

مدل سازی ریاضی دو بعدی غیر پایای یک کانال رطوبت زدایی جاذب جامد

محسن علی مندگاری^۱، حسن پهلوانزاده^{۲*}

^۱ بهشهر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، (mondegari_che@yahoo.com)

^۲ تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی (pahlavzh@modares.ac.ir)

چکیده

در این تحقیق مدل سازی دوبعدی غیر پایای یک کانال جاذب جامد به عنوان عنصر اصلی چرخ دیسکنت انجام شده است. پس از تعریف حجم کنترل مناسب و فرضیات، معادلات حاکم استخراج و شرایط مرزی و معادلات کمکی مناسب تعیین شده اند. معادلات دیفرانسیل پاره ای به روش المان محدود تجزیه و به کمک روش صریح حل شدند. دقت مدل سازی بستر به کمک داده های آزمایشگاهی و موازنه جرم و انرژی سنجیده می شود. پروفایل های دما و رطوبت در جاذب جامد و در هوا یکی از نتایج حاصل از مدل سازی بستر جاذب جامد می باشد که می تواند برای طراحی بهینه کانال جاذب جامد استفاده شود. علاوه بر پروفایل ها، اثر پارامترهایی همچون نفوذ محوری دما و رطوبت و همچنین تعداد گره ها در جهت ضخامت بررسی شدند. نتایج نشان می دهد می توان با حذف نفوذ محوری دما و رطوبت و کاهش تعداد گره ها همچنان مدلی دقیق داشت که حجم محاسبات مورد نیاز آن به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۱ تیر ۹۱

دریافت پس از اصلاح: ۲۵ شهریور ۹۲

پذیرش نهایی: ۱۳ آبان ۹۲

کلمات کلیدی:

مدل سازی ریاضی

جاذب جامد

رطوبت زدایی

۱- مقدمه

بار یک سامانه تهویه را می‌توان به دو بخش بار نهان و بار محسوس تقسیم کرد. برای رسیدن به شرایط مطلوب در فضای مورد نظر باید هر دو بار به خوبی تامین شوند. در روش‌های معمول تولید سرمایش، هوا تا دمایی پایین‌تر از نقطه شبنم خنک می‌شود تا رطوبت اضافی موجود در آن خارج شود. در برخی شرایط بعد از تنظیم رطوبت، هوا مقداری گرم می‌شود تا شرایط دمایی مورد نیاز را نیز تامین کند. به کمک جاذب جامد^۱ می‌توان بار نهان و بار محسوس را به صورت جداگانه استحصال کرد. رطوبت هوا به وسیله جاذب جامد حذف می‌شود و دمای هوا به کمک سامانه سرمایش به شرایط مورد نظر می‌رسد [۱]. جاذب جامد بعد از جذب رطوبت هوا باید احیاء شود تا بتواند مجدداً رطوبت را جذب کند. برای احیاء جاذب جامد از هوایی داغ با دمای °C ۲۶۰-۵۰ استفاده می‌شود [۲]. کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان تولید سرمایش، مهمترین دستاوردی است که از ترکیب جاذب جامد با سامانه‌های سرمایش معمول حاصل می‌شود [۳]. به همین دلیل امروزه بررسی این سامانه‌ها به‌طور وسیع مورد توجه محققین قرار گرفته است.

دسیکنت جامد در سامانه‌های سرمایش، معمولاً به شکل یک چرخ دوار که به آهستگی می‌چرخد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌سازی چرخ جاذب جامد به علت توأم بودن فرایند انتقال جرم و حرارت و چرخش چرخ جاذب جامد با دشواریهای زیادی روبرو است اما با دستیابی به یک مدل صحیح می‌توان اثر عوامل مختلف را با کمترین هزینه بررسی نمود. به همین دلیل مدل‌سازی ریاضی چرخ دسیکنت دوار برای پیش‌بینی خواص هوای خروجی از چرخ دسیکنت در شرایط مختلف، موضوع تحقیق عده‌ای از پژوهشگران بوده است. ژن^۲ و ورک^۳ مدل‌سازی ریاضی توأم معادلات انتقال جرم و حرارت در یک چرخ جاذب جامد دوار را در سال ۱۹۹۳ انجام داده‌اند، که این کار را می‌توان جزء اولین مدل‌سازی‌های مطلوب چرخ دسیکنت دانست [۴]. مدل‌سازی ریاضی به روش المان محدود و پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای چرخ دسیکنت توسط ژانگ^۴ و نیو^۵ صورت گرفت [۵]. مظفری-پهلوانزاده نشان داده‌اند که یک دور بهینه برای چرخ دسیکنت

وجود دارد که در آن حالت چرخ کمترین انرژی مصرفی را دارا خواهد بود [۶]. احمد^۱ و همکاران مدل‌سازی یک بعدی برای چرخ جاذب جامد توسعه دادند تا به کمک آن اثر متغیرهای طراحی چرخ جاذب جامد همچون طول چرخ، سرعت چرخ، نسبت سطح احیاء به فرآیند، تخلخل چرخ و پارامترهای عملیاتی همچون دبی جریان هوا، رطوبت نسبی هوای ورودی و دمای احیاء را بر روی عملکرد چرخ بررسی کنند [۷]. رویو^۷ و همکاران تحقیقات دامنه‌داری در زمینه مدل‌سازی چرخ جاذب جامد صورت داده‌اند. اولین مقاله آنها در بردارنده یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن جزئیات انتقال جرم و حرارت در یک سطح جاذب جامد بود [۸]. در ادامه آنها معادلات خود را برای یک کانال جاذب جامد توسعه دادند و اثر پارامترها را بررسی نمودند [۹]. مدل‌سازی ریاضی چرخ دسیکنت بادر نظر گرفتن ضریب آکرمین در انتقال جرم و حرارت توسط پهلوانزاده-زمزمیان ارائه شده است [۲].

