

## شبیه سازی سیستم های جاذب جامد با چرخ رطوبت زدایی دوار برای خشک کردن

امیر حسین زمزمیان\*

پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۴/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۸/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۱۲/۲۶

**چکیده** در این مقاله یک بررسی تحلیلی برای ارزیابی عملکرد یک سیستم رطوبت زدایی دوار با جاذب جامد (خشک کن) با مدل سازی ریاضی چرخ دسیکنت جامد و با موازنه جرم و انرژی و مومنتوم برای هوا و رطوبت موجود در ماده دسیکنت برای جریان هوای فرآیندی و بازیابی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که شدت رطوبت زدایی در طول چرخ دسیکنت به نسبت رطوبت، سرعت جریان هوا، انتقال جرم و حرارت از جریان هوا به بستر وابسته است. مقایسه نسبت رطوبت، درجه حرارت خروجی و سرعت جریان هوای خروجی از بخش جذب چرخ دوار دسیکنت نشان داد که سرعت جریان هوای خروجی از چرخ نسبت به ورودی به دلیل تغییرات رطوبت، درجه حرارت و افت فشار افزایش پیدا می کند. مدل ریاضی به کار رفته در این مطالعه همچنین قادر است جزئیات شکل ظاهری رطوبت و درجه حرارت در هر دو جریان هوای بخش جذب و بازیابی را در داخل کانال های چرخ دسیکنت به صورت منحنی های تناوبی نشان دهد. لازم به ذکر است که برای تامین جریان هوای داغ بخش جذب یا بازیابی و نیز با هدف صرفه جویی بیشتر می توان از کلکتورهای خورشیدی در سیستم استفاده نمود.

**کلمات کلیدی** چرخ رطوبت زدایی، جاذب دسیکنت، سیستم جذبی جامد، انتقال جرم و حرارت.

## Simulation of a solid adsorption system with rotary desiccant wheel for dehumidification

A. H. Zamzamian\*

Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

**Abstract** In this paper an analytical investigation for performance analyses of a dehumidification wheel system with solid desiccant by the mathematical simulation of solid desiccant wheel and with the conservation of mass, energy and momentum for the air flow and moisture content of desiccant bed in process air and regeneration air flow have been presented. Solid desiccant wheel have long been used in dehumidification and cooling systems. In this study a mathematical model has been derived to show the dehumidification trend of desiccant wheel. Four equations concerning water content balance and energy conservation and one momentum equation are used to describe the complicated heat and mass transfer and momentum occurring in moisture adsorption and regeneration. In this model, variation of several parameters such as air humidity ratio, air temperature, water content of desiccant bed and temperature of desiccant according to the length of bed and time were investigated. The mathematical model was confirmed by doing experimental tests on a solid desiccant wheel filled with silica gel. The results indicated that dehumidification rate during the length of desiccant wheel depended mostly on input humidity ratio, air stream velocity, heat and mass transfer from air stream to bed. The results also described that air stream velocity was one of the most effective parameters on dehumidification rate of wheel.

**Keywords** Dehumidification wheel, adsorption Desiccant, solid adsorption system, Heat and mass transfer.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: پژوهشگاه انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج.

تلفن: ۰۲۶۱-۶۲۰۴۱۳۱، دورنگار: ۰۲۶۱-۶۲۰۱۸۱۸، پیام نگار: Azamzamian@hotmail.com

## ۱- مقدمه

بسیاری از چرخ‌های دوار و محاسبه میزان انتقال جرم و حرارت در آنها توسط ژنگ و ورک [۴،۵،۶،۷،۸]، سان [۹،۱۰]، کوناراد و ایگن برگر [۱۱] ارائه شده است. در کار سان تأثیر هدایت حرارتی دیواره دسیکنت مورد بررسی قرار گرفته و در مدل ژنگ و همکارانش یک سرعت گردش بهینه برای چرخ تعیین شده است. اندازه‌گیری‌های تجربی روی مبدل‌های دوار سیلیکا ژل توسط کوداما و همکارانش [۱۲،۱۳،۱۴] در سال ۱۹۹۳ ارائه شده همراه با توزیع درجه حرارت در داخل چرخ و یک عبارت تجربی برای سرعت چرخش بهینه است. کوداما و همکارانش [۱۴] همچنین یک روش برای ارزیابی مبدل‌های دوار سیلیکا ژل توسط سایکرومتریک چارت ارائه کرده‌اند. برای توصیف عملکرد چرخ دسیکنت دوار یک مدل یک بعدی توسط پهلوانزاده و مظفری [۱۵] ارائه شده است که در آن سرعت گردش بهینه برای رسیدن به حداکثر عملکرد چرخ بدست آمده است. یک مدل ریاضی نیز برای بیان نحوه توزیع درجه حرارت و رطوبت در طول بستر جاذب سیلیکا ژل با در نظر گرفتن ضریب تصحیح آکرمین توسط پهلوانزاده و زمزمیان ارائه شده است؛ همچنین در مطالعه فوق با لحاظ پارامترهای مذکور اثر ضریب تصحیح انتقال حرارت آکرمین، درجه حرارت و نسبت رطوبت جریان هوا در یک چرخ دوار دسیکنت مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۶] در تمامی مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده از اثر تغییرات سرعت، دانسیته جریان هوا و همچنین اثرات توأم انتقال جرم و حرارت بر روی یکدیگر در هر دو بخش جذب و احیاء صرف‌نظر شده است. لذا در مطالعه دیگر آنالیز پارامترهای مؤثر بر عملکرد چرخ رطوبت زدایی دوار توسط پهلوانزاده و همکاران انجام شده و در آن نتایج نشان داده است که شدت رطوبت زدایی در طول چرخ دسیکنت به نسبت رطوبت، سرعت جریان هوا، انتقال جرم و حرارت از جریان هوا به بستر و ضریب تصحیح آکرمین وابسته است و لذا برای در نظر گرفتن تغییرات سرعت

