



## بررسی عددی اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر جاذب بر عملکرد سیستم‌های تبرید جذب سطحی

میثم خطیبی<sup>۱</sup>، میلاد محمدزاده کوثری<sup>۲</sup> و حمید نیازمند<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

### چکیده

در این پژوهش، به بررسی تأثیر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر ذرات جاذب متخلخل بر عملکرد چیلرهای جذب سطحی پرداخته شده است. برای این منظور، یک بستر جاذب با مبدل گرمایی صفحه-تخت و فین‌های مستطیلی به صورت سه‌بعدی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی شده است؛ همچنین از سیلیکاژل SWS-IL-آب به عنوان جفت کاری استفاده شده است. به منظور بررسی اثر افزودن ذرات آلومینیومی بر عملکرد سیستم، بستر جاذب در دو حالت در حضور فین‌های مستطیلی و عدم حضور فین‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، استفاده از ذرات آلومینیومی، موجب افزایش ضریب هدایت گرمایی بستر و در نتیجه کاهش زمان چرخه شده و در نهایت سبب افزایش توان سرمایش مخصوص می‌شود؛ ولی در مقابل، ضریب عملکرد سیستم را کاهش می‌دهد؛ همچنین نتایج نشان داد که افزودن ذرات آلومینیومی در حضور فین موجب افزایش بیشتر توان سرمایش مخصوص شده که این افزایش با افزایش ابعاد بستر تشدید می‌گردد، هرچند کاهش ضریب عملکرد سیستم در این حالت، بیشتر از حالت بدون فین است.

**کلمات کلیدی:** چیلر جذب سطحی؛ مبدل گرمایی صفحه تخت؛ مدل‌سازی عددی؛ ذرات آلومینیومی؛ ضریب هدایت گرمایی.

## Numerical Study of the Effects of Aluminum Particle Additives in Adsorbent Beds on the Performance of Adsorption Refrigeration Systems

M. Khatibi<sup>1</sup>, M. Mohammadzadeh Kowsari<sup>2</sup>, H. Niazmand<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> Prof., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

In this study, the effects of aluminum particle additives in porous beds on the adsorption chillers performance have been investigated. For this purpose, an adsorbent bed with rectangular finned flat-tube heat exchanger by employing a three-dimensional control volume scheme is simulated. Furthermore, silica gel SWS-IL-water has been used as a working pair. The effects of aluminum particle additives on the system performance is investigated in the presence and absence of the fins. The results showed that the use of aluminum particles increases the thermal conductivity coefficient of the bed and, consequently, leads to reduction and increment of the cycle time and the specific cooling power, respectively, while it decreases the coefficient of performance. Moreover, the results indicated that employing the aluminum particles in the presence of fins has led to a greater increase in the specific cooling power which this effect is more pronounced in larger bed dimensions, while the coefficient of performance reduction is lower in the absence of fins.

**Keywords:** Adsorption Chiller; Flat-Tube Heat Exchanger; Numerical Study; Aluminum Particles; Thermal Conductivity Coefficient.



# مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها



DOI: 10.22044/jsfm.2018.7277.2673

## ۱- مقدمه

نیاز روز افزون به انرژی و رو به پایان بودن منابع سوخت فسیلی از یک سو، مشکلات زیست‌محیطی پدید آمده در رابطه با آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی از سوی دیگر، اهمیت جایگزینی سیستم‌های تبرید رایج را دوچندان کرده است. سیستم‌هایی نظیر، سیستم‌های تبرید جذبی به دلیل بهره‌گیری از انرژی‌های هدررفته و تجدیدپذیر نظیر، انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی و استفاده از مبردهای سازگار با محیط‌زیست، گزینه مناسبی جهت جایگزینی با سیستم‌های تبرید تراکمی رایج می‌باشند. در بین سیستم‌های تبرید جذبی، سیستم‌های تبرید جاذب سطحی<sup>۱</sup> به واسطه امکان کار کردن با منابع گرمایی با گستره دمایی وسیع، عمر بیشتر، قابلیت ساخت آسان‌تر و امکان استفاده در سیستم‌های دارای ارتعاش نظیر، قایق‌ها و خودروها در مقایسه با سیستم‌های تبرید جاذب حجمی<sup>۲</sup>، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱]. در مقابل، این سیستم‌ها به علت انتقال گرما و انتقال جرم نسبتاً ضعیف در بستر جاذب، از توان سرمایش مخصوص<sup>۳</sup> و ضریب عملکرد<sup>۴</sup> نسبتاً پایین‌تری نسبت به سیستم‌های جاذب حجمی برخوردار می‌باشند؛ همچنین این سیستم‌ها از ضریب عملکرد بسیار پایین‌تری نسبت به سیستم‌های تبرید تراکمی برخوردار می‌باشند. توان سرمایش مخصوص پایین سبب شده است که برای یک توان تبرید معین، اندازه و حجم سیستم‌های تبرید جاذب سطحی در مقایسه با سیستم‌های تبرید تراکمی بزرگ‌تر باشد [۲]؛ لذا با توجه به مزایای گفته شده برای سیستم‌های تبرید جاذب سطحی، محققان زیادی در دهه‌های اخیر در جهت بهبود عملکرد این سیستم‌ها تلاش نموده‌اند.

مطالعات انجام شده در حوزه بستر ذرات جاذب را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم کرد؛ دسته اول از پژوهش‌ها، به بررسی پیکربندی بستر جاذب اختصاص یافته‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی هندسی بسترهای جاذب بدون فین [۳، ۴]، بسترهای استوانه‌ای با فین‌های صفحه‌ای و حلقوی [۵، ۶]، بستر جاذب با فین‌های

طولی [۷، ۸] و بسترهای جاذب با مبدل‌های صفحه-تخت [۹، ۱۰] اشاره نمود. گروه دوم پژوهش‌ها، به بررسی جفت‌های کاری<sup>۵</sup> پرداخته‌اند. ضریب هدایت گرمایی پایین و خواص فیزیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی متفاوت و وابستگی جفت‌های کاری به شرایط عملکردی چرخه، از جمله چالش‌هایی است که محققان در مطالعه مواد جاذب با آن روبه‌رو هستند؛ لذا، مطالعات زیادی روی مواد و ترکیب جفت‌های جاذب و جذب‌شونده و بررسی راه‌کارهایی به منظور افزایش انتقال گرما بستر انجام گرفته است که در ادامه به برخی از مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

سولماس و همکاران [۱۱]، به طور تجربی به بررسی ظرفیت جاذب آب در جاذب زئولیت در شرایط دمایی و فشار مختلف و مقایسه با جفت‌های کربن فعال-متانول، سیلیکاژل-آب و زئولیت X۱۳-آب پرداختند. نتایج نشان داد که زئولیت طبیعی در بین سایر جفت‌های بررسی شده دارای کمترین وابستگی به شرایط دمایی و فشار کاری بوده و ظرفیت جذبی معادل ۱۲٪ دارد، در حالی که جفت کربن فعال-متانول، بیشترین جذب را در محدوده دمایی ۶۰°C تا ۱۴۰°C در بین تمامی جفت‌ها دارا است. دمیر و همکاران [۱۲] تأثیر تخلخل یک بستر حلقوی حاوی ذرات سیلیکاژل در فرایند جذب بخار آب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش مقدار تخلخل، موجب کاهش مقاومت انتقال جرم بستر از یک سو و از سوی دیگر، موجب کاهش ضریب رسانش بستر و در نتیجه افزایش مقاومت انتقال گرما می‌شود. نیازمند و همکاران [۱۳] در پژوهش خود، تأثیر قطر ذرات جاذب را بر عملکرد یک سیستم جاذب سطحی را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که قطر بهینه ذرات تابعی از پارامترهای مختلف نظیر، ارتفاع و گام فین و دمای سیال گرم و خنک‌کننده است. وازکویچ و همکاران [۱۴] یک بستر جاذب با فین‌های حلقوی را مورد مطالعه قرار دادند که به وسیله زئولیت CBV901 پوشش داده شده بود. نتایج آن‌ها افزایش قابل توجه انتقال گرمای هدایت از دیواره مبدل به