از میان سطور ذکر شده چنین برداشت می‌گردد که تحقیق در زمینه مدل‌سازی چرخ جاذب جامد موضوعی است که سالهاست توسط برخی محققان دنبال می‌شود و جنبه‌های مختلف آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. البته باید در نظر داشت که علی‌رغم تلاشهایی که توسط محققان انجام شده، هنوز مدلی جامع و کامل که در بر دارنده تمام جنبه‌های انتقال جرم و حرارت در چرخ جاذب جامد باشد، ارایه نشده است [۱۰]. در این تحقیق، هدف اصلی، توسعه یک مدل دوبعدی غیر پایای کانال رطوبت‌زدای جاذب جامد است. پس از تکمیل مدل فرض‌های ساده شونده با هدف کاهش حجم محاسبات اثر برخی عوامل مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد تا بتوان از مدل در تحقیقات آتی برای مدل‌سازی رطوبت‌زدای جاذب جامد دوار استفاده کرد.

۲- سامانه رطوبت‌زدای جاذب جامد دوار

دسیکنت جامد در سامانه‌های سرمایش، معمولاً به شکل یک چرخ دوار که به آهستگی می‌چرخد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. رطوبت‌زدای جاذب جامد دوار یا چرخ جاذب جامد^۸ یک چرخ مشبک دوار فلزی است که سطح روی آن با دسیکنت جامد پوشانده شده است. برای انجام عملیات پیوسته، باید جذب و احیاء به صورت دوره‌ای صورت گیرد.

¹ Desiccant

² Zhen

³ Worek

⁴ Zhang

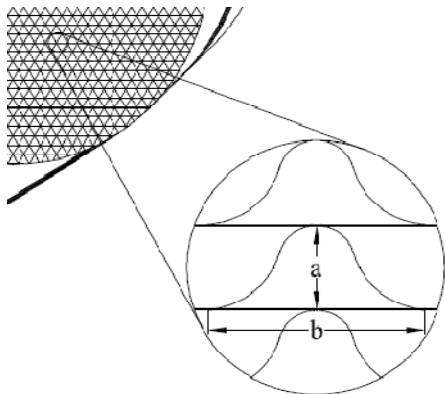
⁵ Niu

⁶ Ahmed

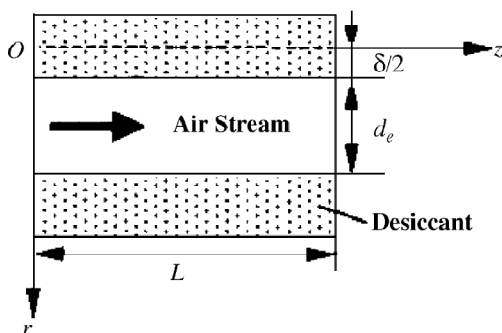
⁷ Ruivo

⁸ Desiccant Wheel

یک کانال جاذب جامد آورده شده، که می‌تواند مبنای مدل‌سازی قرار گیرد.



شکل (۲) یک برش عرضی از کانال‌های چرخ جاذب جامد و نمای بزرگ شده یک کانال



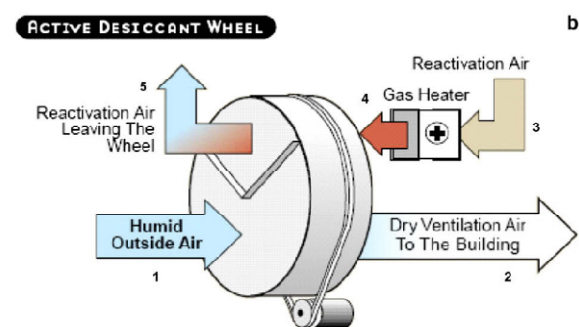
شکل (۳) برشی طولی از یک کانال جاذب جامد

۳-۱- فرمولاسیون ریاضی بستر جاذب جامد

با توجه به کنترل حجم نشان داده شده در شکل ۲ و ۳، چهار معادله موازنه جرم و انرژی برای هوا و جاذب جامد نوشته می‌شود. مفروضات اصلی که برای نوشتن این روابط استفاده می‌شوند عبارتند از:

- جریان هوا به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است.
 - از انتقال حرارت هدایتی در جهت محوری جریان هوا صرف نظر می‌شود.
 - از نفوذ جرم در جهت محوری جریان هوا صرف نظر می‌شود.
 - کانال‌ها بصورت یکسان و عایق فرض می‌شوند.
- در ادامه معادلات حاکم بر یک کانال جاذب جامد براساس فرضیات فوق آورده می‌شوند. مدل‌سازی ریاضی انجام شده را تا حدی می‌توان برپایه مدل ارائه شده توسط ژانگ و نیو دانست [۵].

بدین صورت که قسمتی از چرخ در مسیر هوای ورودی قرار دارد و رطوبت هوای ورودی را جذب می‌کند در حالی که قسمت دیگر توسط هوای گرم در حال احیاء می‌باشد و با چرخش چرخ جای این دو قسمت با یکدیگر عوض می‌شود [۲,۳,۶,۷,۱۰]. استفاده از چرخ جاذب جامد در سامانه‌های سرمایش جاذب جامد به علت فشرده بودن جاذب‌های جامد و خوردگی کمتر نسبت به سایر روش‌ها، متداول‌تر است. علاوه بر آن پارامترهای عملیاتی چرخ جاذب جامد را نسبت به سایر سامانه‌ها راحت‌تر می‌توان تغییر داد. در شکل ۱ یک نمونه چرخ جاذب جامد و نحوه جریان هوا در آن، نشان داده شده است.



