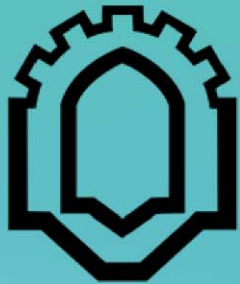


# ۲۴ ISME 2016

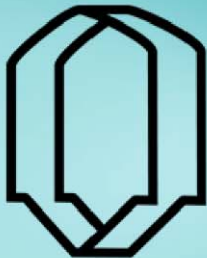
۷ لغایت ۹ اردیبهشت ۱۳۹۵

بیست و چهارمین همایش  
سالانه بین المللی مهندسی مکانیک

24th Annual International Conference  
on Mechanical Engineering



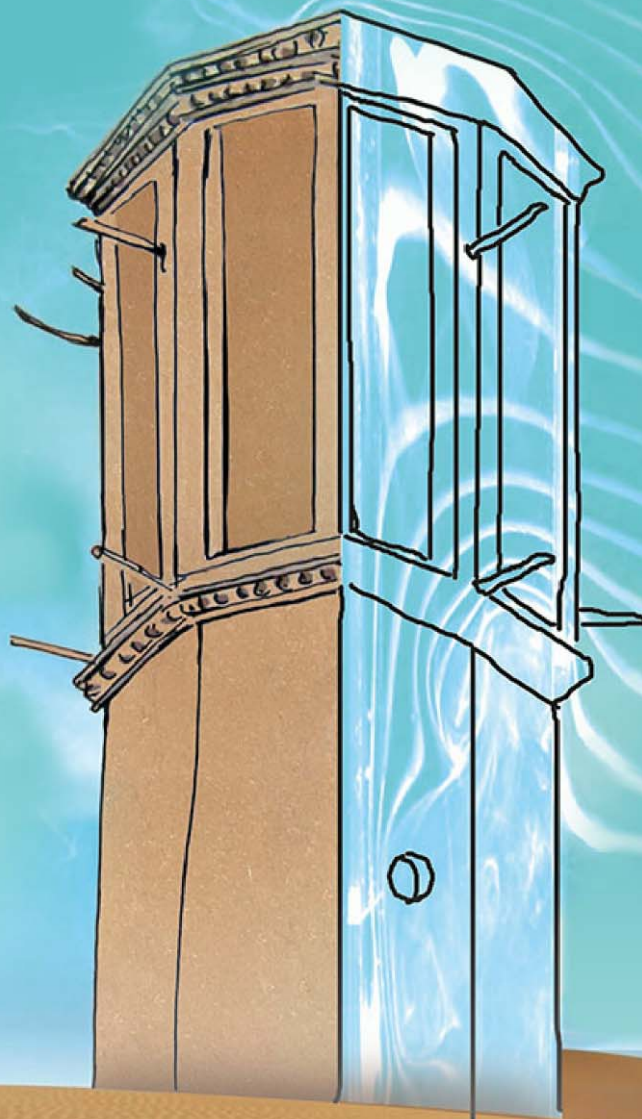
ISME 2016  
Yazd University



دانشگاه یزد



انجمن مهندسان مکانیک ایران



## گواهی ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می شود که مقاله ای با عنوان  
مدلسازی عددی جیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت و  
فین های مثلثی برای بستر جاذب

توسط نویسندگان

میلاذ محمدزاده کوثری، سید بهزاد گلپور، حمید نیازمند

در

بیست و چهارمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران

که در دانشگاه یزد برگزار گردید، ارائه شده است.

دکتر سید محمد نزرک  
دسرمایش



دکتر منصور رفیعیان  
دسر علمی همایش

د. صفائیة بلوار دانشگاه  
دانشگاه یزد  
رئیس فنی و مهندسی  
انجمن مهندسی مکانیک  
مندی پیشی ۸۹۱۸۵-۸۹۱  
Department of Mechanical  
Engineering Yazd University  
Dانشگاه یزد  
۸۹۱۸۵-۸۹۱  
Fazlollahi

## مدلسازی عددی چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی برای بستر جاذب

میلاذ محمدزاده کوثری<sup>۱</sup>، سید بهزاد گلپور<sup>۲</sup>، حمید نیازمند<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، mohamadzadeh.k.milad@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، behzadgolparvar@yahoo.com

<sup>۳</sup> استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، hniazmand@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله عملکرد چیلر جذب سطحی با جفت کاری آب-سیلیکاژل SWS1L به صورت عددی بررسی می‌شود. بدین منظور از یک مدل سه‌بعدی، غیرتعدادی و ترکیبی از هر دو مدل‌های انتقال گرما و جرم برای بستر جاذب با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی، استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر حوزه‌های مختلف به روش حجم کنترل و به صورت همزمان به وسیله‌ی زبان برنامه‌نویسی فرترن حل می‌شوند. نتایج عددی جهت اعتبارسنجی با نمونه‌ی تجربی مقایسه می‌شوند. چگونگی تغییرات مقدار جذب سیال عامل و فشار بستر و محفظه در طول زمان چرخه به تفصیل بررسی می‌شوند. مقادیر به دست آمده برای قدرت سرمایه‌ی مخصوص و ضریب کارکرد چیلر مورد مطالعه نیز به ترتیب  $(\frac{W}{kg})$  ۱۰۲۸ و ۰/۶۶ و مدت زمان چرخه نیز ۳۹۲ ثانیه می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی

چیلر جذب سطحی، بستر جاذب، فین‌های مثلثی، مدلسازی عددی

### مقدمه

افزایش روزافزون نیاز به انرژی و تغییرات آب و هوایی به وجود آمده در اثر استفاده از سیستم‌های تبرید مرسوم، دلایلی کافی برای مطالعه و بکارگیری سیستم‌هایی است که از منابع انرژی تجدیدپذیر و انرژی گرمایی تلف‌شده استفاده می‌کنند. بر اساس تخمین برآورده شده توسط موسسه بین‌المللی تبرید در پاریس<sup>۱</sup>، تقریباً ۱۵٪ از کل برق تولیدی در سراسر جهان صرف فرایندهای گوناگون تبرید و تهویه مطبوع می‌شود [۱]. سیستم‌های تبرید تراکمی بخار مرسوم از انرژی برق زیادی استفاده می‌کنند که موجب اتمام منابع سوخت فسیلی گران‌بها می‌شوند. همچنین میردهای استفاده شده در این سیستم‌ها به انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کنند. برخی از این میردها مانند کلروفلوروکربن‌ها و هیدروکلروفلوروکربن‌ها دارای اثر تخریبی روی لایه‌ی اوزون [۱] و هیدروفلوروکربن‌ها عامل گرمایش جهانی

هستند [۲]. از این رو برای ترفیع مشکلات فوق، سیستم‌های تبرید جذبی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفتند.

سیستم‌های مذکور به دو نوع جذب حجمی<sup>۵</sup> (مایع + بخار) و جذب سطحی<sup>۶</sup> (جامد + بخار) تقسیم می‌شوند. هدف از این مقاله معرفی و بررسی عملکرد نوع خاصی از چیلرهای جذب سطحی است که در این زمینه پژوهش‌های متعددی نیز صورت گرفته است.

نیازمند و دابزاده [۳] بستر جاذب با فین‌های حلقوی<sup>۷</sup> و جفت کاری آب-سیلیکاژل را با در نظر گرفتن فرایندهای انتقال گرما و جرم درون بستر، به صورت دویبعی مدلسازی عددی نمودند و عملکرد چیلر را مورد ارزیابی قرار دادند.

مهدوی‌خواه و نیازمند [۴] با مدلسازی عددی سه‌بعدی بستر جاذب با فین‌های صفحه‌ای<sup>۸</sup> پیوسته و در نظر گرفتن فرایندهای انتقال گرما و جرم درون بستر، عملکرد چیلر جذب سطحی با جفت کاری آب-سیلیکاژل<sup>۹</sup> SWS1L را تحلیل نمودند. در ادامه‌ی این مدلسازی، نیازمند و طالبیان تاثیر قطر ذرات جاذب [۵] و همچنین تاثیر تغییر پارامترهایی همچون هندسه‌ی فین‌ها، ارتفاع و فاصله‌ی بین فین‌ها [۶] را بر عملکرد چیلر جذب سطحی به تفصیل بررسی نمودند.

سانتاماریا<sup>۱۰</sup> و همکاران [۷] عملکرد بستر جاذب با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی و جفت کاری آب-ژئولیت<sup>۱۱</sup> AQSOAZ02 را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. گوردیوا<sup>۱۲</sup> و همکاران [۸] با بررسی آزمایشگاهی مبدل پیشین و استفاده از جفت کاری لیتیوم بروماید/سیلیکا-تانول<sup>۱۳</sup> عملکرد چیلر را بهینه نمودند.

در ادامه‌ی مطالعات فراوان پیشین که در اینجا تنها به چند مورد محدود اشاره شد، برآن شدیم تا در این مقاله به بررسی عملکرد چیلر جذب سطحی با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی و جفت کاری آب-سیلیکاژل SWS1L بصورت عددی بپردازیم.