<sup>1</sup> Adsorption Cooling Systems

<sup>2</sup> Absorption Cooling Systems

<sup>3</sup> Specific Cooling Power (SCP)

<sup>4</sup> Coefficient of Performance (COP)

<sup>5</sup> Working Pairs

بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از آلومینیوم با درصد حجمی ۳۰٪، زمان چرخه را به میزان ۵۰٪ و توان سرمایش مخصوص را به میزان ۱۰۰٪ افزایش می‌دهد. آذرفر و همکاران [۱۸]، در پژوهش خود اثر افزودن ذرات رشته‌ای فلزی آلومینیومی و مسی به بستر جاذب استوانه‌ای با فین‌های صفحه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ذرات آلومینیومی، تأثیر بهتری نسبت به ذرات مس داشته و افزودن ذرات فلزی موجب بهبود توان سرمایش مخصوص شده؛ درحالی‌که تأثیر حضور ذرات در بستر بر ضریب عملکرد سیستم ناچیز است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مطالعات محدودی تا به امروز در حوزه ذرات فلزی صورت گرفته است که بیشتر آن‌ها روی اثر افزودن ذرات فلزی بر ضریب هدایت گرمایی بستر متمرکز بوده‌اند؛ لذا مدل‌سازی و بررسی اثر افزودن ذرات فلزی بر عملکرد سیستم‌های تبرید جذب سطحی ضرورت پیدا می‌کند.

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر جاذب به منظور افزایش انتقال گرما در بستر بر عملکرد سیستم است. بدین منظور، اثر افزودن ذرات بر دو پارامتر توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد سیستم در دو حالت مبدل گرمایی به همراه فین و بدون فین مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است، برای نخستین بار است که اثر افزودن ذرات فلزی روی بسترهای غیر یکپارچه<sup>۲</sup> به همراه مبدل گرمایی صفحه-تخت به صورت عددی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این پژوهش از مدل پارامترهای توزیع شده<sup>۳</sup> (مدل انتقال گرما و انتقال جرم) با استفاده از یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی مبدل گرمایی آلومینیومی صفحه-تخت با فین‌های مستطیلی و جفت سیلیکاژل SWS-IL-آب استفاده شده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

به منظور تحلیل بستر جاذب، حوزه‌های مختلف بستر شامل، مواد جاذب، فین‌ها، کانال و حوزه سیال ناقل انرژی شبیه‌سازی شده‌اند. در این پژوهش به دلیل وجود تقارن

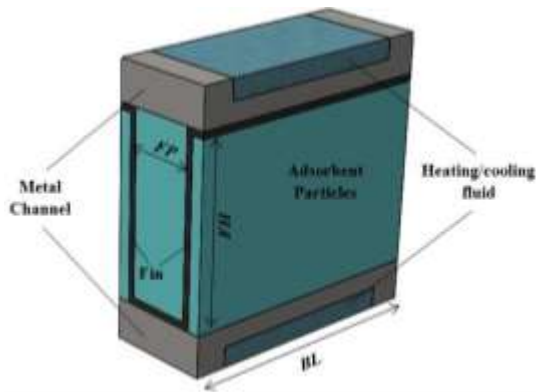
بستر و در نتیجه بهبود توان سرمایش مخصوص سیستم جذب سطحی را نشان داد.

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، یکی از مشکلات اصلی مواد جاذب، پایین بودن ضریب هدایت گرمایی این مواد است که باعث تضعیف انتقال گرما در خلال فرآیندهای چهارگانه چرخه تبرید می‌شود. یکی از راه‌هایی که محققان برای فائق آمدن بر این ضعف مورد استفاده و پژوهش قرار داده‌اند، اضافه کردن ذرات فلزی به بستر بوده است. از معدود پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، می‌توان به مطالعه تجربی دمیر و همکاران [۱۵] اشاره نمود که به بررسی تأثیر افزودن رشته‌های فلزی مختلف شامل، آلومینیوم، مس، برنج و فولاد ضدزنگ بر ضریب هدایت گرمایی بستر جاذب پر شده با ذرات سیلیکاژل پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن ذرات فلزی، ضریب هدایت بستر را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، درحالی‌که مقاومت انتقال جرم را نیز افزایش می‌دهد؛ همچنین در بین چهار جنس استفاده‌شده، آلومینیوم بیشترین افزایش در ضریب هدایت گرمایی را داشته است، به طوری که با اضافه کردن آلومینیوم با درصد وزنی ۱۵٪ ضریب هدایت گرمایی سیلیکاژل خالص به میزان ۲۴۲٪ افزایش یافت. لازم به ذکر است، آن‌ها در پژوهش خود اثر ضریب عملکرد سیستم را بررسی نمودند. رزک و همکاران [۱۶]، به بررسی عددی اثر کاهش مقاومت تماسی از طریق پوشش سطح تماس لایه اول ماده جاذب با لوله فلزی و افزایش ضریب هدایت گرمایی بستر با افزودن ذرات فلزی نظیر آلومینیوم، مس، برنج و فولاد ضدزنگ به بستر پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از یک مبدل گرمایی از جنس مس با فین‌های صفحه‌ای از جنس آلومینیوم استفاده کردند. نتایج نشان داد که در نتیجه ترکیب این دو روش ظرفیت سرمایشی و ضریب عملکرد سیستم با افزایش نسبت فاصله فین‌ها تا حداکثر ۲۵٪ افزایش می‌یابد. شایان ذکر است آن‌ها در پژوهش خود، از روش پارامترهای متمرکز استفاده کردند و در واقع از اثر مقاومت برون‌ذره‌ای صرف‌نظر کرده‌اند. اسکلاتی و همکاران [۱۷]، تأثیر افزودن ذرات فلزی آهن، مس و آلومینیوم در درصد‌های حجمی ۱۰٪ تا ۳۰٪ بر ضریب هدایت گرمایی یک بستر تشکیل شده از ذرات کربن فعال را