شکل (۱) نمایی شماتیک از یک سامانه رطوبت‌زدای دوار

۳-۲ مدل‌سازی ریاضی رطوبت‌زدای دوار

مراحل اصلی بنا نهادن مدل ریاضی شامل موارد زیر می‌باشد:

- فرض‌های پیشنهادی و انتخاب حجم کنترل مناسب،
- بدست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر اساس موازنه جرم و انرژی،
- ارزیابی شرایط اولیه و مرزی متناسب با حجم کنترل و معادلات حاکم،
- ارزیابی روابط کمکی مناسب برای تکمیل معادلات حاکم،
- استفاده از روش ریاضی مناسب برای حل مدل.

در شکل ۲ یک برش عرضی از کانال‌های چرخ جاذب جامد و نمای بزرگ شده یک کانال نشان داده شده است. چرخ جاذب جامد از تعداد زیادی کانال‌های جاذب جامد یکسان تشکیل شده است. بدیهی است برا دستیابی به مدل‌سازی چرخ جاذب جامد، باید یک کانال (بستر) مدل شود و سپس به چرخ جاذب جامد تعمیم داده شود. در شکل ۳ برشی طولی از

ایزوترم تعادلی که برای این مدل استفاده شده، بر مبنای ایزوترم فروندلیچ است که در رابطه (۹) آورده شده است [۱۱].

$$W = 0.24\phi_d^{1/1.5}. \quad (9)$$

ارتباط بین رطوبت مطلق تعادلی و رطوبت نسبی تعادلی را می‌توان توسط رابطه (۱۰) بیان کرد [۱۰، ۱۲].

$$Y_d = \frac{0.62198\phi_d}{\frac{p_0}{p_{vs}} - \phi_d}. \quad (10)$$

برای محاسبه فشار بخار p_{vs} ، می‌توان از رابطه (۱۱) استفاده کرد [۱۰، ۱۲].

$$p_{vs} = \exp\left(23.196 - \frac{3816.44}{(T_d - 46.13)}\right). \quad (11)$$

قطر هیدرولیک کانال سینوسی را می‌توان به کمک رابطه (۱۲) محاسبه کرد [۱۳].

$$d_e/b = \left(\frac{1.0542 - 0.4660\gamma - 0.1180\gamma^2}{+0.179\gamma^3 - 0.0436\gamma^4} \right) \gamma \quad \gamma = a/b \quad (12)$$

ضرایب جابجایی انتقال حرارت و جرم توسط روابط (۱۳-الف و ب) مشخص می‌گردند که تابع ضعیفی از عدد رینولدز می‌باشند [۱۰، ۱۲].

$$h_c = 0.671\dot{m}'_g c_{pg} Re^{-0.51}, \quad (13-الف)$$

$$K_y = 0.704\dot{m}'_g Re^{-0.51}. \quad (13-ب)$$

حرارت حاصل از جذب در این تحقیق وابسته به میزان رطوبت جذب شده در نظر گرفته شده که توسط رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد [۱۰].

$$q_{st} = \begin{cases} (-12400W + 3500) \times 10^3, & W \leq 0.05, \\ (-1400W + 2950) \times 10^3, & W > 0.05. \end{cases} \quad (14)$$

به کمک معادلات حاکم، شرایط اولیه و مرزی و همچنین معادلات کمکی که بیان شد می‌توان یک کانال جذب جامد و یا به عبارتی چرخ جذب جامد را مدل‌سازی نمود. علاوه بر معادلات مذکور، خواص ترموفیزیکی هوای خشک، بخار آب، جذب جامد نیز مورد نیاز است که از روش و روابط ذکر شده توسط رویوو و همکاران استفاده شده است [۸، ۹].

موازنه جرم در هوا:

$$\frac{1}{u} \frac{\partial Y_a}{\partial t} + \frac{\partial Y_a}{\partial z} = \frac{4K_y}{d_e u \rho_g} (Y_{ds} - Y_a). \quad (1)$$

موازنه انرژی در هوا:

$$\frac{1}{u} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{4h_c}{d_e u \rho_g c_{pg}} (T_{ds} - T_g). \quad (2)$$

موازنه جرم در جاذب جامد:

$$\begin{aligned} \varepsilon_t \rho_{ad} \frac{\partial Y_d}{\partial t} + \rho_d \frac{\partial W}{\partial t} = & \\ \rho_{ad} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(D_G \frac{\partial Y_d}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(D_G \frac{\partial Y_d}{\partial r} \right) \right] + & \\ \rho_d \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(D_s \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right]. & \end{aligned} \quad (3)$$

موازنه انرژی در جاذب جامد:

$$\rho_d c_{pt} \frac{\partial T_d}{\partial t} = k_d \left(\frac{\partial^2 T_d}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T_d}{\partial r^2} \right) + q_{st} \rho_d \frac{\partial W}{\partial t}. \quad (4)$$

شرایط اولیه برای حل معادلات حاکم جاذب جامد عبارتند از:

$$T_{di}(0, r, z) = T_{d, initial}, \quad (5-الف)$$

$$Y_{di}(0, r, z) = Y_{d, initial}. \quad (5-ب)$$

شرایط مرزی برای هوا (احیا / فرآیند):

$$T_{ai}(t, 0) = T_{ai, in}, \quad (6-الف)$$

$$Y_{ai}(t, 0) = Y_{ai, in}. \quad (6-ب)$$

شرایط مرزی جاذب جامد بر اساس آدیباتیک بودن سطوح:

$$\frac{\partial T_d}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad (7-الف)$$

$$\frac{\partial Y_d}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial Y_d}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial Y_d}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0. \quad (7-ب)$$