<sup>5</sup> Absorption: liquid + vapor

<sup>6</sup> Adsorption: solid + vapor

<sup>7</sup> Annular fins

<sup>8</sup> Plate finned

<sup>9</sup> Water-silica gel

<sup>10</sup> Santamaria

<sup>11</sup> Water-zeolite

<sup>12</sup> Gordeeva

<sup>13</sup> LiBr/silica-ethanol

<sup>1</sup> The International Institute of Refrigeration in Paris

<sup>2</sup> CFC: chloro-fluoro-carbon

<sup>3</sup> HCFC: hydro-chloro-fluoro-carbon

<sup>4</sup> HFC: hydro-fluoro-carbon

## مدل سازی چیلر جذب سطحی

در دو جهت دیگر در دستگاه مختصات کارتزین (x, y) حل می شود. شایان ذکر است فین ها بصورت پیوسته و یک تکه تحلیل عددی می شوند.

$$\int_{cv} \rho_{fin} C_{pfin} \frac{\partial T_{fin}}{\partial t} dV = \int_{cs} (k_{fin} \vec{\nabla} T_{fin}) \cdot d\vec{A} + S_{tube-fin} + S_{fin-bed} \quad (3)$$

بستر جذب

معادله ی بقای انرژی بستر جذب که با فرض اتلاف ویسکوز<sup>10</sup> و کار فشاری ناچیز بصورت سه بعدی حل خواهد شد، در دستگاه مختصات کارتزین (x, y, z) به شکل زیر می باشد:

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

که در آن  $\rho C_p$  ظرفیت گرمایش کلی بستر<sup>11</sup> و  $\Delta H$  و  $\frac{\partial w}{\partial t}$  به ترتیب گرمای جذب<sup>12</sup> و نرخ جذب<sup>13</sup> می باشند [5].

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

که  $\varepsilon_t$  تخلخل<sup>14</sup> کلی و  $C_{p(s,a)}$  گرمای ویژه جفت جذب شونده/جاذب است [5].

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

برای محاسبه نرخ جذب از مدل نیرو محرکه ی خطی<sup>15</sup> استفاده می شود. این مدل در واقع مقاومت درون ذره های برای جذب و احیا سیال عامل را در نظر می گیرد [4].

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

که در آن  $w^*$  مقدار جذب تعادلی<sup>16</sup> بوده و براساس تئوری پتانسیل پلانی<sup>17</sup> برای جفت کاری آب-سیلیکاژل SWS1L محاسبه می شود [5].

معادله پیوستگی برای سیال عامل بصورت زیر می باشد:

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

سرعت بخار در بستر، با استفاده از قانون دارسی<sup>18</sup> محاسبه می شود.

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (9)$$

که در آن  $K_{app}$  نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب<sup>19</sup> است. برای آشنایی با چگونگی محاسبه ی آن به مرجع [4] رجوع شود.

در این مقاله مدلسازی محفظه<sup>1</sup> جاذب شامل چهار بخش سیال ناقل گرما، لوله ی تخت<sup>2</sup> فلزی، فین ها و بستر جاذب<sup>3</sup> می باشد. به منظور افزایش دقت در مدلسازی بستر، از هر دو مدل انتقال گرما و انتقال جرم استفاده می شود. این مدل ها قادرند با بررسی فرایندهای انتقال گرما، انتقال جرم در بین ذرات متخلخل (مقاومت برون ذره ای<sup>4</sup>) و انتقال جرم در درون ذرات متخلخل (مقاومت درون ذره ای<sup>5</sup>) توزیع مناسبی از پارامترهایی چون دما، فشار و جذب در نقاط مختلف بستر ارائه دهند. کندانسور و اواپراتور نیز با استفاده از رابطه ای ساده مدل خواهند شد.

## معادلات حاکم

به دلیل پیچیدگی هندسه های مورد بررسی و ارتباط آن ها با یکدیگر و در نتیجه مفصل بودن ترم های چشمه در معادلات حاکم، از باز کردن ترم های مذکور در این مقاله خودداری می شود. شایان ذکر است معادلات حاکم حوزه های مختلف که در ادامه بررسی می شوند نسبت به یک دستگاه مختصات واحد سنجیده نشده و هر کدام از حوزه ها، دستگاه مختصات محاسباتی منحصر به خود را دارند.

## سیال ناقل گرما

معادله ی بقای انرژی سیال ناقل گرما بصورت یک بعدی در جهت محور لوله و با فرض دمای متمرکز<sup>7</sup> در دو جهت دیگر حل می شود.

$$\int_{cv} \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV + \int_{cs} (\rho_f C_{pf} \vec{u}_f T_f) \cdot d\vec{A} = \int_{cs} (k_f \vec{\nabla} T_f) \cdot d\vec{A} + S_{ftuid-tube} \quad (1)$$

## لوله ی تخت

معادله ی بقای انرژی لوله ی تخت آلومینیومی که بصورت سه بعدی حل خواهد شد، در دستگاه مختصات کارتزین<sup>8</sup> (x, y, z) به شکل زیر می باشد:

$$\int_{cv} \rho_{tube} C_{ptube} \frac{\partial T_{tube}}{\partial t} dV = \int_{cs} (k_{tube} \vec{\nabla} T_{tube}) \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

معادله ی فوق در دستگاه مختصات عمومی<sup>9</sup> ( $\xi, \eta, Z$ ) حل می شود.