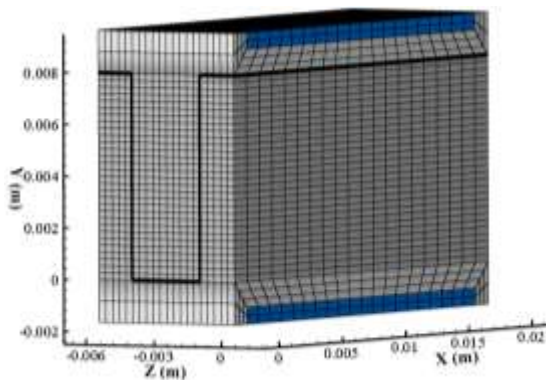
<sup>2</sup> Unconsolidated

<sup>3</sup> Distributed Parameters Model

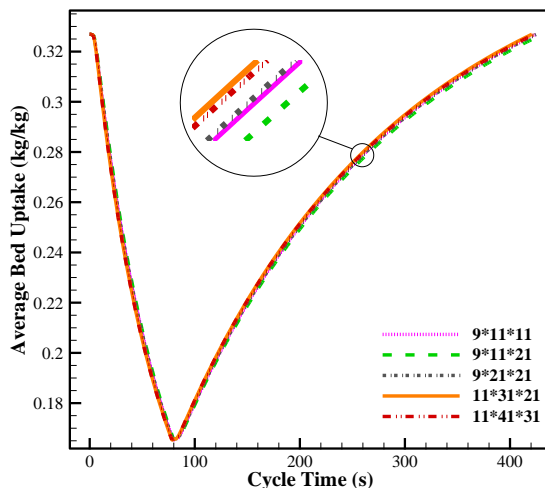
<sup>1</sup> Lumped Parameters Model



شکل ۱- شماتیکی از محدوده حل عددی در بسترهای مستطیلی



شکل ۲- جزییات شبکه‌بندی سه‌بعدی حوزه‌های مختلف حل



شکل ۳- تغییرات مقدار جذب میانگین بستر به ازای تغییر در شبکه‌بندی

تقریبی در هندسه و شرایط مرزی بستر جاذب و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی تنها بخش کوچکی از بستر شامل، یک بستر کامل و دونیم بستر به عنوان محدوده حل عددی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ حوزه حل عددی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل ۱،  $BL$ ،  $FH$  و  $FP$  به ترتیب، طول بستر، ارتفاع و گام فین می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، مواد جاذب در بین فین‌های مستطیلی و کانال‌ها قرار گرفته‌اند. در واقع فین‌ها و کانال در تماس با ذرات جاذب، وظیفه تبادل انرژی بین سیال ناقل انرژی و مواد جاذب را طی مراحل مختلف چرخه تیرید بر عهده دارند. شکل ۲، شبکه‌بندی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. شبکه‌بندی سیال ناقل گرما، فین و بستر جاذب در دستگاه مختصات کارتزین و برای کانال در دستگاه مختصات عمومی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۳ که استقلال نتایج عددی مقدار جذب میانگین بستر از تعداد شبکه‌بندی حوزه حل را برای هندسه نمونه با گام فین ۳mm، ارتفاع فین ۸mm و طول بستر ۲۰mm نشان می‌دهد، به منظور کاهش هزینه محاسبات عددی، شبکه ۱۱×۳۱×۲۱ انتخاب شده است که نشان‌دهنده تعداد شبکه به ترتیب در راستای گام فین، ارتفاع فین و طول بستر می‌باشد. از این رو برای هماهنگی نتایج مربوط به تأثیر ابعاد هندسی بستر، شبکه‌بندی پایه متناسب با تغییر ابعاد هندسی بسترها تغییر خواهد نمود. معادلات حاکم بر مساله با استفاده از روش حجم کنترل و به وسیله برنامه نوشته شده به زبان برنامه‌نویسی فرترن حل شده‌اند.

## ۱-۲- فرضیات مدل‌سازی

فرضیاتی که باهدف ساده‌سازی در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از:

- ۱- به دلیل این‌که تغییرات دما در جهت ضخامت فین بسیار ناچیز است، انتقال گرمای هدایت در فین‌ها به صورت دوبعدی و با فرض دمای متمرکز در جهت ضخامت فین در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup> General Coordinate System

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

### ۲-۲-۴- بستر مواد جاذب

معادله بقای انرژی بستر جاذب عبارت است از:

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

در این رابطه  $\rho_g$  و  $k_b$  به ترتیب، چگالی فاز بخار و ضریب رسانش معادل بستر مواد جاذب می‌باشند.  $\rho_b$  چگالی توده‌ای بستر جاذب و  $\varepsilon_t$  تخلخل کلی بستر هستند که به ترتیب از معادلات (۵-۶) محاسبه می‌گردند:

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

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

همچنین  $(\rho C_p)_b$  ظرفیت گرمایی کل<sup>۱</sup> بستر است که به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$(\rho C_p)_b = \varepsilon_t (\rho_g C_{pg}) + \rho_b (1 + w) C_{p(s,a)} \quad (7)$$

$C_{p(s,a)}$  ظرفیت گرمایی ویژه جفت جاذب-جذب‌شونده است و به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$C_{p(s,a)} = (a_0 + a_1 w + a_2 w^2) + (b_0 + b_1 w + b_2 w^2) T_b \quad (8)$$

برای محاسبه نرخ جذب  $dw/dt$  می‌توان از مدل نیرو محرکه خطی<sup>۲</sup> استفاده نمود. این مدل در واقع مقاومت انتقال جرم درون‌ذره‌ای برای جذب و احیای سیال عامل را در نظر می‌گیرد [۲۰، ۲۱].

$$\frac{dw}{dt} = \left[ 15 D_{so} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T_b}\right) / R_p^2 \right] (w^* - w) \quad (9)$$

در معادله (۹)،  $w^*$  بیانگر جذب تعادلی در دما و فشار بستر است. مقادیر  $w^*$  و  $\Delta H$  بر اساس تئوری پتانسیل پلانی<sup>۳</sup>

۲- سیال عامل در فاز جذب شده به صورت مایع و در فاز احیا شده، به صورت گاز ایده آل در نظر گرفته شده است.

۳- تعادل دمایی بین ذرات جاذب و سیال عامل در دو فاز جذب شده و احیا شده برقرار است.

۴- ذرات جاذب و فلزی دارای قطر یکسان و کروی شکل بوده و به صورت یکنواخت در بستر توزیع شده‌اند؛ همچنین خواص ذرات در جهات مختلف یکسان می‌باشند.

۵- کندانسور و اواپراتور به صورت ایده آل با فشار ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

### ۲-۲-۲- معادلات حاکم

بر اساس فرضیات بیان‌شده، معادلات حاکم برای سیال حامل انرژی، کانال فلزی، فین‌ها و بستر مواد جاذب به صورت زیر بیان می‌شوند.

#### ۱-۲-۲- سیال ناقل گرما

معادله بقای انرژی سیال حامل انرژی با فرض دمای متمرکز در امتداد عمود بر عمق کانال و به صورت یک‌بعدی در جهت عمق کانال به صورت رابطه (۱) است:

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

#### ۲-۲-۲- کانال فلزی

معادله انرژی کانال به صورت معادله رسانش گذرای سه‌بعدی است:

$$\int_{cv} (\rho C_p)_{chan} \frac{\partial T_{chan}}{\partial t} dV - \int_{cs} (k \vec{\nabla} T)_{chan} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

#### ۲-۲-۳- فین‌ها

موازنه انرژی برای فین‌ها به دلیل ضخامت ناچیز فین‌ها به صورت متمرکز در جهت ضخامت فین و به صورت دوبعدی در جهت‌های دیگر است.

<sup>1</sup> Total Heat Capacity

<sup>2</sup> LDF: Linear Driving Force Model

<sup>3</sup> Polanyi Potential Theory

$$\dot{m}_g = V_{\text{cham}} \frac{\partial \rho_{\text{cham}}}{\partial t} \quad (16)$$

$$P_{\text{cham}} = \rho_{\text{cham}} R_g T_{\text{cham}} \quad (17)$$

لازم به ذکر است، معادلات حاکم برای سیال ناقل گرما و فین به ترتیب به صورت یک‌بعدی و دوبعدی و برای بستر جاذب و کانال به صورت سه‌بعدی حل می‌گردند. معادلات انتگرالی حاکم بر بخش‌های مختلف سیستم به روش حجم محدود<sup>۱</sup> و با استفاده از طرح کاملاً ضمنی<sup>۲</sup> گسسته سازی شده‌اند. برای گسسته سازی جمله‌های زمانی از طرح تفاضل پیشرو<sup>۳</sup> و از طرح تفاضل مرکزی<sup>۴</sup> برای جمله‌های پخش و همرفت استفاده شده است. جزئیات کامل گسسته سازی معادلات در مرجع [۲۵] آورده شده است. شرایط اولیه و مرزی و روش حل عددی به تفصیل در مرجع [۱۰] ذکر شده‌اند.

### ۳-۲- پارامترهای عملکرد سیستم

دو پارامتر اساسی در ارزیابی عملکرد یک سیستم جاذب سطحی، توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد می‌باشند که به ترتیب از روابط (۱۸ و ۱۹) محاسبه می‌شوند [۲۶]:

$$SCP = L_v \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})}{t_{\text{cycle}}} \quad (18)$$

$$COP = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{heating}}} \quad (19)$$

$L_v$  گرمای نهان آب در دمای اوپراتور می‌باشد [۲۷].  $w_{\text{max}}$  و  $w_{\text{min}}$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار جاذب می‌باشند که با توجه به شرایط کنترلی اعمال شده به بستر محاسبه می‌گردند. در این پژوهش از رابطه ارائه شده در مرجع [۲۷] برای کنترل چرخه استفاده شده است.  $Q_{\text{evap}}$  انرژی تبرید تولیدی سیستم و  $Q_{\text{heating}}$  انرژی گرمایی ورودی به سیستم است که به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$Q_{\text{evap}} = \int_{\text{isobaric ads}} \dot{m}_g L_v dt \quad (20)$$

<sup>1</sup> Finite volume

<sup>2</sup> Fully implicit scheme

<sup>3</sup> Forward differencing scheme

<sup>4</sup> Central differencing scheme

برای جفت کاری سیلیکازل SWS-1L-آب محاسبه می‌شوند [۲۲]. معادله پیوستگی برای سیال عامل به صورت رابطه (۱۰) است:

$$\int_{\text{cv}} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{\text{cs}} (\rho \vec{u})_g \cdot d\vec{A} + \int_{\text{cv}} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV = 0 \quad (10)$$

سرعت بخار در بستر با استفاده از قانون دارسی محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$\vec{u}_g = -\frac{K_d}{\mu_g} \nabla P \quad (11)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon_b)^2} \quad (12)$$

که  $K_d$  نفوذپذیری بستر جاذب است [۲۴].