رطوبت‌زدایی در یک چرخ جاذب دسیکنت<sup>۱</sup> جامد به روش گردش دو جریان هوای متفاوت با رطوبت‌های نسبی بالا و پایین (جریان ورودی با رطوبت نسبی بالا و جریان بازیافت یا رطوبت نسبی پایین) از روی ماده جاذب انجام می‌گیرد. ماده دسیکنت اصطلاحی است که عموماً برای مواد جاذب به‌کار می‌رود. تقریباً تمام مواد به نوعی دسیکنت هستند، به این معنا که بخار آب را جذب کرده و نگه می‌دارند. عمل جذب همواره حرارت محسوسی برابر با حرارت نهان بخار آب جذب شده توسط دسیکنت، به‌علاوه حرارت افزوده‌ای از جذب که بین ۵ تا ۲۵٪ از گرمای نهان بخار آب است را تولید می‌کند، این حرارت به ماده دسیکنت و هوای محیط انتقال می‌یابد. دسیکنت‌ها در خشک کردن هوا برای کاهش دمای نقطه شبنم نیز استفاده می‌شوند. در این حالت می‌توان رطوبت را بدون گرمایش از دسیکنت گرفت [۱]. فرآیند بازیافت با به کارگیری اختلاف فشار بخار بین فشار نهایی هوا و فشار جریان هوای محیط انجام می‌گیرد. همچنین دسیکنت‌ها برای خشک کردن هوای گردشی در سیستم‌های تهویه و سرمایش استفاده می‌شوند. بیشتر دسیکنت‌های رطوبت زدا از بسترهای فشرده‌ای از سیلیکا ژل و یا سایر ذرات دیگر تشکیل شده‌اند. در اواخر دهه ۸۰ تحقیقات برای استفاده و توسعه مواد چرخ‌هایی با شکل هندسی مناسب برای جریان آرام متمرکز شد تا حداقل افت فشار حاصل گردد. بهارتان [۲] و همکاران او سیلیکا ژل‌هایی با پوشش چرخ‌های موازی را ساختند و در اوائل سال ۱۹۹۰ جاگادیش، شارما و شاستری [۳] مطالعات علمی و تحقیقاتی بر روی عملکرد جاذب‌های سطحی برای سیستم‌های سرمایش دسیکنت انجام دادند و نتیجه گرفتند که عملکرد یک سیستم سرمایش دسیکنت به خواص دسیکنت و شکل فضایی سیستم بستگی دارد. اخیراً مدل‌سازی‌های عددی

مصرفی برای رطوبت‌زدایی را بازیافت کند. این چرخ جذب هزینه‌های عملیاتی را کم می‌کند و نیز هزینه‌های تجهیزاتی را کاهش می‌دهند چون ادوات جمع و جورتر و مؤثرتری را می‌توان نصب کرد. بنابراین چرخ دسیکنت به طور وسیعی در صنایع حرارتی، پاک یا تمیز نمودن هوا، تهویه مطبوع خصوصاً در رطوبت‌زدایی هوا و بازیافت انرژی به‌کار می‌رود. به هر حال طراحی و بهینه‌سازی این گونه از سیستمها به دانش اندکی از انتقال جرم، انرژی و مومنت بین جریان هوا و ماده جذب در هر دو بخش جذب و احیاء نیاز دارد [۱۸].