## فین ها

معادله ی بقای انرژی برای فین های آلومینیومی به دلیل ضخامت ناچیز آن ها بصورت متمرکز در جهت ضخامت فین و بصورت دوبعدی

<sup>10</sup> Viscous dissipation

<sup>11</sup> Total heat capacity of the bed

<sup>12</sup> Heat of adsorption

<sup>13</sup> Uptake rate

<sup>14</sup> Porosity

<sup>15</sup> LDF: Linear driving force model

<sup>16</sup> Equilibrium uptake

<sup>17</sup> Polanyi potential theory

<sup>18</sup> Darcy's law

<sup>19</sup> Apparent permeability of adsorbent bed

<sup>1</sup> Chamber

<sup>2</sup> Flat tube

<sup>3</sup> Adsorbent bed

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

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

<sup>6</sup> Domain

<sup>7</sup> Lumped assumption

<sup>8</sup> Cartesian coordinate system

<sup>9</sup> General coordinate system

با ترکیب معادلات (۸) و (۹)، معادله‌ی زیر برای محاسبه‌ی فشار بستر به دست می‌آید:

$$\int_{cv} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV = \int_{cs} \left( \rho_g \frac{K_{app}}{\mu} \vec{\nabla} P \right) \cdot d\vec{A} - \int_{cv} \rho_b \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (10)$$

با حل معادله‌ی (۱۰) یا به عبارت دیگر با فرض عدم یکنواختی فشار بستر، درواقع مقاومت برون ذره‌ای نیز در نظر گرفته خواهد شد. شایان ذکر است معادلات (۴)، (۹) و (۱۰) در دستگاه مختصات عمومی  $(\xi, \eta, Z)$  بصورت سه‌بعدی حل می‌شوند.

مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده به کمک معادله‌ی حالت گاز کامل و فشار به دست آمده از معادله‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود.

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

فشار محفظه در فرایندهای احیا و جذب فشار ثابت به ترتیب برابر با فشار کندانسور و اواپراتور در نظر گرفته می‌شود. برای فرایندهای جرم ثابت، نیاز است که ابتدا مقدار جرم کل ورودی یا خروجی از سطح مشترک بستر با محفظه در هر گام زمانی<sup>۱</sup> محاسبه شود و به کمک آن چگالی محفظه محاسبه شده و با داشتن دمای محفظه از فرض میانگین دما روی سطح مشترک بستر با محفظه، در نهایت فشار محفظه از معادله‌ی حالت گاز کامل محاسبه خواهد شد.

$$\dot{m}_g = \int_{Interface} \rho_g \vec{u}_g \cdot d\vec{A} \quad (12)$$

$$\dot{m}_g = \nabla_{cham} \frac{\partial \rho_{cham}}{\partial t} \quad (13)$$

$$P_{cham} = \rho_{cham} R_g T_{cham} \quad (14)$$

کندانسور و اواپراتور با استفاده از رابطه‌ی زیر مدل می‌شوند:

$$Q_{evap/cond} = \int_{isobaric \ cooling/heating} L_v \dot{m}_g dt \quad (15)$$

که در آن  $L_v$  گرمای نهان تبخیر آب است.

قدرت سرمایش مخصوص<sup>۲</sup> و ضریب کارکرد<sup>۳</sup> از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating}} \quad (16)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{m_b \times t_{cycle}} \quad (17)$$

$$Q_{heating} = \int_{t_0}^{t_2} \int_{cs} (\rho C_p)_f (T_{f,in} - T_{f,out}) \vec{u}_f \cdot d\vec{A} dt \quad (18)$$

که  $t_0$  و  $t_2$  به ترتیب زمان‌های شروع فرایند گرمایش جرم ثابت و اتمام فرایند گرمایش فشار ثابت می‌باشند.  $m_b$  مقدار جرم جاذب که در این مطالعه سیلیکاژل است، می‌باشد.

## شرایط اولیه و مرزی

به دلیل ناپایا بودن معادلات حاکم، شروع حل برنامه‌ی عددی، نیازمند شرایط اولیه مناسب برای تمامی حوزه‌های مورد مطالعه می‌باشد. برای مقادیر دمایی، از دمای سیال ناقل گرما در حالت سرمایش و برای مقادیر فشار، از فشار اواپراتور استفاده می‌شود. کمیت‌های مورد نیاز دیگر بر اساس این دما و فشار کاری، مقداردهی اولیه می‌شوند.

برای حل معادلات حاکم دیفرانسیلی، علاوه بر شرایط اولیه، با توجه به مرتبه‌ی معادلات و تعداد متغیرهای مستقل، به تعداد مشخصی از شرایط مرزی نیاز است.