شرایط مرزی موازنه جرم و انرژی بر روی سطح جاذب جامد:

$$-k_d \frac{\partial T_d}{\partial r} \Big|_{r=\delta} = h_c (T_s - T_g), \quad (8-الف)$$

$$\begin{aligned} \left(\rho_a D_G \frac{\partial Y_d}{\partial r} + \rho_d D_s \frac{\partial W}{\partial r} \right) \Big|_{r=\delta} & \\ = K_y (Y_a - Y_{ds}) & \end{aligned} \quad (8-ب)$$

۲-۳- روش حل مدل ریاضی

با توجه به پیچیدگی و غیر خطی بودن معادلات حاکم که از ترکیب موازنه جرم و انرژی حاصل می‌شوند، نمی‌توان به صورت تحلیلی مجموعه معادلات حاکم را حل کرد و ناگزیر از بکارگیری روش‌های عددی خواهیم بود. روشی که تاکنون به صورت وسیع برای حل این مجموعه معادلات استفاده شده، روش المان محدود^۱ بوده است [۱۰]. به همین دلیل در تحقیق حاضر ابتدا معادلات دیفرانسیل حاکم به روش پیش‌رو تجزیه و برای حل آنها از روش ضمنی^۲ استفاده شد. مقادیر مختلف گام محاسباتی در هر سه جهت با هدف کاهش حجم محاسبات و دستیابی به همگرایی بررسی شدند. مقادیر حاصل عبارتند از: در جهت طول $\Delta L = 0.05 \text{ m}$ در جهت ضخامت جاذب جامد $\Delta \delta = 0.02 \text{ mm}$ و در جهت زمان $\Delta t = 0.1 \text{ s}$. با توجه قابلیت‌های نرم‌افزار MATLAB، از نسخه R2010a این نرم‌افزار برای حل مجموعه معادلات ذکر شده استفاده شد

۳-۳- ارزیابی دقت مدل‌سازی ریاضی

دقت مدل‌سازی را می‌توان به روش‌های مختلف مورد بررسی قرارداد. یکی از روش‌ها بررسی قوانین بقای جرم و انرژی به صورت ریاضی است. در طی فرآیند رطوبت‌زدایی و یا رطوبت‌گیری در چرخ جاذب جامد، دبی جرمی هوای خشک ثابت باقی می‌ماند اما رطوبت از هوا به جاذب جامد و یا بالعکس منتقل می‌شود. موازنه جرم را می‌توان به عنوان تفاضل رطوبت هوا در مقایسه با تفاضل رطوبت جاذب جامد در نظر گرفت. در روابط (۱۵) الی (۱۷) نحوه محاسبه موازنه جرم آورده شده که به کمک آن در هر لحظه خطای موازنه جرم برای هر المان محاسبه می‌شود. نحوه محاسبه موازنه انرژی نیز به همین ترتیب بوده است.

$$\dot{m}_{ads,a} = \dot{m}_{ap,in} (Y_{ap,in} - Y_{ap,out}), \quad (15)$$

$$\dot{m}_{ads,d} = \Phi \pi \delta L \rho_d \frac{(W|_{t=final} - W|_{t=initial})}{\Delta t}, \quad (16)$$

$$error\% = \left| \frac{\dot{m}_{ads,a} - \dot{m}_{ads,d}}{\dot{m}_{ads,d}} \right| \times 100. \quad (17)$$

برای هر گره در جهت محوری محاسبات مذکور صورت گرفت. بیشترین خطا مربوط به گره‌های ابتدایی کانال به مقدار

حداکثر ۱٪ مشاهده شد. این میزان خطا نیز به علت انتقال جرم و حرارت زیاد در نقاط ابتدایی کانال رخ داده است. علاوه بر محاسبات ریاضی دقت مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی نیز سنجیده شد که نشان دهنده تطابق مطلوب بین مدل دو بعدی و داده‌های آزمایشگاهی است. پژوهش کاملی در خصوص دستیابی به داده‌های آزمایشگاهی توسط مولفان این مقاله صورت گرفته است [۱۴، ۱۵]. اندازه‌گیری‌های انجام شده، دقت تجهیزات اندازه‌گیری، روش انجام کار و سایر موارد مرتبط را می‌توان در فوق یافت که به سبب اختصار از ذکر مجدد آنها خودداری می‌شود.

۴- بحث و بررسی نتایج

در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی غیر پایای دو بعدی کانال جاذب جامد بیان می‌شود. در این تحقیق شرایط یک کانال ثابت چرخ جاذب جامد و بدون چرخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این کانال در حالت نخست فرآیند جذب و در حالت دوم فرآیند احیا رخ می‌دهد. با توجه به مشابهت نسبی جذب و احیا، نتایج حاصل از فرآیند جذب مورد بررسی قرار می‌گیرند. پارامترهای کانال جاذب جامد مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول (۱) پارامترهای ژئومتری کانال جاذب جامد ثابت

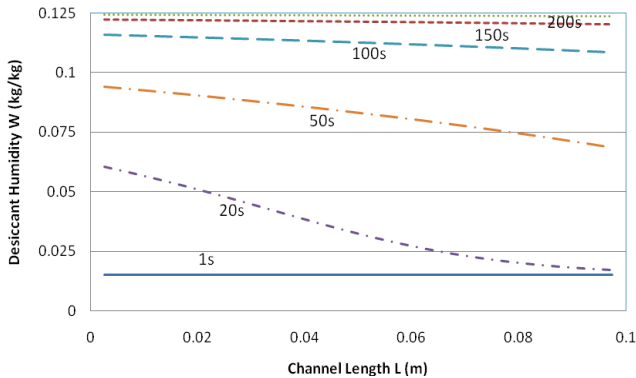
$\delta(\text{mm})$	$t(\text{s})$	$L(\text{m})$	$b(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
۰/۲	۲۰۰	۰/۱	۳/۵	۱/۷