با ترکیب معادلات (۱۰) و (۱۱)، معادله (۱۳) برای محاسبه فشار بستر به دست می‌آید:

$$\int_{\text{cv}} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV = \int_{\text{cs}} \left( \rho_g \frac{K_d}{\mu_g} \nabla P \right) \cdot d\vec{A} - \int_{\text{cv}} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (13)$$

مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده به کمک معادله حالت گاز کامل و فشار به دست آمده از معادله (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\rho_g = \frac{P}{R_g T_b} \quad (14)$$

### ۲-۲-۵- محفظه

محفظه در واقع محل تجمع بخار احیا شده از بستر قبل ورود به کندانسور و بخار ورودی از اوپراتور، قبل از ورود به بستر است. فشار محفظه در مراحل احیا و جذب به ترتیب برابر با فشار کندانسور و اوپراتور فرض شده است. در مراحل جرم ثابت، زمانی که شیرهای اتصالی بین بستر با کندانسور و اوپراتور بسته می‌باشند، با محاسبه نرخ میرد خروجی یا ورودی از مرز مشترک محفظه و بستر جاذب از رابطه (۱۵) و سپس محاسبه چگالی بخار موجود در محفظه با استفاده از رابطه (۱۶)، فشار محفظه از رابطه گاز کامل، رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$\dot{m}_g = \int_{\text{b-cham Interface}} (\rho \vec{u})_g \cdot d\vec{A} \quad (15)$$

دادند که طول بستر بیشتر از ۲۰mm به علت افزایش مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای، باعث کاهش شدید در توان سرمایش مخصوص سیستم تبرید می‌شود؛ لذا در این پژوهش طول بستر ثابت و برابر با ۲۰mm در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی چرخه مورد استفاده در این مدل‌سازی، در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

در شکل ۴ تغییرات زمانی میانگین جذب بستر در شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است. شایان ذکر است، جزئیات اعتبارسنجی مدل عددی، به تفصیل در مرجع [۱۰] بیان شده است. به‌طور کلی بسترهای جاذب به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۸]:

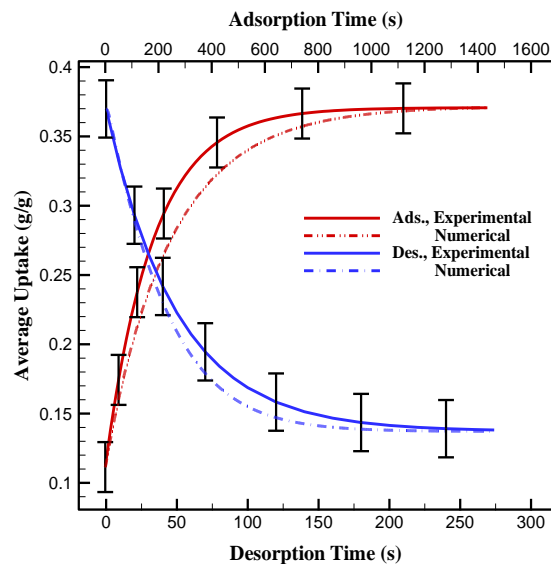
- (۱) بستر پوشش داده شده<sup>۱</sup>
  - (۲) بستر با دانه‌های آزاد (غیر پوشش داده شده)<sup>۲</sup>
- نوع پوشش داده شده به دو دسته یکپارچه و غیر یکپارچه تقسیم می‌شود. در نوع پوشش داده شده غیر یکپارچه، تنها مقاومت تماسی میان فلز و ماده جاذب کاهش داده می‌شود. در نوع یکپارچه شده، به دلیل افزودن مواد با ضریب هدایت گرمایی بالا به مواد جاذب، ضریب هدایت گرمایی بستر افزایش می‌یابد؛ در نتیجه انتقال گرما در بستر بهبود خواهد یافت؛ اما در مقابل انتقال جرم در بستر ضعیف‌تر خواهد شد. نفوذ تنها مکانیزم انتقال جرم در این نوع جاذب است؛ زیرا فضای خالی بین ذرات به وسیله مواد پر شده و فضای لابه‌لای ذرات بسیار محدود می‌شود؛ بنابراین نرخ انتقال جرم در بستر کاهش خواهد یافت [۳، ۱۷]. در مقابل، بستر با دانه‌های آزاد هستند که از انتقال جرم مناسب‌تری برخوردار بوده، ولی انتقال گرما در بستر به سبب ضریب انتقال گرمایی پایین بستر نسبتاً ضعیف است [۲۸]؛ لذا در این پژوهش، تأثیر افزودن ذرات فلزی به بستر با دانه‌های آزاد به منظور افزایش ضریب هدایت گرمایی بستر، به عنوان مهم‌ترین ضعف این نوع از بسترها بررسی گردیده است. لازم به ذکر است، در این مطالعه حجم بستر در هر ابعاد مشخص از بستر، ثابت در نظر گرفته شده است؛ لذا با افزودن ذرات

$$Q_{\text{heating}} = \int_{t_1}^{t_3} [(mC_p\Delta T)_f + (mC_p\Delta T)_{\text{hex}} + (\rho C_p \nabla \Delta T)_b + (m_b \Delta H \frac{dw}{dt} \Delta t)] / (t_3 - t_1) dt \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)  $t_1$  و  $t_3$  به ترتیب زمان شروع فرآیند گرمایش جرم ثابت و پایان فرآیند گرمایش فشار ثابت (فرآیند احیا مبرد) می‌باشند.

### ۳- نتایج

در این بخش، به بررسی اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر ذرات جاذب بر توان سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد یک چیلر جذب سطحی تک بستره پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا روابط و اصلاحات مورد نیاز در روابط به منظور اضافه کردن ذرات به بستر متخلخل ارائه شده است. سپس اثر افزودن ذرات به بستر در حضور مبدل گرمایی صفحه-تخت بدون فین و با فین‌های مستطیلی به ازای کسر حجمی‌های مختلف هم‌زمان با تغییرات ارتفاع و گام فین‌های مبدل گرمایی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، یکی از ابعاد مهم و تأثیرگذار در انتقال گرما و به خصوص انتقال جرم بستر جاذب، طول بستر جاذب است که محمدزاده کوثری و همکاران [۱۰] در پژوهش خود نشان



شکل ۴- مقایسه تغییرات زمانی میانگین جذب بستر در فرآیندهای جذب و احیاء با کار تجربی [۱۰]

<sup>1</sup> Coated Bed

<sup>2</sup> Loose Grains (Uncoteded Bed)



در این رابطه  $V_t$  و  $V_{metal}$  به ترتیب حجم ذرات آلومینیوم و حجم کل بستر می‌باشند که حجم کل بستر به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود:

$$V_t = V_{inter-particles} + V_{metal} + V_{particle} \quad (23)$$

که  $V_{particle}$  حجم ذرات جاذب است. با توجه به تعاریف فوق تخلخل کلی بستر به شکل رابطه (۲۴) تغییر خواهد کرد:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b - \varphi)\varepsilon_p \quad (24)$$

همچنین چگالی توده ای بستر و ظرفیت گرمایی حجمی بستر به شکل ارائه شده در ادامه در خواهند آمد:

$$\rho_b = [1 - \varepsilon_b - \varphi]\rho_p \quad (25)$$

$$(\rho C_p)_b = \varepsilon_t(\rho_g C_{p,g}) + \rho_b(1 + w)C_{p,(s,a)} + \varphi(\rho C_p)_{metal} \quad (26)$$