شرط مرزی معادله انرژی سیال ناقل گرما در ورودی، دمای گرمایش یا سرمایش سیال، متناسب با فرایندهای احیا یا جذب در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط مرزی معادلات انرژی حوزه‌های دیگر، چنانچه حوزه‌ها در تماس با یکدیگر باشند، از فرض برابری دما در سطح مشترک حوزه‌ها و بدون در نظر گرفتن مقاومت تماسی<sup>۴</sup> استفاده شده و این فرض با استفاده از شرط برابری شار گرمایی<sup>۵</sup> در سطح مشترک، تصحیح می‌شود. در غیر اینصورت، شرط گرادیان دمای صفر در نظر گرفته می‌شود. تنها مورد استثنا، شرایط مرزی پریودیک برای جهت پریودیک لوله‌ی تخت می‌باشد.

در مورد شرایط مرزی معادله‌ی فشار بستر، برای وجوه در تماس با محفظه، از فشار محفظه به گونه‌ای که پیشتر اشاره شد و برای وجوه دیگر، از شرط گرادیان فشار صفر استفاده می‌شود.

## ملاحظات عددی و شرایط کاری

پس از بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه، گام زمانی و تعداد چرخه‌ی مورد نیاز برای پایداری فرایندهای چرخه، شبکه‌ی مناسب انتخاب شده و مقدار گام زمانی برای فرایندهای جرم ثابت برابر با ۰/۱ و برای فرایندهای فشار ثابت برابر با ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب گام زمانی کوچکتر برای فرایندهای جرم ثابت، تغییرات شدید و سریع پارامترهایی چون دما و فشار بستر در این فرایندها می‌باشد. تعداد چرخه‌ی انتخاب شده، دو چرخه و تعداد جزء-بستر<sup>۶</sup> مناسب مورد مطالعه بین فین‌ها، شش جزء-بستر انتخاب شد.

معادلات حاکم به روش حجم کنترل<sup>۷</sup> با استفاده از بسط پیشرو<sup>۸</sup> برای ترم‌های زمانی، بسط مرکزی<sup>۹</sup> برای ترم‌های پخش<sup>۱۰</sup> و همرفت<sup>۱۱</sup> بستر و استفاده از روش تکرار ADI<sup>۱۲</sup> و حل کننده‌ی ماتریس سه قطری<sup>۱۳</sup> به صورت همزمان حل شدند.

<sup>4</sup> Contact resistance

<sup>5</sup> Heat flux

<sup>6</sup> Sub-bed

<sup>7</sup> Finite volume method

<sup>8</sup> Forward differencing scheme

<sup>9</sup> Central differencing scheme

<sup>10</sup> Diffusion

<sup>11</sup> Convective

<sup>12</sup> Alternating direction implicit method

<sup>13</sup> Tri-diagonal solver algorithm

<sup>1</sup> Time step

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

<sup>3</sup> COP: Coefficient of performance

$m^2/s$	$2/54 \times 10^{-4}$	$D_{so}$	ثابت پخشندگی سطحی <sup>۱</sup>
$J/mol$	$4/2 \times 10^4$	$E_a$	انرژی فعال سازی پخشندگی سطحی <sup>۲</sup>
$^{\circ}C$	۱۰	$T_{evap}$	دمای اوپراتور
$^{\circ}C$	۳۰	$T_{cond}$	دمای کندانسور
$^{\circ}C$	۹۰	$T_{heating}$	دمای ورودی سیال ناقل گرما در حین گرمایش
$^{\circ}C$	۳۰	$T_{cooling}$	دمای ورودی سیال ناقل گرما در حین سرمایش

در چرخه‌ی جذب سطحی، معیار خروج از فرایندهای جرم ثابت و فشار ثابت با یکدیگر متفاوت است. شرط خروج از مرحله گرمایش جرم ثابت رسیدن فشار محفظه به فشار کندانسور و در مرحله سرمایش جرم ثابت رسیدن فشار محفظه به فشار اوپراتور در نظر گرفته شده است. شرط خروج از مراحل فشار ثابت، بر اساس رسیدن به درصد معینی از جذب نهایی است که با استفاده از روابط زیر به ترتیب برای مراحل احیا و جذب فشار ثابت محاسبه شده است:

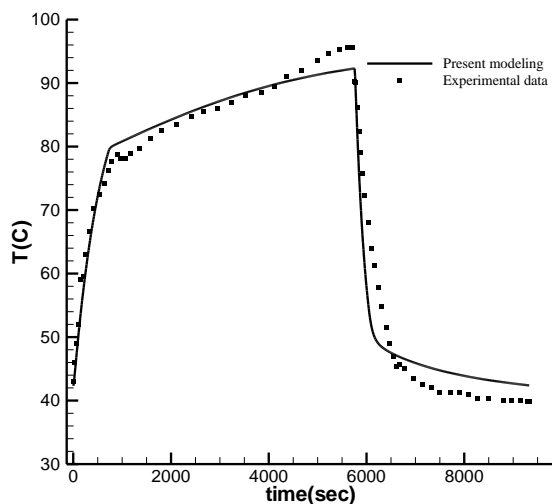
$$w_{min} = w_{min}^* + 0.2(w_{max}^* - w_{min}^*) \quad (19)$$