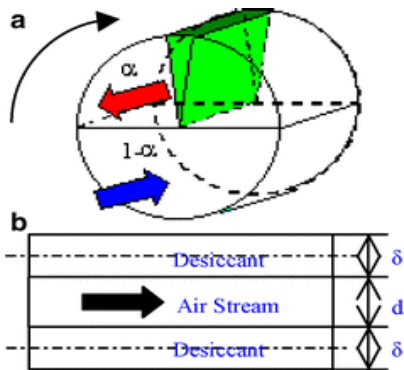
## ۲- مدل‌سازی ریاضی

یک چرخ دسیکنت دارای ماده جذب جامد که حول یک محور استونه‌ای گردش می‌کند و به طول  $L_w$  و قطر  $D_w$  می‌باشد را در نظر گرفته با موازنه رطوبت و حرارت برای جریان هوا و ماده دسیکنت، مدل‌سازی ریاضی سیستم انجام خواهد شد و به این ترتیب چرخ به دو بخش مجزا تقسیم خواهد شد: یک بخش جذب (با جزء زاویه  $\theta$ ) و یک بخش احیاء (با جزء زاویه  $1 - \theta$ ). چرخ دوار با سرعت  $\omega$  گردش می‌کند و در معرض دو جریان هوا قرار گرفته که به طور فیزیکی از هم مجزاست. دو جریان هوا در خلاف جهت یکدیگر از میان بخش‌های جذب و احیاء عبور می‌کنند. یک طرح شماتیک از چرخ دسیکنت در شکل ۱- الف قسمت a نشان داده شده است. هر بخش از یک شبکه‌ای با تعدادی از کانال‌های ساده، موازی با محور گردش و با نسبت سطح جریان کوچک تشکیل شده است. هریک از ساختارهای اصلی شامل مسیرهایی برای عبور جریان و ماده جذب هستند به صورتی که در شکل ۱- الف قسمت b نشان داده شده است. ماده جذب چسبیده به سطح شامل مخلوطی است از ذرات سیلیکا ژل تجاری به همراه ذراتی از یک ماده بی اثر سازگار

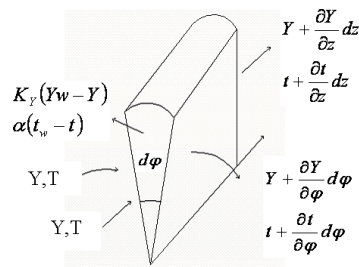
از یک معادله مومنت برای جریان هوای فرآیندی در کنار سایر معادلات استفاده شده است. مقایسه نسبت رطوبت، درجه حرارت خروجی و سرعت جریان هوای خروجی از بخش جذب چرخ دوار دسیکنت نشان داده که سرعت جریان هوای خروجی از چرخ نسبت به ورودی به دلیل تغییرات رطوبت، درجه حرارت و افت فشار افزایش پیدا می‌کند. [۱۷].

در طراحی‌های اولیه چرخ‌ها از بسته‌هایی حاوی دانه‌های متخلخل دسیکنت استفاده می‌شد. در اکثر طراحی‌های اخیر ذرات دسیکنت کوچکتری را بر روی سطوح فلزی یا پلاستیکی (چرخ دسیکنت) چسبانده و یا در داخل بافت پارچه‌ای مخصوصی می‌بافند. در شکل ۱ هر دو ساختار به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند. قطر ذرات دسیکنت معمولاً در محدوده بین ۲ تا ۵۰ میکرون می‌باشد [۱۷].

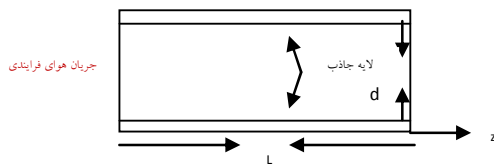
در واحدهای معمول یا مرسوم تهویه مطبوع، هوای خنک و رطوبت‌زدایی شده به طور همزمان از طریق انتقال حرارت بین هوای موجود و سطح خنک تبخیر کننده حاصل می‌شود. به هر حال کنترل فرآیند میزان رطوبت‌زدایی تحت این وضعیت و تأمین شرایط آسایش ضعیف خواهد بود. خوشبختانه تکنولوژی رطوبت‌زدایی براساس جاذب‌های دسیکنت یک روش مؤثری را برای افزایش کنترل رطوبت‌زدایی و تأمین شرایط آسایش محیط از طریق حرارت اتلافی مصرف شده و یا حرارت حاصل از انرژی خورشیدی در تابستان پیشنهاد می‌دهد. در یک سیستم تهویه مطبوع سیکل باز با یک چرخ دسیکنت و یک نوع جاذب حد متوسط برای جدا کردن رطوبت از جریان هوای مرطوب و خنک کردن هوای خشک توسط سرمایش تبخیری غیرمستقیم به‌کار می‌رود. تحت این شرایط بارهای حرارتی محسوس و پنهان کاهش می‌یابد و به عنوان نتیجه کلی یک شرایط آسایش از هوای موجود تأمین و راندمان سیستم نیز بهبود می‌یابد. یک چرخ جذب دسیکنت که به خوبی طراحی شده می‌تواند ۸۰-۶۰ درصد انرژی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. (الف) طرح شماتیک چرخ دوار دسیکنت، (ب) تصویر کلی المان، ورود و خروج جریان‌ها، زاویه دوران و جهت محورها، (ج) تصویر کانال‌های عبور جریان در داخل المان.

صحت مدل حاضر با نتایج حاصل از شرایط معادل آزمایشگاهی و تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. [۱۷،۱۶] فرضیات ذیل به منظور حل مدل و برای ساده سازی تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است:

(۱) متغیرها، یعنی درجه حرارت و رطوبت به صورت تابعی از زمان و مکان در نظر گرفته می‌شود

با جاذب که ظرفیت حرارتی بالایی دارند. برای راحتی این تجزیه و تحلیل سیستم به صورت یک غشاء حد واسط همگن در نظر گرفته شده که فازهای گاز و مایع و ماده جاذب در کنار یکدیگر وجود دارند. پدیده‌های انتقال در داخل یک چرخ دسیکنت معمولاً با لحاظ کردن ساختار یک کانال تکی ساده سازی می‌شود و از انتقال حرارت شعاعی و زاویه‌ای بین کانال‌های مجاور صرف‌نظر می‌گردد.