یکی از نخستین روابطی که برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی معادل برای یک محیط همگن شامل، یک‌فاز پیوسته و یک‌فاز غیرپیوسته ارائه گردیده است، رابطه‌ای است که توسط همیلتون و کراسر [۲۹] ارائه شده است:

$$K_{eff} = \frac{K_b(1 - \varphi)\left(\frac{dT}{dx}\right)_b + K_{metal}\varphi\left(\frac{dT}{dx}\right)_{metal}}{(1 - \varphi)\left(\frac{dT}{dx}\right)_b + \varphi\left(\frac{dT}{dx}\right)_{metal}} \quad (27)$$

در این رابطه  $\left(\frac{dT}{dx}\right)_b$  و  $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{metal}$  گرادیان دمای میانگین کل در دو ماده،  $\varphi$  کسر حجمی،  $K_b$  و  $K_{metal}$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی بستر جاذب و ذرات فلزی می‌باشند. ماکسول [۳۰] به صورت تئوری نسبت گرادیان دماها را به صورت رابطه (۲۸) به دست آورد:

$$\frac{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{metal}}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_b} = \frac{nK_{metal}}{(K_b + (n - 1)K_{metal})} \quad (28)$$

در این رابطه  $n$  ضریب تجربی شکل ذرات است. با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۲۷)، رابطه (۲۹) به دست آمده که توسط همیلتون برای مواد با شکل ذرات مختلف ارائه شده است [۲۹]:

$$K_{eff} = K_b \times \frac{K_{metal} + (n - 1)K_b + (n - 1)\varphi(K_{metal} - K_b)}{K_{metal} + (n - 1)K_b - \varphi(K_{metal} - K_b)} \quad (29)$$

فلزی به منظور ثابت ماندن حجم بستر، در حقیقت ذرات جاذب بر اساس کسر حجمی با ذرات آلومینیومی جایگزین می‌شوند.

### ۳-۱- روابط حاکم

کسر حجمی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varphi = \frac{V_{metal}}{V_t} \quad (22)$$

### جدول ۱- مشخصات هندسی، خواص ترمودینامیکی و شرایط عملکردی مورد استفاده در مدل سازی

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
مساحت سطح مقطع کانال	$A$	23.4	mm <sup>2</sup>
ضخامت کانال	$t_{chan}$	2.42	mm
طول بستر	$BL$	20	mm
ضخامت فین	$FT$	0.5	mm
دبی جرمی سیال حامل انرژی برای یک کانال	$\dot{m}_t$	0.01	kg/s
قطر ذرات جاذب	$d_p$	0.3	mm
تخلخل ذرات	$\varepsilon_p$	0.5	-
تخلخل بستر	$\varepsilon_b$	0.36	-
انرژی فعال سازی پخش سطحی	$E_a$	42000	J/mol
ضریب ثابت پخش سطحی	$D_{so}$	$2.54 \times 10^{-4}$	m <sup>2</sup> /s
ضریب انتقال گرمای هدایت معادل بستر	$k_b$	0.2	W/m.K
فشار اواپراتور	$P_{evap}$	1280	Pa
فشار کندانسور	$P_{cond}$	4230	Pa
دمای سیال گرم ورودی	$T_{heating}$	90	°C
دمای سیال سرد ورودی	$T_{cooling}$	30	°C

جدول ۲- خواص ذرات آلومینیومی افزوده شده به بستر

قطر (mm)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	ضریب هدایت گرمایی (W/m.K)
0.3	2702	903	237

جدول ۳- ضریب هدایت گرمایی معادل بستر به ازای کسر

کسر حجمی (%)	ضریب هدایت گرمایی معادل بستر (W/m.K)
$\phi$	$K_{eff}$
0	0.2
5	0.235
10	0.285
15	0.363
20	0.496

ارتفاع بستر، زمان چرخه به دلیل انتقال گرمای ضعیف تر در بستر به شدت افزایش می‌یابد. افزودن ذرات فلزی، سبب کاهش زمان چرخه در تمامی ارتفاع بسترها می‌شود؛ ولی میزان کاهش زمان چرخه با افزایش ارتفاع بستر، افزایش پیدا می‌کند. برای مثال به ازای افزودن ذرات فلزی با کسر حجمی ۲۰٪ نسبت به حالت بدون ذرات، زمان چرخه برای ارتفاع بستر ۳mm تقریباً ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند؛ درحالی‌که به ازای همین مقدار افزایش کسر حجمی ذرات برای ارتفاع بستر ۲۰mm، تقریباً ۲۷٪ زمان چرخه کاهش می‌یابد.

در شکل ۶ تغییرات توان سرمایش مخصوص بر حسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر نشان داده شده است. با توجه به رابطه (۱۸)، SCP با زمان چرخه رابطه عکس دارد؛ لذا کاهش زمان چرخه منجر به افزایش SCP سیستم می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای عملکردی مهم، COP سیستم است که طبق رابطه (۱۹) با سرمایش تولیدی رابطه مستقیم و با گرمای ورودی به سیستم رابطه عکس دارد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب، اثر افزودن ذرات به بستر بر سرمایش تولیدی و گرمایش ورودی به سیستم در ارتفاع‌های مختلف بستر را برای دو بستر مدل شده نشان می‌دهند. شایان ذکر است که سرمایش تولیدی و گرمایش ورودی، تابعی از تعداد بستر می‌باشند که در مدل

با قرار دادن ضریب شکل کره برابر با ۳ در رابطه (۲۹)، رابطه به شکل رابطه (۳۰) در می‌آید که همان رابطه‌ای است که توسط ماکسول برای ذرات کروی ارائه گردیده است [۳۰].

$$K_{eff} = \frac{K_{metal} + 2K_b + 2\phi(K_{metal} - K_b)}{K_{metal} + 2K_b - \phi(K_{metal} - K_b)} K_b \quad (30)$$

برگمن [۳۱] با در نظر گرفتن برهم‌کنش<sup>۱</sup> بین ذرات کروی مدل زیر را ارائه کرد:

$$K_{eff} = \frac{(3\phi - 1) \frac{K_{metal}}{K_b} + (3(1 - \phi) - 1) + \sqrt{f}}{4} K_b \quad (31)$$

که در آن:

$$f = \left[ (3\phi - 1) \frac{K_{metal}}{K_b} + (3(1 - \phi) - 1) \right]^2 + 8 \frac{K_{metal}}{K_b} \quad (32)$$

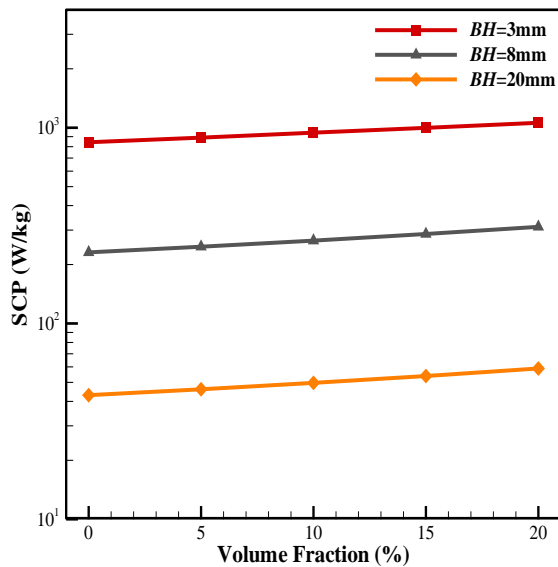
لازم به ذکر است، علاوه بر در نظر برهم‌کنش بین ذرات کروی، مزیت دیگر مدل برگمن نسبت به مدل ماکسول این است که برگمن توانایی پیش‌بینی ضریب هدایت گرمایی معادل در کسر حجمی‌های بالا را نیز دارا است. در این پژوهش، کسر حجمی‌ها در بازه ۵٪ تا ۲۰٪ در نظر گرفته شده‌اند. ابعاد و خواص ذرات آلومینیومی در جدول ۲ و ضریب هدایت گرمایی معادل بستر برای هر کسر حجمی در جدول ۳ نشان داده شده است.