$$w_{max} = w_{max}^* - 0.2(w_{max}^* - w_{min}^*) \quad (20)$$

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

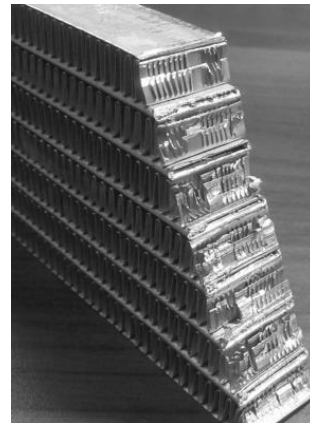
### اعتبارسنجی

به دلیل در دسترس نبودن نتایج تجربی برای چیلر آب-سیلیکاژل با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی، برای بررسی صحت نتایج با تغییر شبکه‌بندی، نتایج بدست آمده با نمونه‌ی تجربی مبدل رستوکیا و همکاران [۹] مقایسه شده و نتیجه این اعتبارسنجی در شکل ۳ برای دمای بستر درج شده است.

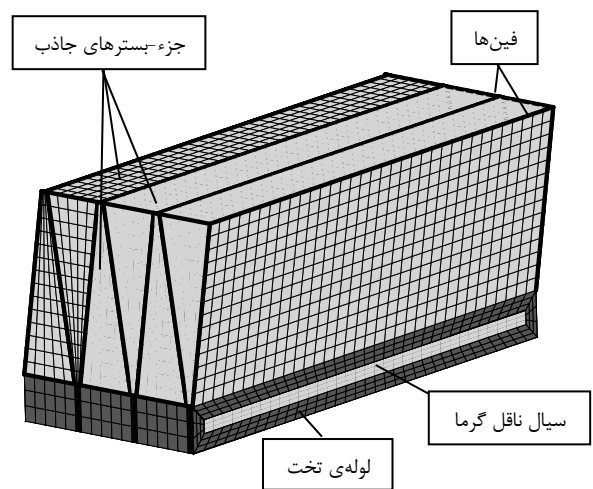


شکل ۳: مقایسه دمای میانگین بستر به روش عددی و تجربی

در شکل ۱ نمونه‌ی واقعی برش خورده از مبدل آلومینیومی لوله-تخت با فین‌های مثلثی و در شکل ۲ نمونه‌ی مدلسازی شده نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه‌ی واقعی برش خورده از مبدل لوله-تخت با فین‌های مثلثی [۷]



شکل ۲: نمونه‌ی مدلسازی شده از مبدل لوله-تخت با فین‌های مثلثی

در جدول ۱ برخی از خواص ترمودینامیکی و شرایط کاری استفاده شده در مدلسازی چیلر مذکور قرار داده شده است.

جدول ۱: خواص ترمودینامیکی و شرایط کاری

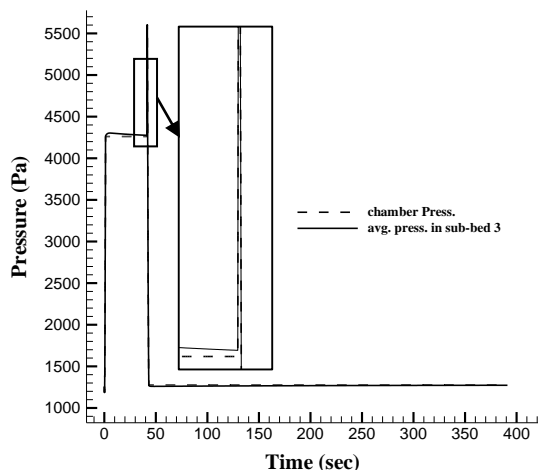
پارامتر	نماد	مقدار	یکا
شعاع ذرات	$R_p$	۰/۲۲۵	mm
دبی جرمی سیال ناقل گرمای عبوری از لوله‌ی تخت	$\dot{m}_f$	۰/۰۰۷	kg/s
قطر هیدرولیکی داخلی لوله‌ی تخت	$D_h$	۱/۱۶۶	mm
چگالی بالک بستر	$\rho_b$	۴۶۷	kg/m <sup>3</sup>
رسانندگی گرمایی موثر بستر	$k_b$	۰/۱۹۸	W/(m K)
تخلخل بستر	$\epsilon_b$	۰/۵۵	-
تخلخل ذرات	$\epsilon_p$	۰/۵۲۵	-

