

سیلیکازل (ماده جاذب) sg

لوله فلزی t

سیال عامل w

7- مراجع

[1] A. A. Askalany, M. Salem, I. M. Ismael, A. H. H. Ali, M. G. Morsy, B. B. Saha, An overview on adsorption pairs for cooling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, No. 0, pp. 565-572, 2013.

[2] A. A. Askalany, M. Salem, I. M. Ismail, A. H. H. Ali, M. G. Morsy, A review on adsorption cooling systems with adsorbent carbon, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 493-500, 2012.

[3] H. Demir, M. Mobedi, S. Ülkü, A review on adsorption heat pump: Problems and solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 9, pp. 2381-2403, 2008.

[4] 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.

[5] A. R. M. Rezk, R. K. Al-Dadah, Physical and operating conditions effects on silica gel/water adsorption chiller performance, *Applied Energy*, Vol. 89, No. 1, pp. 142-149, 2012.

[6] Z. S. Lu, R. Z. Wang, Performance improvement by mass-heat recovery of an innovative adsorption air-conditioner driven by 50-80 °C hot water, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 55, No. 1-2, pp. 113-120, 2013.

- [30] Y. I. Aristov, A. Sapienza, D. S. Ovoshchnikov, A. Freni, G. Restuccia, Reallocation of adsorption and desorption times for optimisation of cooling cycles, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 3, pp. 525-531, 2012.
- [31] 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.
- [28] K. C. 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.
- [29] 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.