### ۳-۲- اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر جاذب بدون فین

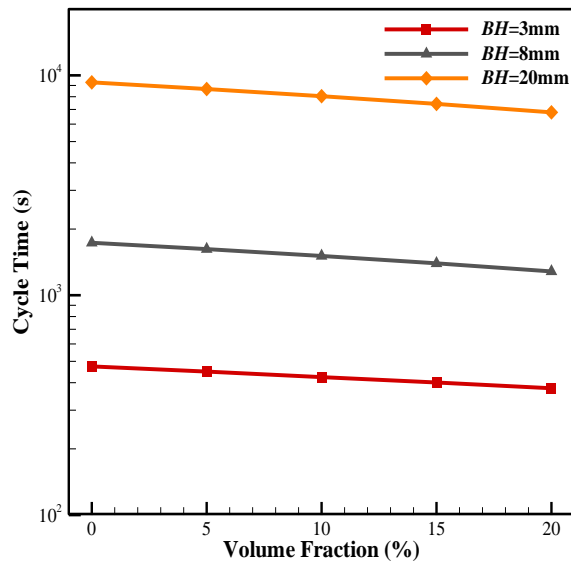
در این قسمت تأثیر افزودن ذرات آلومینیومی بر عملکرد یک سیستم تبرید جذب سطحی بدون فین بررسی شده است. شکل ۵ تغییرات زمان چرخه برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر (BH) را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که ارتفاع بستر برابر با ارتفاع فین در بسترهای فین دار است (شکل ۱). نتایج نشان می‌دهد، با افزودن ذرات و در نتیجه افزایش ضریب هدایت گرمایی معادل بستر، زمان چرخه کاهش پیدا می‌کند که این کاهش با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش

<sup>1</sup> Interactions

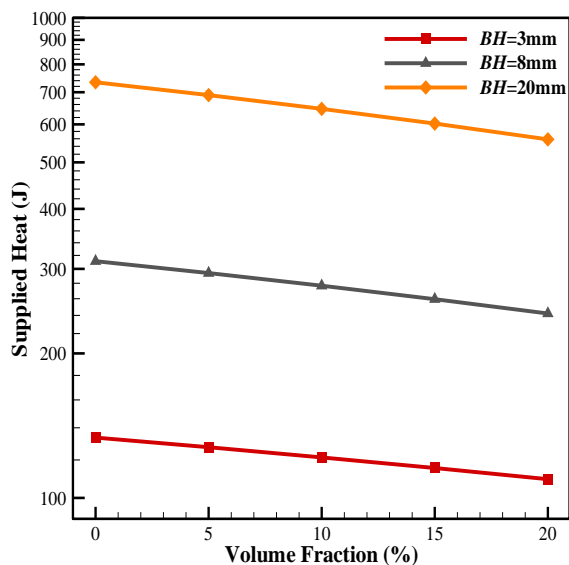




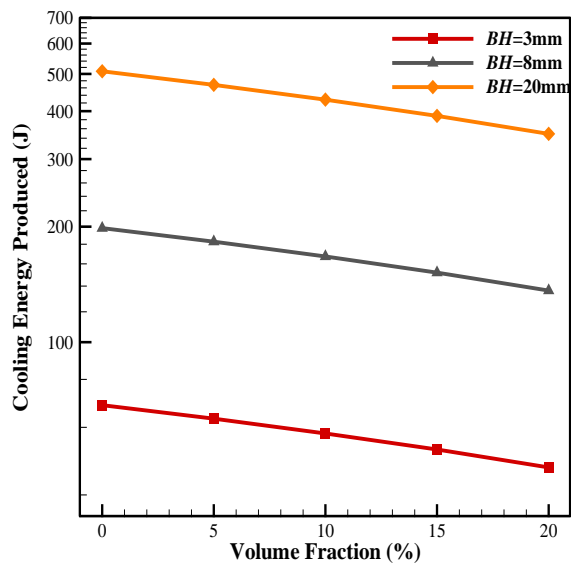
شکل ۶- تغییرات توان سرمایش مخصوص برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر



شکل ۵- تغییرات زمان چرخه برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر



شکل ۸- تغییرات گرمایش ورودی به سیستم برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر



شکل ۷- تغییرات سرمایش تولیدی سیستم برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر

ماندن این حجم نیاز است که ذرات فلزی با ذرات سیلیکازل جایگزین شوند. از طرفی با افزایش درصد کسر حجمی ذرات فلزی، درصد بیشتری از ذرات جاذب می‌بایست از بستر خارج شوند؛ در نتیجه با کاهش جرم ذرات جاذب، میرد احیا شده و در نهایت توان سرمایش تولیدی در سیستم کاهش خواهد

سازی حاضر و با توجه به شکل ۱، به ازای دو بستر کامل محاسبه شده‌اند و به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. با توجه به هر ابعاد مشخص از بستر (ارتفاع، عرض و طول بستر)، حجم مشخصی از ذرات سیلیکازل در بستر قرار می‌گیرند که با توجه به آنچه پیش‌تر ذکر گردید، برای ثابت

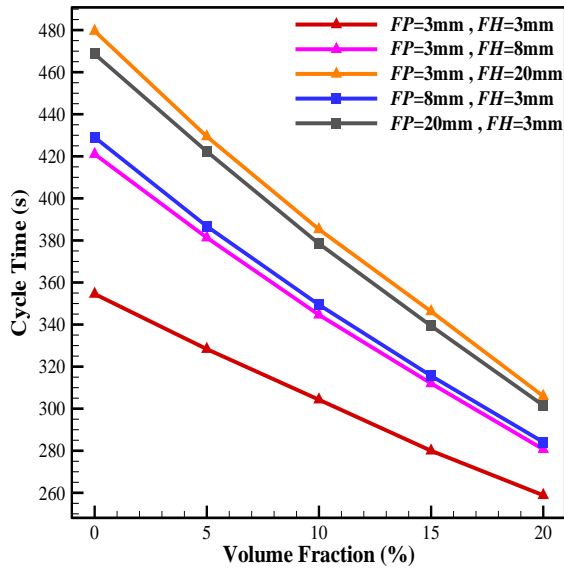
ذرات کاهش و در نتیجه *SCP* سیستم افزایش می‌یابد. شیب نمودار *SCP* با افزایش ابعاد فین‌ها (گام و ارتفاع) افزایش می‌یابد. برای مثال، استفاده از کسر حجمی ۲۰٪ ذرات در بستر برای حالتی که ارتفاع و گام فین ۳mm است، موجب افزایش *SCP* به میزان ۳۷٪ می‌شود، درحالی‌که افزودن ذرات با کسر حجمی ۲۰٪ زمانی که ارتفاع فین به ۲۰mm افزایش پیدا کند، سبب افزایش *SCP* به میزان ۵۵٪ می‌شود.

در شکل ۱۲ تغییرات ضریب عملکرد سیستم به ازای کسر حجمی‌های مختلف ذرات در ارتفاع و گام فین‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، با افزایش ذرات آلومینیوم در بستر، *COP* کاهش پیدا می‌کند که میزان کاهش *COP* با افزایش ابعاد بستر کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد، درصد کاهش *COP* بیشتر تحت تأثیر ارتفاع فین است. برای مثال، افزودن ذرات فلزی با کسر حجمی ۲۰٪، موجب کاهش ۲۳٪ در *COP* سیستم نسبت به حالت بدون ذرات فلزی در گام و ارتفاع فین ۳mm می‌شود. اگر ارتفاع و گام فین به ترتیب به ۲۰mm افزایش یابد، *COP* سیستم به ترتیب ۱۵٪ و ۲۰٪ به ازای استفاده از کسر حجمی ۲۰٪ ذرات فلزی نسبت به حالت بدون ذرات کاهش می‌یابد. در انتها نیز به منظور مقایسه تأثیر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر در حضور و عدم حضور فین، جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است، جرم مواد جاذب در دو حالت با فین و بدون فین برای ارتفاع بسترهای مختلف یکسان است. در حالت با فین، گام فین ۳mm در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ درصد کاهش *COP* و افزایش *SCP* برای حالتی که از کسر حجمی ۲۰٪ ذرات استفاده شود، نسبت به حالت بدون ذرات نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن ذرات آلومینیومی در حالتی که فین‌ها حضور دارند، اثر مطلوب‌تری بر *SCP* سیستم دارند، هرچند که افزودن ذرات فلزی در حضور فین‌ها سبب کاهش بیشتر *COP* نسبت به حالت بدون فین می‌شود؛ همچنین تأثیر افزایش ارتفاع بر *SCP* و *COP* سیستم در دو حالت با فین و بدون فین در جدول ۴ به خوبی نشان داده شده است.