<sup>1</sup> Pre-exponent constant of surface diffusivity

<sup>2</sup> Activation energy of surface diffusivity

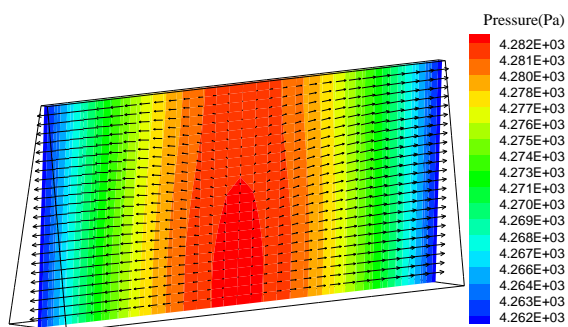
## نتایج

به منظور بررسی مقدار جذب در زمان‌های مختلف، مقدار میانگین سیال جذب شده در فاز جامد نسبت به زمان چرخه در شکل ۴ نشان داده شده است. در مرحله گرمایش جرم ثابت (مرحله اول)، مقدار سیال عامل جذب شده تقریباً ثابت می‌ماند و در مرحله گرمایش فشار ثابت (مرحله دوم) سیال عامل موجود در ذرات جاذب احیا شده و وارد کندانسور می‌شود و مقدار جذب کاهش می‌یابد. در مرحله سرمایش جرم ثابت (مرحله سوم) نیز مقدار سیال عامل جذب شده تقریباً ثابت خواهد ماند و در مرحله سرمایش فشار ثابت (مرحله چهارم)، با سرد شدن ذرات جاذب، سیال عامل از اوپراتور در ذرات جاذب جذب شده و مقدار جذب افزایش می‌یابد. محفظه جاذب در مرحله دوم به کندانسور و در مرحله چهارم به اوپراتور متصل است و به دلیل پایین‌تر بودن فشار در اوپراتور، عمل جذب در مرحله چهارم با سرعت کمتری نسبت به عمل احیا در مرحله دوم اتفاق می‌افتد، بنابراین مدت زمان مرحله چهارم نسبت به مدت زمان مرحله دوم بیشتر است. با توجه به شکل ۴ عملکرد هر شش جزء-بستر مشابه هم می‌باشد.

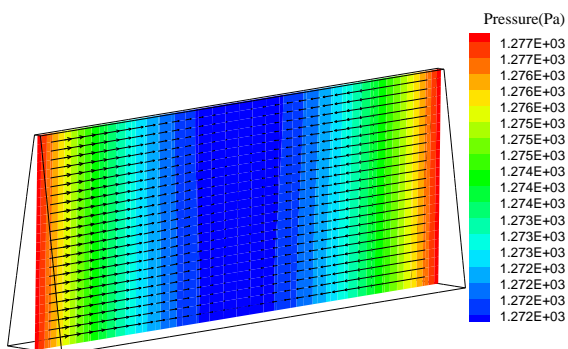


شکل ۵: تغییرات فشار میانگین بستر و فشار محفظه بر حسب زمان

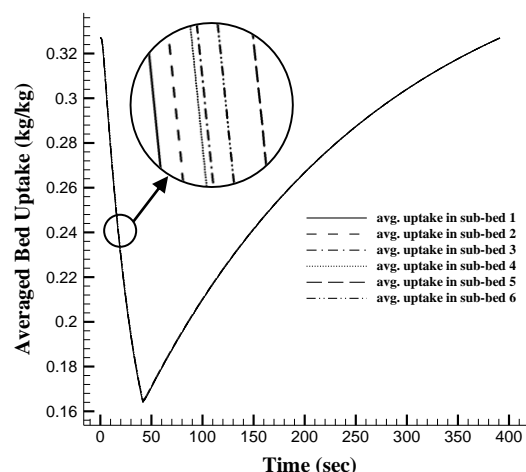
در شکل‌های ۶ و ۷ کانتور فشار و بردارهای سرعت جزء-بستر سوم به ترتیب در پایان مرحله گرمایش فشار ثابت و پایان مرحله سرمایش فشار ثابت نشان داده شده است.



شکل ۶: کانتور فشار جز-بستر سوم در پایان مرحله گرمایش فشار ثابت



شکل ۷: کانتور فشار جز-بستر سوم در پایان مرحله سرمایش فشار ثابت



شکل ۴: تغییرات مقدار جذب میانگین بر حسب زمان

در شکل ۵ تغییرات فشار میانگین در بستر ماده جاذب و فشار محفظه بر حسب زمان نشان داده شده است. در مرحله جرم ثابت که شیرهای ارتباطی با کندانسور و اوپراتور بسته‌اند، افزایش دما باعث احیای سیال عامل شده و فشار در بستر و محفظه افزایش می‌یابد. افزایش فشار در این مرحله در زمان کوتاهی نسبت به مراحل فشار ثابت انجام می‌شود و هنگامی که فشار داخل محفظه به فشار کندانسور برسد، شیر ارتباطی با کندانسور باز شده و احیای سیال عامل در فشار ثابت محفظه ادامه می‌یابد. به دلیل مقاومت انتقال جرم بین ذرات جاذب، هنگامی که فشار محفظه به فشار کندانسور رسیده است، فشار در نقاط داخلی بیشتر از فشار محفظه می‌باشد که باعث می‌شود فشار میانگین بستر از فشار محفظه بیشتر باشد. پس از آنکه مرحله دوم به پایان رسید، شیرهای ارتباطی با کندانسور و اوپراتور بسته شده و فرآیند جذب در جرم ثابت با سرد کردن ذرات جاذب شروع می‌شود. این عمل باعث می‌شود فشار محفظه تا فشار