شکل هندسی المان قطاعی از یک استوانه چرخ دسیکنت است که کانال‌های استوانه‌ای در داخل آن در نظر گرفته شده است قطر معادل ( $D_e$ ) برابر قطر مقطع دایره‌ای استوانه بوده و نسبت سطح به حجم ( $\frac{f_v}{f_s}$ ) و یا به طور ساده  $f_v$  معادل چهار برابر عکس قطر معادل مقطع کانال خواهد

$$\text{بود: } f_v = \frac{f_v}{f_s} = \frac{A}{V} = \frac{\pi d_e L}{\pi (d_e^2/4) L} = \frac{4}{d_e}$$

شکل ۱- الف طرح شماتیک چرخ دسیکنت و شکل ۱-ب وضعیت کلی المان و شکل ۱-ج تصویر کانال‌های عبور جریان در داخل المان و موقعیت کانال‌ها را نشان می‌دهد.

در واقع سطح مقطع یک کانال ساده نسبتاً کوچک است و ماده جاذب خیلی نازک است. اعداد بایوت یعنی  $Bi$  و  $Bi_m$  برای کانال عبور جریان هوا و ماده جاذب هر دو کمتر یا نزدیک به مقدار ۰/۱ است. بنابراین گرادیان درجه حرارت و جرم (رطوبت) در سرتاسر سطح مقطع ماده دسیکنت و کانال جریان هوا کوچک هستند.

نتایج حل عددی که توسط اسفایر و وُرک [۲۰] نیز توسط یک مدل دو بعدی پیشگویی شده است، مدل حاضر را تأیید می‌کند. برای اجتناب از شرایط پیچیده محاسباتی از اثرات انتقال جرم و حرارت از سرتاسر داخل ضخامت ماده جاذب دسیکنت و کانال جریان هوا صرف‌نظر شده است. همچنین

مجرا به صورت روابط ریاضی ۲ و ۳ ارائه شده است.

$$\frac{\partial(\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial t} + \omega \frac{\partial(\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial \theta} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$+ u_g \frac{\partial(\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial z} = \Phi_T + \Phi_{TM}$$

$$\frac{\partial(\rho_g Y_g)}{\partial t} + \omega \frac{\partial(\rho_g Y_g)}{\partial \theta} +$$

$$u_g \frac{\partial(\rho_g Y_g)}{\partial z} = \Phi_M \quad \text{رابطه (۳)}$$

با توجه به روابط ۲ و ۳ واضح است که دانسیته جریان هوا ( $\rho_g$ ) از بخش جذب به احیاء تغییر می‌کند. در روابط فوق  $\Phi_T$ ،  $\Phi_{TM}$  و  $\Phi_M$  ترم‌های اصلی هستند که توسط انتقال حرارت و جرم بین جریان هوای مرطوب و جاذب روی سطح ایجاد می‌شوند و با روابط ۴، ۵ و ۶ تعریف می‌گردد.

$$\Phi_T = \frac{h_t}{f_v / f_s} (T_f - T_g) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\Phi_{TM} = \frac{\rho_f h_m}{f_v / f_s} C_{pg} T_g (Y_f - Y_f^*(T_g, Y_g)) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\Phi_M = \frac{\rho_f h_m}{f_v / f_s} (Y_f - Y_f^*(T_g, Y_g)) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه ۵ بالانویس \* نشان دهنده نسبت رطوبت تعادلی هوا در شرایط درجه حرارت و نسبت رطوبت جریان هوا در آن موقعیت می‌باشد که از روابط ایزوترم تعادلی ماده جاذب دسیکنت مربوطه حاصل می‌شود. نسبت  $f_v / f_s$  یا  $f_v$

$$\theta = \text{mod} \left( \theta_0 + \frac{2\pi\omega}{3600}, 2\pi \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

ویژگی‌های اصلی شکل عبور جریان در کانال‌ها را نشان می‌دهد. ضرائب انتقال حرارت جابجائی در داخل ماده جاذب و برای جریان هوا به ترتیب  $h_t$  و  $h_m$  توسط عدد بدون بعد

(۲) جریان هوا در داخل هر کانال در فشار و سرعت ثابت فرض شده است.

(۳) هیچ انتقال جرم و حرارتی بین کانال‌های جریان نزدیک یکدیگر وجود ندارد.

(۴) ماده جاذب از مواد همگن با تخلخل ثابت تهیه شده است.

(۵) انتقال جرم و حرارت ناشی از هدایت و نفوذ در داخل جاذب در جهت شاعی صرفنظر می‌شود.

(۶) انتقال حرارت بین چرخ و اتمسفر صرفنظر شده است.

(۷) از تأثیر شتاب جاذبه بر روی مخلوط سیال صرفنظر شده است.

(۸) هیچگونه واکنش شیمیایی داخل چرخ رخ نمی‌دهد.