در این قسمت چنین فرض می‌شود که کانال جاذب جامد ابتدا در تعادل با هوای گرم 100°C و رطوبت مطلق 10 gr/kg قرار داشته و احیا شده سپس این کانال در معرض هوای فرآیند با دمای 30°C و رطوبت مطلق 10 gr/kg قرار می‌گیرد. بر اساس داده‌های فوق برنامه مدل اجرا و نتایج خروجی در قالب نمودار ترسیم شد. در شکل ۴ تغییرات دمای هوای عبوری از کانال نشان داده شده است. محور افقی نمودار طول کانال می‌باشد که پروفایلها برای زمان‌های مختلف ترسیم شده است. در لحظه اول ($t=1$) دمای هوا متأثر از جاذب جامد است و دمای آن افزایش می‌یابد به طوریکه بعد از طی کردن حدود ۴۰٪ از طول کانال دمای آن همان دمای جاذب جامد می‌گردد. رفته رفته با گذشت زمان به علت خنک تر شدن بستر، دمای هوا عبوری از کانال به دمای هوای ورودی

¹ Finite Difference

² Implicit

پایینی قرارداد اما رفته رفته با گذشت زمان و جذب رطوبت، مقدار آن افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه روند جذب رطوبت در جاذب جامد وابسته به نفوذ و روندی کند است، مانند بقیه نمودارها، تغییرات شدیدی ندارد و به صورت خطی تغییر می‌کند. در این نمودار نیز می‌توان دید که پس از سپری کردن زمانی حدود ۲۰۰s دیگر رطوبتی توسط جاذب جامد جذب نمی‌شود به عبارت دیگر به حالت اشباع رسیده است.

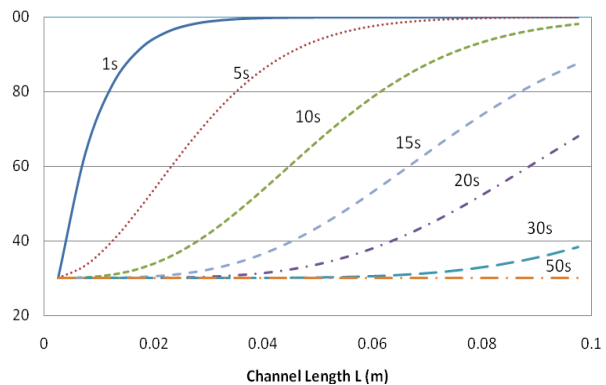


شکل (۶) تغییرات رطوبت مطلق وسط لایه جاذب جامد (δ/2) در زمان‌های مختلف در طول کانال ثابت

معدود محققانی در راستای تحقیقات خود، پروفایل‌های مختلف درون لایه جاذب جامد را بررسی نموده‌اند. نتایج حاصل از این بخش را می‌توان منطبق بر نتایج ارائه شده توسط رویوو و همکاران دانست [۸]. البته باید در نظر داشت که مدل‌سازی ریاضی و برخی معادلات کمکی این تحقیق متفاوت است.

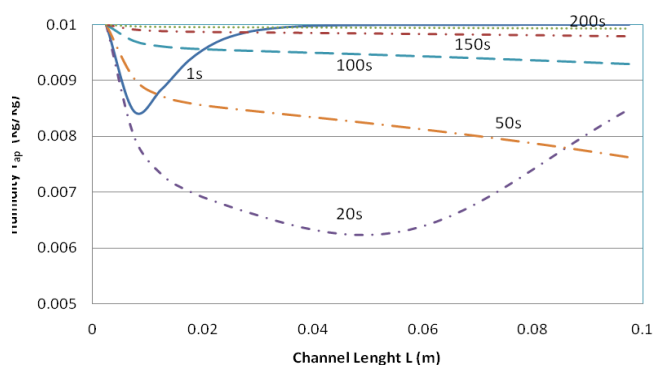
هدف اصلی از بکاربردن کانال جاذب جامد خشک کردن هوا است. به عبارت دیگر شرایط هوای خروجی از کانال (دما و رطوبت) می‌تواند به عنوان خروجی اصلی مدل‌سازی تلقی شود. در شکل ۷ تغییرات دما و رطوبت خروجی بر حسب زمان نشان داده شده است. در نمودار مشاهده می‌شود که بعد از حدود ۱۰۰s تغییر قابل ملاحظه‌ای در رطوبت هوا مشاهده نمی‌شود. با توجه به این مطلب، برای کانال طراحی شده، فرآیند جذب حدود ۱۰۰s حالت بهینه عملکرد قلمداد می‌شود. زیرا زمان بیشتر از آن تأثیری در خشک کردن هوا ندارد و تنها موجب هدر رفتن انرژی می‌شود. البته باید در نظر داشت که پس از حدود ۵۰s تعادل دمایی بین جاذب جامد و هوا ایجاد می‌شود و انتقال حرارتی اتفاق نمی‌افتد.

نزدیک‌تر می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که بعد از گذشت حدود ۵۰s تغییر قابل توجهی در دمای هوا اتفاق نمی‌افتد.



شکل (۴) تغییرات دمای هوای فرآیند در زمان‌های مختلف در طول کانال ثابت

در شکل ۵ تغییرات رطوبت مطلق هوا در طول چرخ جاذب جامد و در زمان‌های مختلف ترسیم گردیده است. با توجه به اینکه فرآیند انتقال جرم کندتر از انتقال حرارت صورت می‌گیرد، بازه زمانی برای این نمودار تا ۲۰۰s توسعه یافته است. می‌توان مشاهده کرد که پس از زمان حدود ۲۰۰s رطوبت مطلق ورودی و خروجی کانال جاذب جامد تغییر قابل توجهی ندارد به عبارت دیگر حالت تعادل حاکم شده است. به کمک اینچنین نموداری می‌توان زمان مناسب برای رطوبت-زدایی را بدست آورده به طوری که هوا در انتهای آن، شرایطی نزدیک به تعادل داشته باشد.