مقادیر زمان چرخه، قدرت سرمایش مخصوص و ضریب کارکرد به دست آمده در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲: زمان چرخه، قدرت سرمایش مخصوص و ضریب کارکرد

پارامتر	نماد	مقدار	یکا
زمان چرخه	$t_{cycle}$	۳۹۲	sec
قدرت سرمایش مخصوص	SCP	۱۰۲۸	W/kg
ضریب کارکرد	COP	۰/۶۶	-

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله عملکرد چیلر جذب سطحی با جفت کاری آب-سیلیکازل SWS1L به صورت عددی با استفاده از مدلسازی سه‌بعدی، غیرتعادلی و ترکیبی از هر دو مدل انتقال گرما و جرم برای بستر جذب با مبدل صفحه-تخت و فین‌های مثلثی، بررسی شد. با حل همزمان معادلات حاکم بر حوزه‌های مختلف به روش حجم کنترل، تغییرات مقدار جذب و فشار بستر و محفظه در طول زمان چرخه به تفصیل بررسی شد. با توجه به مقادیر قدرت سرمایش مخصوص و ضریب کارکرد حاصل شده، استفاده از چیلر مذکور برای کاربردهای مختلف تبرید گزینه‌ای مناسب خواهد بود.

### فهرست علائم

COP	ضریب کارکرد، -
$k$	رسانندگی گرمایی، W/(m K)
$P$	فشار، Pa
$R_g$	ثابت گاز، J/(kg K)
$R_u$	ثابت جهانی گازها، J/(mol K)
$S$	چشمه گرمایی، J
SCP	قدرت سرمایش مخصوص، W/kg
$T$	دما، K
$\vec{u}$	بردار سرعت، m/s
$w$	مقدار متوسط سیال عامل جذب شده، kg adsorbate/kg adsorbent
$w^*$	سیال عامل جذب شده در حالت تعادلی، kg adsorbate/kg adsorbent
$w_\infty$	حداکثر سیال قابل جذب، kg adsorbate/kg adsorbent
<b>علائم یونانی</b>	
$\mu$	لزجت، N s/m <sup>2</sup>
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$V$	حجم، m <sup>3</sup>
<b>زیرنویس</b>	
$a$	ماده جذب شده
$b$	بستر جذب
cham	محفظه
cond	کندانسور
evap	اوپراتور

$f$  سیال ناقل گرما  
 $g$  فاز گاز

### مراجع

- [1] Choudhury, B., Saha, B. B., Chatterjee, P. K., and Sarkar, J. P., 2013, "An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling," *Applied Energy*, 104, pp. 554-567.
- [2] Critoph, R., and Zhong, Y., 2005, "Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 219(3), pp. 285-300.
- [3] Niazmand, H., and Dabzadeh, I., 2012, "Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins," *International Journal of Refrigeration*, 35(3), pp. 581-593.
- [4] Mahdavihah, M., and Niazmand, H., 2013, "Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance," *Applied Thermal Engineering*, 50(1), pp. 939-949.
- [5] Niazmand, H., Talebian, H., and Mahdavihah, M., 2013, "Effects of particle diameter on performance improvement of adsorption systems," *Applied Thermal Engineering*, 59(1), pp. 243-252.
- [6] Niazmand, H., Talebian, H., and Mahdavihah, M., 2012, "Bed geometrical specifications effects on the performance of silica/water adsorption chillers," *International Journal of Refrigeration*, 35(8), pp. 2261-2274.
- [7] Santamaria, S., Sapienza, A., Frazzica, A., Freni, A., Girmik, I. S., and Aristov, Y. I., 2014, "Water adsorption dynamics on representative pieces of real adsorbents for adsorptive chillers," *Applied Energy*, 134, pp. 11-19.
- [8] Gordeeva, L., Frazzica, A., Sapienza, A., Aristov, Y., and Freni, A., 2014, "Adsorption cooling utilizing the "LiBr/silica-ethanol" working pair: Dynamic optimization of the adsorber/heat exchanger unit," *Energy*, 75, pp. 390-399.
- [9] Restuccia, G., Freni, A., Vasta, S., and Aristov, Y., 2004, "Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modelling," *International Journal of Refrigeration*, 27(3), pp. 284-293.