## ۱-۲. معادلات حاکم بر سیستم

براساس فرضیات فوق موازنه‌های جرم و حرارت (انرژی) برای هر المان ساده یا کانال تک ارائه شده است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد چرخ دسیکنت یک چرخ غشاء استوانه‌ای دوار است. هر کانال ساده در چرخ دسیکنت به طور تناوبی بین فرآیندهای جذب و احیاء تغییر می‌کند. مکان گذرای زاویه‌ای برای هر المان در داخل چرخ تابعی است از: زمان، سرعت گردش چرخ و موقعیت اولیه المان به صورت رابطه ۱ ارائه شده است که در آن  $\text{mod}$  یعنی مدول‌ها و به مفهوم عملگر ریاضی باقیمانده تقسیم است.

اگر هر المان یا کانال ساده در داخل بخش جذب قرا رگرفته باشد  $\theta$  کمتر از  $2\pi\alpha$  و اگر بیش از  $2\pi\alpha$  باشد آن المان در داخل بخش احیاء قرار گرفته است. معادلات بقاء جرم و حرارت برای یک جریان هوای مرطوب ناپایدار داخل یک

$$\Psi_T = \frac{h_t}{\delta/2}(T_g - T_f) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\Psi_{TM} = \frac{\rho_f q h_{tm}}{\delta/2}(Y_f'(T_g, Y_g) - Y_f) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\Psi_M = \frac{\rho_f h_{tm}}{\delta/2}(Y_f'(T_g, Y_g) - Y_f) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

خواص حرارتی و روابط ترمودینامیکی به صورت معادلات کمکی ارائه شده است.

## ۲-۲. خواص حرارتی و ایزوترم‌های تعادلی ماده جاذب

دانسیته، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط در جریان فرآیندهای جذب و احیاء توسط روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ارائه می‌شوند.

$$\mu_g = (1 + Y_g)\mu_a \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$k_g = (\rho_a k_a + Y_g \rho_a k_v) / \rho_g \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$c_{pg} = (\rho_a c_{pa} + Y_g \rho_a c_{pv}) / \rho_g \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

خواص ماده جاذب را به صورت تابعی از تخلخل دسیکنت با روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹ می‌توان بیان نمود.

$$\mu_f = (1 - \varepsilon_f)\mu_d + \varepsilon_f \mu_g \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$k_f = ((1 - \varepsilon_f)\rho_d k_d + \varepsilon_f \rho_g k_g) / \rho_f \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$c_{pf} = ((1 - \varepsilon_f)\rho_d c_{pd} + \varepsilon_f \rho_g c_{pg}) / \rho_f \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

ناسلت  $Nu_D$  تعیین می‌شوند. برای مخلوط آب و هوا مقدار عدد لوئیس برابر ۰/۸۹۴ است. جریان هوایی که به داخل شبکه کانال‌ها یا ماتریس چرخ وارد می‌شود با توجه با سرعت پائین هوای فرآیندی به صورت جریان آرام می‌باشد اما در داخل هر کانال به دلیل افزایش دبی ناشی از دانسیته و قطر میکرونی کانال‌های کوچک چرخ دسیکنت ممکن است یک جریان درهم با  $Re_D > 2300$  در نظر گرفته می‌شود. لذا از یک عبارت برای محاسبه عدد ناسلت موضعی برای جریان درهم داخل کانال‌ها و از معادله دیتوس و بولتر<sup>۱</sup> می‌توان استفاده کرد. این معادله از روابط اینکروپرا<sup>۲</sup> و دویت<sup>۳</sup> بدست آمده است.

[۲۲،۲۱]

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr_n \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن  $n = 0.4$  برای بخش جذب ( $T_f > T_g$ ) و  $n = 0.3$  برای جریان هوای احیا ( $T_f < T_g$ ) می‌باشد. برخلاف کانال‌های هوا، برای انتقال جرم و حرارت در ماده دسیکنت، هم هدایت حرارتی و هم نفوذ حاکم است. بنابراین معادلات بقاء انرژی و جرم برای ماده جاذب دسیکنت به صورت روابط ۸ و ۹ ارائه شده است.

$$\frac{\partial(\rho_f C_{pf} T_f)}{\partial t} + \omega \frac{\partial(\rho_f C_{pf} T_f)}{\partial \theta} = \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + \Psi_T + \Psi_{TM}$$

$$\frac{\partial(\rho_f Y_f)}{\partial t} + \omega \frac{\partial(\rho_f Y_f)}{\partial \theta} = \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + \Psi_T + \Psi_{TM}$$

که در روابط فوق  $\Psi_T$ ،  $\Psi_{TM}$  و  $\Psi_M$  ترم‌های اصلی حاصل از انتقال حرارت و جرم بین جریان هوا و دسیکنت است. این ترم‌ها به صورت روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ارائه می‌گردد.