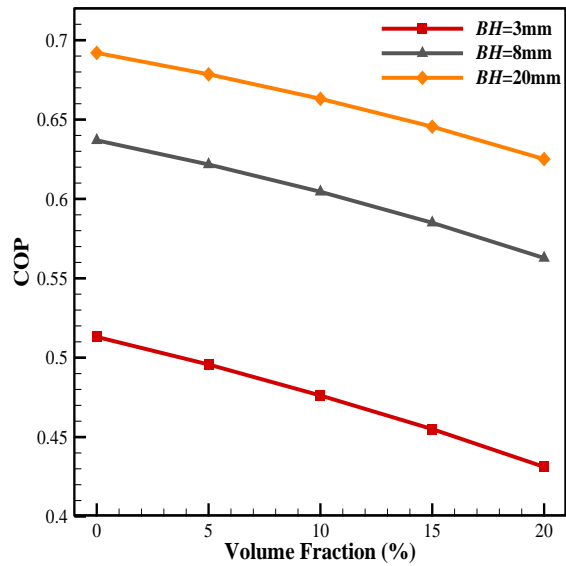
یافت. لازم به ذکر است، با توجه به شکل ۷ و اینکه در هر کسر حجمی، درصد یکسانی از ذرات جاذب نسبت به ارتفاع‌های مختلف بستر از بستر خارج می‌شود، در نتیجه شیب کاهش سرمایش تولیدی به ازای افزایش کسر حجمی ذرات فلزی برای تمام ارتفاع بسترها یکسان است و بیشترین کاهش به ازای کسر حجمی، ۲۰٪ ذرات و معادل با ۳۱٪ است. از طرف دیگر، به دلیل اینکه ذرات آلومینیومی از ظرفیت گرمایی حجمی بالاتری نسبت به بستر جاذب برخوردار هستند، با افزایش ذرات آلومینیومی گرمای مورد نیاز برای گرمایش بستر نیز افزایش می‌یابد، درحالی‌که همان‌طور که گفته شد، با افزودن ذرات آلومینیومی جرم ذرات جاذب کاهش می‌یابد، لذا انرژی موردنیاز جهت احیای مبرد نیز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در نهایت مقدار گرمای مورد نیاز بستر با افزایش کسر حجمی ذرات آلومینیومی کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۹ تغییرات ضریب عملکرد سیستم برحسب کسر حجمی‌های مختلف ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی ذرات، *COP* سیستم کاهش پیدا می‌کند که در حقیقت نشان دهنده این واقعیت است که کاهش سرمایش تولیدی در سیستم، بر کاهش گرمایش ورودی غلبه کرده است؛ همچنین با افزایش ارتفاع بستر تأثیر افزودن ذرات بر *COP* کاهش پیدا می‌کند.

### ۳-۳- اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر جاذب در حضور فین

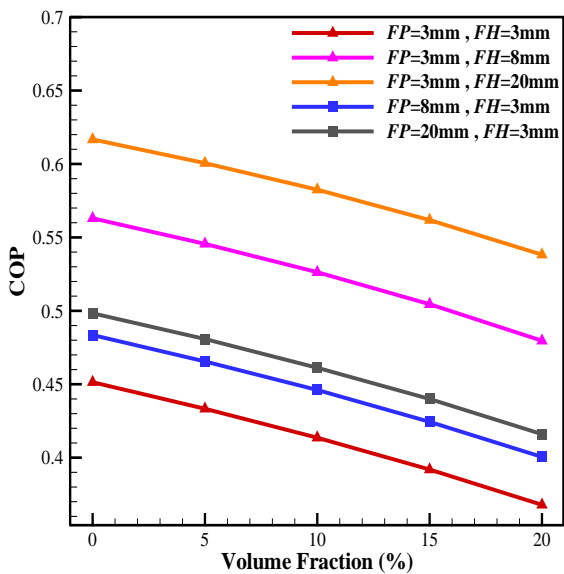
در این بخش به بررسی اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر جاذب در حضور فین‌های مستطیلی پرداخته شده است. شایان ذکر است، استفاده از سطوح گرمایی به طور قابل ملاحظه‌ای موجب بهبود انتقال گرما در بستر متخلخل و در نتیجه کاهش زمان چرخه و افزایش *SCP* سیستم می‌شود که در مرجع [۱۰]، به تفصیل بررسی شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب، تغییرات زمان چرخه و توان سرمایش مخصوص سیستم به ازای کسر حجمی‌های مختلف ذرات آلومینیومی در ارتفاع و گام فین‌های مختلف را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مشابه با حالت بسترهای بدون فین، زمان چرخه با افزایش کسر حجمی



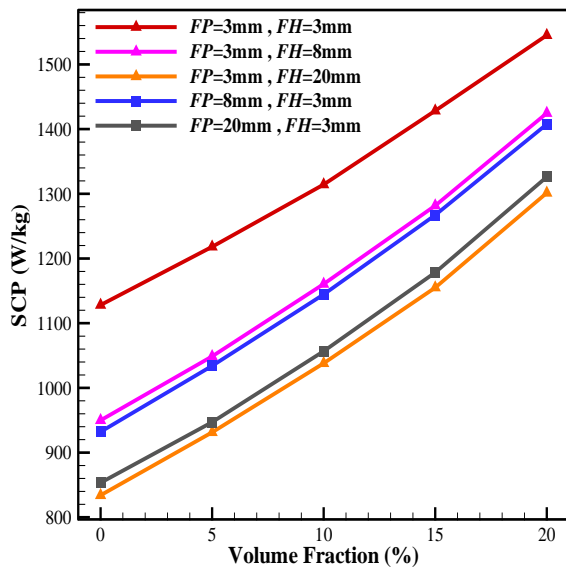
شکل ۱۰- تغییرات زمان چرخه برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع و گام فین‌های مختلف



شکل ۹- تغییرات ضریب عملکرد سیستم برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع‌های مختلف بستر



شکل ۱۲- تغییرات ضریب عملکرد سیستم برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع و گام فین‌های مختلف



شکل ۱۱- تغییرات توان سرمایش مخصوص برحسب کسر حجمی ذرات آلومینیومی در ارتفاع و گام فین‌های مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بستر جاذب یک چیلر جاذب سطحی با مبدل گرمایی صفحه-تخت و فین‌های مستطیلی به منظور بررسی اثر افزودن ذرات آلومینیومی به بستر به صورت سه‌بعدی و به روش حجم کنترل شبیه‌سازی گردید. اثر افزودن ذرات در دو

حالت بستر در حضور فین‌های مستطیلی و عدم حضور فین‌ها در شرایط هندسی مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

- افزودن ذرات آلومینیومی در هر دو حالت مورد بررسی، سبب افزایش ضریب هدایت گرمایی بستر

نفوذپذیری بستر جاذب ( $m^2$ )	$k_d$	و در نتیجه کاهش زمان چرخه تبرید و در نهایت افزایش توان سرمایش مخصوص می‌شود.
دما (K)	$T$	• درصد افزایش توان سرمایش مخصوص به ازای یک مقدار ثابت کسر حجمی ذرات در حضور فین بیشتر بوده که این اثر با افزایش ابعاد بستر تشدید می‌شود.
فشار (Pa)	$P$	• افزودن ذرات آلومینیومی در هر دو حالت مورد بررسی، موجب کاهش ضریب عملکرد سیستم می‌گردد که این کاهش در حضور فین بیشتر است؛ همچنین نتایج نشان داد که اثر حضور ذرات فلزی بر ضریب عملکرد سیستم بیش‌تر تحت تأثیر ارتفاع بستر (یا همان ارتفاع فین) است.
حجم ( $m^3$ )	$V$	
سرعت (m/s)	$u$	
مقدار مبرد جذب‌شده در واحد جرم جاذب ( $kg/kg_b$ )	$w$	
مقدار جذب تعادلی ( $kg/kg_b$ )	$w^*$	
جرم (Kg)	$m$	