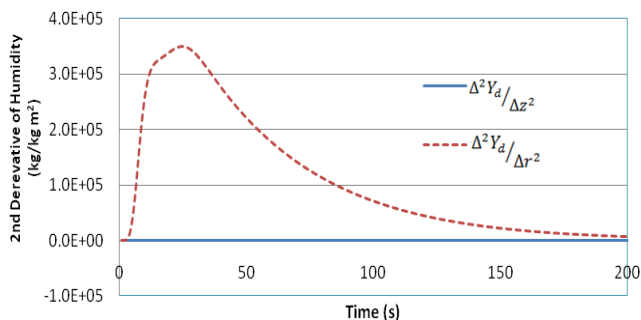
شکل (۵) تغییرات رطوبت مطلق هوای فرآیند در زمان‌های مختلف در طول کانال ثابت

در شکل ۶ رطوبت مطلق وسط ضخامت بستر جاذب جامد نشان داده شده است. جاذب جامد در تعادل با هوای گرم بوده و رطوبت موجود در آن در لحظه اول در سطح

مدل‌سازی ریاضی دو بعدی غیر پایای یک کانال رطوبت‌زدایی جاذب جامد

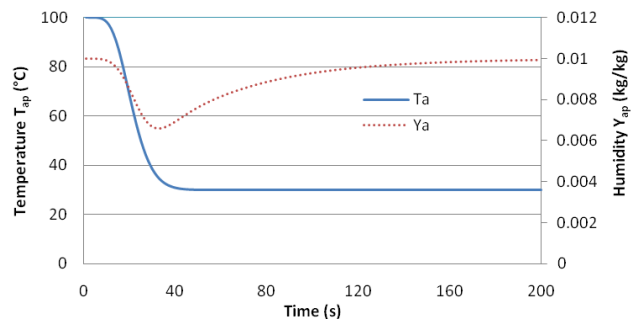
جاذب جامد است. در معادلات (۳) و (۴) ترم‌های انتقال حرارت و جرم در هر دو جهت طول کانال (محور z) و جهت ضخامت جاذب جامد (محور r) دیده می‌شوند. برخی از محققان در مدل‌سازی خود از ترم‌های نفوذ محوری در مقابل نفوذ شعاعی صرف نظر کرده‌اند و دلیلی که به آن اشاره کرده‌اند ناچیز بودن مقادیر نفوذ محوری در مقابل نفوذ شعاعی است [۱۶]. با توجه به کامل بودن مدل‌سازی انجام شده، می‌توان صحت این فرضیه را بررسی نمود.

بر اساس روابط مرجع [۱۱] ضرائب انتقال جرم D_G و D_S ، مستقل از جهت‌های r و z می‌باشند در نتیجه می‌توان در رابطه ۴ این ضرائب را از مشتق بیرون آورد و به عبارت مشتق دوم رسید. براساس تعریف مشتق دوم، این عبارات برای گره‌های داخلی محاسبه گردید. در شکل ۹ نتیجه این محاسبات برای مشتق دوم رطوبت مطلق نسبت به محور و شعاع برای یک گره میانی نسبت به زمان ترسیم شده است.



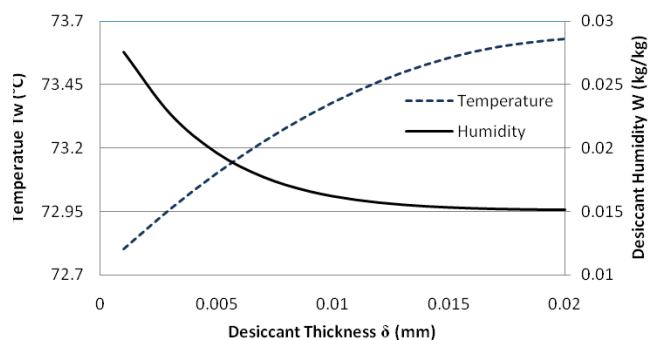
شکل (۹) مقایسه تغییرات مشتق دوم رطوبت نسبت به طول و ضخامت برای گره میانی در زمانهای مختلف

یکی دیگر از مواردی که تاثیر قابل توجهی بر حجم محاسبات دارد، تعداد گره‌هایی است که در جهت شعاعی در نظر گرفته می‌شود. هر یک گره به مفهوم یک لایه محاسباتی است. در این قسمت هدف آن است که اثر تعداد گره‌های شعاعی بر دقت نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد. در جدول ۱، ذکر شد که ضخامت لایه جاذب جامد $\delta=0.2$ mm در نظر گرفته شده است. برای بررسی، چهار حالت در نظر گرفته شده که ضخامت گره $\Delta r=0.1$ mm، $\Delta r=0.05$ mm، $\Delta r=0.02$ mm و $\Delta r=0.01$ mm که به تبع آن تعداد گره‌های ۳، ۶، ۱۱ و ۲۱ می‌باشد (گره ابتدایی و انتهایی نصف ضخامت گره‌های میانی را دارا هستند). برای هر یک از این چهار حالت برنامه اجرا گردید و دما و رطوبت هوای خروجی از کانال به عنوان معیاری جهت مقایسه انتخاب شد. نتایج این مقایسه در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۷) تغییرات دما و رطوبت هوای خروجی از کانال براساس زمان