در خلاف جهت یکدیگر یکی در بخش جذب و یکی در بخش احیاء در آن دمیده می‌شود. هر المان اصلی در چرخ دسیکنت به طور تناوبی بین فرآیندهای جذب و دفع تغییر می‌کند. مکان زاویه‌ای زودگذر (Transient) هر المان اصلی به صورت معادله ۱ ارائه می‌شود. بنابراین شرایط مرزی برای جریان‌های هوا به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{If } 0 \leq \theta < 2\pi\alpha \text{ then } T_{g,z=0} &= T_{air}, Y_{g,z=0} = Y_{air} \\ \text{If } 2\pi\alpha \leq \theta < 2\pi \text{ then } T_{g,z=L} &= T_{air}, Y_{g,z=L} = Y_{air} \end{aligned}$$

برای شرایط مرزی با ماده دسیکنت مالیده شده روی سطح فرض می‌شود که سطح ماده دسیکنت با یک لایه از ماده ایزوله شده پوشیده شده است لذا:

$$\frac{\partial T_z}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{\partial T_z}{\partial z} \Big|_{z=L} = -\frac{\partial Y_f}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{\partial Y_f}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

به علاوه مقادیر کلی درجه حرارت و آب محتوی برای هوای موجودی (منبع یا اصلی) پس از خروج از هر بخش در چرخ دسیکنت با استفاده از روابط زیر معین می‌شوند:

$$T_{air,exit} = \frac{1}{2\pi\alpha} \int_0^{2\pi\alpha} T_g(\theta, L) d\theta \text{ and } Y_{air,exit} = \frac{1}{2\pi\alpha} \int_0^{2\pi\alpha} Y_g(\theta, L) d\theta \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\text{If } 2\pi\alpha \leq \theta < 2\pi \text{ then } \\ T_{g,exit} = \frac{1}{2\pi(1-\alpha)} \int_{2\pi\alpha}^{2\pi} T_g(\theta, 0) d\theta \text{ and } Y_{g,exit} = \frac{1}{2\pi(1-\alpha)} \int_{2\pi\alpha}^{2\pi} Y_g(\theta, 0) d\theta \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

این شرایط مرزی براساس سطحی است در چرخ دسیکنت که نشأت نمی‌کند. در فرآیند کلی از تأثیر پروفیل رطوبت و دانسیته در طول چرخ صرف‌نظر شده است. این ساده سازی‌ها برای اجتناب از پیچیدگی سیستم لحاظ شده و نتایج به طور معقولی صحیح است.

حل مدل ریاضی به روش عددی حل مدل با کد نویسی با استفاده از روش‌های CFD و زبان برنامه‌نویسی فورترن صورت گرفته است. معادلات بقاء ۲ و ۳ و ۵ و ۶ به شکل

از آنجا که اکثر انتقال حرارت و جرمی که بین جریان هوا و ماده دسیکنت رخ می‌دهد تنها روی سطح جامد ذرات دسیکنت است لذا از اثرات نفوذ مشترک معمول (نفوذ کلی) و نفوذ نادسن در مقایسه با نفوذ جرمی سطح صرف‌نظر شده است. بنابر این در معادله ۶ فقط نفوذ جرمی روی سطح لحاظ شده است. ضریب نفوذ مولکولی  $D_s$  توسط رابطه زیر ارائه شده است:

$$D_s = \frac{D_0}{\tau} \exp(-0.974\alpha - 3q/T_f) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

حرارت جذب سیلیکا ژل یک نوع سیلیکا ژل با دانسیته معین توسط پسران و میلز به صورت زیر ارائه شده است:

$$q = \begin{cases} 3500 - 13,400Y_f, & Y_f \leq 0.05 \\ 2950 - 1,000Y_f, & Y_f > 0.05 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

معادله حاکم بر سیستم جذب دینامیکی در طول ایزوترم تعادلی ماده جاذب دسیکنت باید حل گردد که توسط Majumdar به صورت زیر ساده سازی شده است.

$$Y_f^* = a_1 + a_2 T^2 + a_3 RH^2 + a_4 RH^3 + a_5 T^4 RH^2 + a_6 T^4 RH^3 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

که در رابطه فوق

$$\begin{aligned} a_2 &= -4.113 \quad a_3 = 1.05 \times 10^{-5} \quad a_4 = 6.586 \times 10^{-7} \\ a_1 &= 0.0329 \times 10^{-6} \\ a_5 &= 7.894 \times 10^{-11} \quad a_6 = 6.747 \times 10^{-13} \end{aligned}$$

رطوبت نسبی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$RH = \frac{264.0727Y_g}{\exp(17.2694/(T - 273.15)) / (T - 34.85))} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

### ۲-۳. شرایط مرزی و پارامترهای اصلی فرآیند

همانطور که قبلاً بیان شد، یک چرخ دسیکنت یک چرخ غشاء حد واسط استوانه‌ای دوار است که در آن دو جریان هوا

مشترک زیر می‌تواند بیان گردد:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} \quad (27) \text{ رابطه}$$

با انتگرال‌گیری از معادله ۲۷ و مدل حجم کنترل کلی

داریم:

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho\phi)_P^n - (\rho\phi)_P^o}{\Delta t} dV \\ & + \frac{(\rho w\phi)_P^n - (\rho w\phi)_P^o}{\Delta \theta} dV \\ & + ((\rho u\phi)_E^n - (\rho u\phi)_W^n) dA \\ & - \left( \left( \Gamma_{\phi} \frac{\phi_P - \phi_P}{z_P - z_P} \right)^n - \left( \Gamma_{\phi} \frac{\phi_P - \phi_P}{z_P - z_P} \right)^o \right) dA + S_{\phi} dV \end{aligned} \quad (28) \text{ رابطه}$$