توان سرمایش مخصوص ( $W/kg$ )  $SCP$

ضریب عملکرد  $COP$

مساحت ( $m$ )  $A$

زمان (s)  $t$

قطر ذرات ( $m$ )  $d_p$

ضریب ثابت پخش سطحی ( $m^2/s$ )  $D_{so}$

انرژی فعال‌سازی پخش سطحی ( $J/mol$ )  $E_a$

شعاع ذرات جاذب ( $m$ )  $R_p$

ثابت جهانی گازها ( $J/mol.K$ )  $R_u$

گرمای جذب ( $J/kg$ )  $\Delta H$

ثابت گاز ( $J/kg.K$ )  $R_g$

علائم یونانی

تخلخل  $\varepsilon$

لزجت دینامیکی ( $kg/m.s$ )  $\mu$

جدول ۴- مقایسه اثر افزودن ذرات آلومینیومی با کسر حجمی ۲۰٪ بر پارامترهای عملکردی سیستم در دو حالت حضور و عدم حضور فین

	بستر با فین (گام فین = ۳ mm)		بستر بدون فین	
	درصد افزایش SCP FH (BH)	درصد کاهش COP	درصد افزایش SCP	درصد کاهش COP
	37	18.5	26	16
	50	14.8	35	11.6
	55	12.8	37	9.7

۵- فهرست علائم

$BL$	طول بستر ( $m$ )
$BH$	ارتفاع بستر ( $m$ )
$FH$	ارتفاع فین ( $m$ )
$FP$	گام فین ( $m$ )
$C_p$	گرمای ویژه ( $J/kg.K$ )
$k$	ضریب هدایت گرمایی ( $W/m.K$ )

[2] Aristov YI (2017) Adsorptive transformation and storage of renewable heat: Review of current trends in adsorption dynamics. <i>Renewable Energy</i> 110: 105-114.	چگالی ( $kg/m^3$ )	$\rho$
[3] Solmuş İ, Rees DAS, Yamalı C, Baker D (2012) A two-energy equation model for dynamic heat and mass transfer in an adsorbent bed using silica gel/water pair. <i>Int J Heat Mass Tran</i> 55: 5275-5288.	کسر حجمی	$\varphi$
[4] Solmuş İ, Yamalı C, Yıldırım C, Bilen K (2015) Transient behavior of a cylindrical adsorbent bed during the adsorption process. <i>Appl Energ</i> 142: 115-124.	بستر جاذب	b
[5] Niazmand H, Dabzadeh I (2012) Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins. <i>Int J Refrig</i> 35: 581-593.	کانال	chan
[6] مهدوی خواه م، نیازمند ح (۱۳۹۱) مطالعه عددی میزان اهمیت مقاومت انتقال جرم برون‌ذره‌ای در مدل‌سازی محیط متخلخل بستر چیلرهای جذب سطحی. <i>مجله مهندسی مکانیک مدرس</i> ۲۹-۱۹: ۱۲(۶).	فین	fin
[7] Golparvar B, Niazmand H (2018) Adsorption cooling systems for heavy trucks A/C applications driven by exhaust and coolant waste heats. <i>Appl Therm Eng</i> 135:158-169.	مبدل گرمایی	hex
[8] گل پرور ب، محمدزاده کوثری م، نیازمند ح (۱۳۹۵) بهینه‌سازی بستر جاذب لوله با فین‌های طولی در سیستم تبرید جذب سطحی با بکارگیری حرارت اتلافی آگزوز. <i>مجله مهندسی مکانیک مدرس</i> ۲۷۸-۲۶۷: ۱۶(۱۲).	سطح کنترل	cs
[9] Verde M, Harby K, Corberán JM (2017) Optimization of thermal design and geometrical parameters of a flat tube-fin adsorbent bed for automobile air-conditioning. <i>Appl Therm Eng</i> 111: 489-502.	محفظه	cham
[10] Mohammadzadeh Kowsari M, Niazmand H, Tokarev MM (2017) Bed configuration effects on the finned flat-tube adsorption heat exchanger performance: Numerical modeling and experimental validation. <i>Appl Energ</i> 213:540-554.	چرخه	cycle
[11] Solmuş İ, Yamalı C, Kaftanoğlu B, Baker D, Çağlar A (2010) Adsorption properties of a natural zeolite-water pair for use in adsorption cooling cycles. <i>Appl Energ</i> 87:2062-2067.	کمینه	min
[12] Demir H, Mobedi M, Ülkü S (2009) Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed. <i>Int Commun Heat Mass</i> 36: 372-377.	فلز	metal
[13] Niazmand H, Talebian H, Mahdavihah M (2013) Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems. <i>Appl Therm Eng</i> 59: 243-252.	حجم کنترل	cv
[1] Demir H, Mobedi M, Ülkü S (2008) A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. <i>Renew Sust Energ Rev</i> 12: 2381-2403.	فاز گاز	g
	ذرات جاذب	p
	سیال ناقل انرژی	f
	کل	t
	اواپراتور	evap
	موثر	eff
	بیشینه	max

## ۶- مراجع

- [1] Demir H, Mobedi M, Ülkü S (2008) A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renew Sust Energ Rev* 12: 2381-2403.



- describing the sorption equilibrium between water vapor and a CaCl<sub>2</sub>-in-silica gel composite sorbent. *Russ J Phys Ch* 79:1490-1493.
- [23] Nield DA, Bejan A (2012) *Convection in Porous Media*. Springer Science & Business Media.
- [24] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN (2002) *Transport phenomena*. 2nd. New York.
- [۲۵] محمدزاده کوثری م (۱۳۹۵) مدل‌سازی عددی و بررسی مشخصات ساختاری بستر جاذب با مبدل صفحه-تخت در چیلر جذب سطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.
- [26] Rogala Z (2017) Adsorption chiller using flat-tube adsorbers-Performance assessment and optimization. *Appl Therm Eng* 121: 431-442.
- [27] San JY, Hsu HC (2009) Performance of a multi-bed adsorption heat pump using SWS-1L composite adsorbent and water as the working pair. *Appl Therm Eng* 29: 1606-1613.
- [28] Sapienza A, Frazzica A, Freni A, Aristov Y (2018) Adsorptive heat transformation and storage: Thermodynamic and kinetic aspects. In *Dynamics of Adsorptive Systems for Heat Transformation* 201: 1-18.
- [29] Hamilton RL, Crosser O (1962) Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Ind Eng Chem Fund* 1:187-191.
- [30] Maxwell JC (1881) *A treatise on electricity and magnetism* 1. Clarendon press.
- [31] Bruggeman VD (1935) Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. *Ann Phys-Berlin* 416: 636-664.
- [14] Waszkiewicz S, Tierney M, Scott HS (2009) Development of coated, annular fins for adsorption chillers. *Appl Therm Eng* 29: 2222-2227
- [15] Demir H, Mobedi M, Ülkü S (2010) The use of metal piece additives to enhance heat transfer rate through an unconsolidated adsorbent bed. *Int J Refrig* 33:714-720.
- [16] Rezk A, Al-Dadah R, Mahmoud S, Elsayed A (2013) Effects of contact resistance and metal additives in finned-tube adsorbent beds on the performance of silica gel/water adsorption chiller. *Appl Therm Eng* 53:278-284.
- [17] Askalany AA, Henninger SK, Ghazy M, Saha BB (2017) Effect of improving thermal conductivity of the adsorbent on performance of adsorption cooling system. *Appl Therm Eng* 110: 695-702.
- [۱۸] آذرفر م، نیازمند ح، طالبیان ه (۱۳۹۳) شبیه‌سازی عددی تأثیر افزایش انتقال حرارت در بستر جاذب بر عملکرد سیستم جذب سطحی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۱۲-۱۰۳: ۱۴(۸).
- [19] Aristov YI (2012) Adsorptive transformation of heat: principles of construction of adsorbents database. *Appl Therm Eng* 42: 18-24.
- [20] Sircar S, Hufton J (2000) Why does the linear driving force model for adsorption kinetics work?. *Adsorption* 6:137-147.
- [21] Mahdavihah M, Niazmand H (2013) Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance. *Appl Therm Eng* 50: 939-949.
- [22] Tokarev M, Okunev B, Safonov M, Kheifets L, Y. Aristov I (2005) Approximation equations for