بررسی توزیع دما و غلظت از دیگر نکات مهمی است که مورد توجه قرار گرفته است. در شکل ۸ تغییرات دما و رطوبت در داخل لایه جاذب جامد را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. باید توجه داشت که در شکل ۸ تغییرات به ازای گرهی در میانه طول کانال ($L/2$) و در زمان ۱۰ s ترسیم شده است. شیب صفر پروفایلهای غلظت و دما در مجاورت دیواره نشان دهنده آدیاباتیک بودن این مرزها برای عبور جرم و حرارت است. همچنین می‌توان دریافت که تفاوت دما بین سطح روی جاذب جامد و آخرین لایه جاذب جامد تنها 0.8 °C است که حدود ۱٪ دمای دیواره داخلی کانال است. این بررسی دلیلی بر ناچیز بودن مقاومت حرارتی لایه جاذب جامد است در حالیکه تغییراتی رطوبت جذب شده بین سطح ابتدایی جاذب جامد و دیواره آدیاباتیک ۸۲٪ مقدار رطوبت در دیواره است. وجود این مقدار قابل توجه توزیع غلظت را می‌توان نشانه‌ای بر مقاومت بالای جاذب جامد در انتقال جرم و یا سرعت پایین انتقال جرم نسبت به حرارت دانست که در بررسی نمودارهای قبلی به آن اشاره شد.



شکل (۸) تغییرات دما و رطوبت هوای خروجی از کانال براساس زمان

یکی از فرضیات مهمی که نقش قابل توجهی در حجم محاسبات دارد، فرضیه دو بعدی بودن انتقال جرم و حرارت در

ضخامت صرف نظر کرد. همچنین اثر تعداد گره در جهت ضخامت جاذب جامد بررسی شد که نشان می‌دهد می‌توان بدون تغییر محسوسی در نتایج، تعداد گره‌ها را کاهش داد. به کمک نتایج حاصل می‌توان مدل ساده‌تر و دقیقی از کانال دیسکنتی داشت که برای ارزیابی عملکرد چرخ جاذب جامد استفاده شود.

جدول (۲) بررسی اثر تعداد گره در جهت ضخامت جاذب جامد بر دقت نتایج

گره ۳	گره ۶	گره ۱۱	گره ۲۱
$T_{ap,out}$ (°C)	۵۹/۴۴	۵۹/۴۸	۵۹/۳۹
$Y_{ap,out}$ (gr/kg)	۹/۰۶۵	۹/۰۶۴	۹/۰۶۰

بررسی نتایج جدول فوق نشان می‌دهد تعداد گره‌ها تاثیر چندانی در دقت محاسبات ندارد بطوریکه تفاوت بین بیشترین و کمترین گره مورد مطالعه (۲۱ و ۳ گره) کمتر از ۰/۱٪ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد تعداد گره‌ها در دقت کلی اثر ناچیز دارد و می‌توان برای تسریع در انجام محاسبات از گره‌های کمتری استفاده کرد.

در این تحقیق مدل‌سازی دوبعدی غیر پایای یک کانال جاذب جامد صورت گرفت و اثر برخی فرضیات برای کاهش حجم محاسبات بررسی شد. براساس نتایج حاصل می‌توان با صرف نظر کردن از برخی ترم‌ها همچنان مدلی دقیق داشت و به کمک آن عملکرد چرخ جاذب جامد را مورد ارزیابی قرار داد که نتایج آن در مقاله آتی ارایه خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت و توسعه سامانه‌های سرمایش جاذب جامد در این تحقیق مدل‌سازی ریاضی یک کانال جاذب جامد به عنوان جزء پایه چرخ جاذب جامد مورد بررسی قرار گرفت. چرخ جاذب جامد از کانال‌های یکسان جاذب جامد تشکیل شده به همین دلیل هدف این تحقیق دستیابی به یک مدل جامع و دقیق در خصوص کانالهای جاذب جامد بوده است.

حجم کنترل کانال جاذب جامد مشخص و بر مبنای یک سری فرضیات اولیه، معادلات حاکم بر سامانه حاصل شد. علاوه بر معادلات حاکم از شرایط اولیه مرزی و معادلات کمکی مناسب برای تکمیل مدل‌سازی استفاده شد.

معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم به روش المان محدود و به طور صحیح حل شد و دقت مدل به کمک داده‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از تایید مدل توسط داده‌های آزمایشگاهی، پروفایل‌های مختلف دما و رطوبت در هوا و جاذب جامد حاصل شدند که می‌تواند برای طراحی بهینه کانال جاذب جامد استفاده شود. علاوه بر آن مقایسه‌ای بین توزیعهای نفوذ در جهت محور کانال و در جهت ضخامت در لایه جاذب جامد برای دما و رطوبت صورت گرفت که نشان می‌دهد می‌توان از توزیع نفوذ در جهت محور در مقایسه با