که در آن  $n$  و  $o$  سطوح زمان جدید و قدیم را نشان می‌دهد،  $p$  حجم کنترل مرکزی،  $w$  حجم کنترل مجاور شرقی و  $w$  حجم کنترل مجاور غربی. در فرمول فوق یک شکل کاملاً منحنی برای رسیدن به حالت پایدار کلیه ترم‌ها در رابطه با گام‌های زمانی بزرگ انتخاب شده است. پس از گردآوری کلیه ضرایب  $\Delta p$ ،  $\Delta E$ ،  $\Delta W$  و  $\Delta S$  فرمول ۲۹ حاصل می‌شود.

$$a_P^{\phi} \phi_P^n - a_P^{\phi} \phi_P^o - a_{WV}^{\phi} \phi_{WV}^n = a_P^{\phi} \phi_P^n + S_{\phi} dV \quad (29) \text{ رابطه}$$

پس از محاسبه رابطه فوق برای کلیه نقاط شبکه در حوزه، یک معادله ماتریس به شکل  $\Phi = B [A]$  حاصل می‌گردد. برای حل معادله ماتریس مذکور یک روش حل سریع اتخاذ می‌گردد: روش خط به خط TDMA در جهت  $z$  شبکه در جهت  $z$  متجددال‌شکل (یکنواخت) در نظر گرفته می‌شود. برنامه متناظر برای حل معادله مذکور در زبان ویژوال فورتنون نوشته و اجرا می‌گردد. به طور مختصر، مراحل حل عددی شامل:

- (۱) لحاظ کردن شرایط اولیه و ورودی برای هر دو بخش جذب و احیاء
- (۲) محاسبه انتقال حرارت و جرم برای جریان

کانال‌ها و ماده جاذب در هر دو بخش

(۳) محاسبه پارامترهای کلی در خروجی هر دو بخش

(۴) مجدداً به حساب آوردن بخش جذب و احیاء و لحاظ مجدد شرایط ورودی

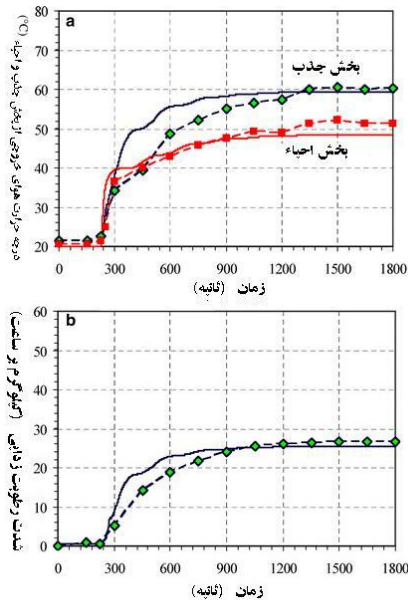
حساسیت تولید شبکه (مش بندی) قبل از اینکه مدل‌سازی عددی به کار رود در صورتی که تعداد مش‌ها روی سطح بخش عرضی از چرخ و در جهت  $z$  به ترتیب بیش از ۲۰۰۰ و ۲۵ انتخاب گردد به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند. لذا نویسنده نتیجه گرفت که نتایج مستقل از تولید مش‌ها (مش بندی در شبکه) است. وقتی که تعداد مش‌ها (دانه بندی یا مش بندی‌ها) در سرتاسر سطح چرخ کمتر از ۱۰۰۰ هستند محاسبات عددی خراب یا غلط می‌شود زیرا هندسه هر کانال هوا واقعاً کوچک است. بنابر این مش‌بندی‌ها در بخش بعدی براساس تعداد ۲۰۰۰ واحد برای سطح مقطع چرخ و تعداد ۲۵ واحد برای مش بندی در جهت  $z$  در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- نتیجه گیری

#### ۳-۱- تأیید اعتبار مدل

برای تأیید مدل مذکور، چندین مقایسه در این بخش بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی و مقادیر پیشگویی شده توسط این مدل ارائه شده است. چرخ مورد استفاده در این مقایسه از نوع چرخ رطوبت زدایی دسیکنت موجود تجاری است. ابعاد چرخ در جدول ۱ ارائه شده است. مساحت سطح مقطع هر کانال اصلی  $0.81 \text{ m}^2$  و تعداد کل این کانال‌ها ۱۴۶۴۲ فرض می‌شود. به علاوه ضخامت بخش جذب  $0.1 \text{ mm}$  است. شرایط اولیه در این حالت عبارتند از: درجه حرارت  $20^\circ \text{C}$  و رطوبت نسبی ۲۵ درصد





شکل ۲. درجه حرارت و شدت جریان جرمی رطوبت زدایی بر حسب زمان.

از اشکال ۲ مدل پیشگویی شده و به شرایط پایدار میل می‌کند که کمی سریعتر از شرایط آزمایش واقعی است. این به آن دلیل است که مدل پیشگویی شده رفتاری تحت شرایط ایده‌آل داشته است، در حالی که شکل ۳ مقایسه‌ای از پارامترهای کلی خروجی حاصل از مدل مورد نظر و اطلاعات یا داده‌های تجربی در شرایط ایده‌آل یعنی مطابق با شرایط و فرضیات در نظر گرفته شده برای حل مدل است که در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا توسط اسلایزاک [۲۳] انجام شده است.