علائم اختصاری و نمادها

a	(m)	ارتفاع کانال
b	(m)	عرض کانال
c_p	(J/kg K)	ظرفیت حرارتی ویژه
c_{pt}	(J/kg K)	ظرفیت حرارتی کلی جاذب جامد
d_e	(m)	قطر هیدرولیکی
D_G	(m ² /s)	ضریب نفوذ کلی
D_K	(m ² /s)	ضریب نفوذ ناسن
D_O	(m ² /s)	ضریب نفوذ معمولی
D_S	(m ² /s)	ضریب نفوذ سطحی
h_c	(W/m ² K)	ضریب انتقال حرارت جابجایی
h_{fg}	(J/kg)	گرمای نهان تبخیر آب
K_y	(kg/m ² s)	ضریب انتقال جرم جابجایی
k	(W/m K)	ضریب هدایت حرارتی
L	(m)	طول کانال
\dot{m}	(kg/s)	دبی جرمی هوا
\dot{m}'	(kg/m s)	دبی جرمی بر واحد سطح
M	(kg / kmole)	وزن مولکولی
p	(Pa)	فشار
q_{st}	(J/kg)	گرمای جذب
r	(m)	محور مختصاتی / شعاع حفره
R	(J/kg K)	ثابت گازها
Re		عدد رینولدز
T	(K)	دما
t	(s)	زمان
u	(m/s)	سرعت هوا
W	(kg/kg)	رطوبت مطلق جاذب جامد
Y_a	(kg/kg)	رطوبت مطلق هوا
Y_d	(kg/kg)	رطوبت مطلق تعادلی
z		محور مختصاتی
ϕ	%	رطوبت نسبی
ϕ_d	%	رطوبت نسبی تعادلی
Φ	(m)	قطر چرخ
δ	(m)	ضخامت لایه جاذب جامد
ζ	-	ضریب انحنای
ε_t	-	ضریب تخلخل کلی
ρ	(kg/m ³)	چگالی

زیر نویس‌ها

هوای a

هوای در تعادل با جاذب جامد ad

آب جذب شده ad_s

جاذب جامد d

هوای خشک g

هوای ورودی in

هوای خروجی out

فرآیند p

احیا r

سطح جاذب جامد s

بخار آب v

بخار آب اشباع vs

مراجع

- [7] M. H. Ahmed, N. M. Kattab, and M. Fouad (2005) "Evaluation and optimization of solar desiccant wheel performance", *Renewable energy*, 30(3), 305–325.
- [8] C. R. Ruivo, J. J. Costa, and A. R. Figueiredo (2007) "On the behaviour of hygroscopic wheels: Part I-channel modelling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23), 4812–4822.
- [9] C. R. Ruivo, J. J. Costa, and A. R. Figueiredo (2007) "On the behaviour of hygroscopic wheels: Part II – rotor performance", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23–24), 4823–4832.
- [10] T. S. Ge, Y. Li, R. Z. Wang, and Y. J. Dai (2008) "A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1485–1528.
- [11] A. Kodama, T. Hirayama, M. Goto, T. Hirose, and R. E. Critoph (2001) "The use of psychrometric charts for the optimisation of a thermal swing desiccant wheel", *Applied thermal engineering*, 21(16), 1657–1674.
- [12] Y. J. Dai, R. Z. Wang, and H. F. Zhang (2001) "Parameter analysis to improve rotary desiccant dehumidification using a mathematical model," *International journal of thermal sciences*, 40(4), 400–408.
- [13] J. D. Chung, D. Y. Lee, and S. M. Yoon (2009) "Optimization of desiccant wheel speed and area ratio of regeneration to dehumidification as a function of regeneration temperature", *Solar Energy*, 83(5), 625–635.
- [14] M. Ali Mandegari, and H. Pahlavanzadeh (2009) "Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels", *Energy*, 34(6), 797–803.
- [15] M. Ali Mandegari, and H. Pahlavanzadeh (2010) "Performance assessment of hybrid desiccant cooling system at various climates", *Energy Efficiency*, 3(3) 177–187.
- [16] L. A. Sphaier and W. M. Worek (2006) "The effect of axial diffusion in desiccant and enthalpy wheels", *International journal of heat and mass transfer*, 49(7) 1412–1419.
- [1] K. Daou, R. Z. Wang, and Z. Z. Xia (2006) "Desiccant cooling air conditioning: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(2) 55–77.
- [۲] زمزمیان، امیر حسین (۱۳۸۵) "مدلسازی ریاضی و بررسی تجربی - عددی چرخ دوار دسیکانت سرمایش جذبی در شرایط پایدار"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۳] علی مندگاری، محسن (۱۳۸۵) "تعیین ضریب عملکرد (COP) سامانه سرمایش جاذب جامد برای شرایط آب و هوایی مختلف"، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [4] W. Zheng, and W. M. Worek (1993) "Numerical simulation of combined heat and mass transfer processes in a rotary dehumidifier", *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 23(2), 211–232.
- [5] L. Z. Zhang, and J. L. Niu (2002) "Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery", *Applied Thermal Engineering*, 22(12), 1347–1367.
- [۶] مظفری، حسین (۱۳۷۹) "رطوبت زدایی هوای مرطوب با استفاده از محیطهای متخلخل"، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

Numerical Modeling of two dimensional unsteady state desiccant dehumidification channel

Mohsen Ali Mandegari¹, Hassan Pahlavanzadeh^{2,*}

¹ Chemical Engineering Department, Science and Technology University of Mazandaran, Behshahr, Iran

² Chemical Engineering Department, Tarbiat Modares University, P. O. Box 14155-143 Tehran, Iran. Tel: 021-82883312, E-mail: Pahlavzh@modares.ac.ir

ABSTRACT

In this paper a two-dimensional unsteady state detailed mathematical formulation is developed for the numerical modeling of the behavior of a channel of a hygroscopic compact matrix. Considering proper control volume and some assumptions, governing equation is derived. Initial and boundary equation as well as auxiliary equation are used to close governing equations. Modeling results are validated by experimental data and numeric heat and mass balances. The profiles of temperature and humidity in the desiccant layer and air flow rate are resulted and can be used for optimum design of desiccant channel. Furthermore, effect of axial heat and mass diffusion inside the desiccant are examined as well as number of nodes in the desiccant layer. Results prove that axial heat and mass diffusion can be omitted and number of nodes can be reduced without significant effect in the result precision.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 1, 2012

Revised: Sept. 16, 2013

Accepted: Nov. 4, 2013

Key words:

Dehumidification

Desiccant bed

Two dimensional modeling

* Corresponding author