در شکل ۳ محور عمودی سمت چپ درجه حرارت خروجی از بخش جذب بر حسب درجه سانتیگراد (°C) و محور عمودی سمت راست شدت دفع رطوبت یا میزان رطوبت زدایی از هوای فرآیندی با واحد کیلوگرم بر ساعت (kg/hr) می‌باشد و محور افقی درصد رطوبت نسبی هوای ورودی به بخش جذب است.

یا  $\frac{g}{kgDA}$  (۳/۶۹) آب محتوی دسیکنت در شرایط تعادلی برابر شرایط محیط است و توسط رابطه ۱۳ براساس درجه حرارت و رطوبت هوای ورودی تعیین می‌گردد. پارامترهای ورودی شامل درجه حرارت و نسبت رطوبت به صورت تابعی از زمان هستند و به تدریج از شرایط محلی تا نقاط یکدست (set points) افزایش می‌یابد.

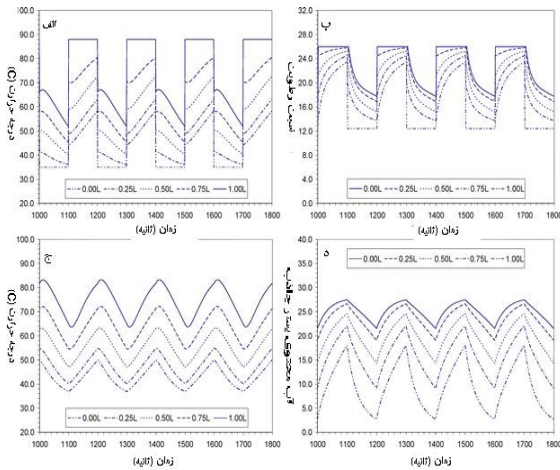
جدول ۱. پارامترهای ویژه چرخ دسیکنت.

مقدار	واحد	ابعاد چرخ
۰/۱۴۶	m	عمق یا طول چرخ
۱/۲۵	m	قطر چرخ
۰/۱۷۸	m <sup>3</sup>	حجم چرخ
۰/۵۹۳	m <sup>2</sup>	مساحت سمت جذب
۰/۵۹۳	m <sup>2</sup>	مساحت سمت احیاء

زمان تاخیر حدود ۴ Min و مطابق با داده‌های آزمایشگاهی است. سرعت گردش چرخ ۱۸ rpm است و شدت جریان هوا برای هر دو بخش جذب و احیاء  $m^3/s$  ۰/۸۹۷ می‌باشد.

در شکل ۲ پارامترهای حاصل از مدل مذکور و اندازه‌گیری شده شامل درجه حرارت و شدت جریان جرمی رطوبت زدایی در فرآیند زودگذر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این مورد درجه حرارت ورودی بخش جذب ۳۱ °C و درجه حرارت ورودی بخش احیاء ۸۸ °C است. نسبت رطوبت هوا برای هر دو بخش  $\frac{g}{kgDA}$  ۱۲/۵ است، که به ترتیب در شرایط درجه حرارت ۴۵/۱ و رطوبت نسبی ۳/۱ درصد حاصل شده است.

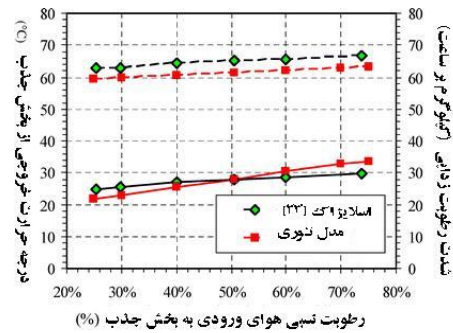
کلی می‌تواند عملکرد چرخ رطوبت زدایی با دقت معقولی در شرایط گذرا و پایدار پیشگویی کند.



شکل ۴. پروفیل تناوبی از پارامترهای حرارتی کانال در شرایط پایدار.

#### ۴-۱. آنالیز حساسیت هندسه چرخ دوار دسیکنت

یکی از نتایج کاربردی پس از اطمینان از صحت مدل، شکل ۶ تأثیر ضخامت ماده جاذب را بر روی درجه حرارت و نسبت رطوبت خروجی از هر بخش چرخ دوار نشان می‌دهد. ظاهراً ضخامت ماده دسیکنت در شرایط گذرا و پایدار بر روی عملکرد چرخ دسیکنت اثر دارد. در موردی که ماده جاذب ضخیم‌تر به کار رفته، زمان طولانی‌تری برای رسیدن به حالت پایدار نیاز می‌باشد. در شرایط پایدار اختلافی در درجه حرارت خروجی از هر بخش وجود دارد. اشکال ۶-الف و ب جزئیات این موضوع را نشان می‌دهند. به طور مشابه در مورد نسبت رطوبت در اشکال ۶-ج و د ملاحظه می‌شود. دلیل این پدیده‌ها این است که جاذب ضخیم‌تر ظرفیت بیشتری را برای انتقال جرم و حرارت داراست. بنابراین افزایش ضخامت ماده جاذب تأثیر مثبتی بر روی شدت رطوبت‌زدایی داخل یک چرخ دسیکنت دارد. به دلیل اینکه شرایط بستر رطوبت‌زدایی جامد



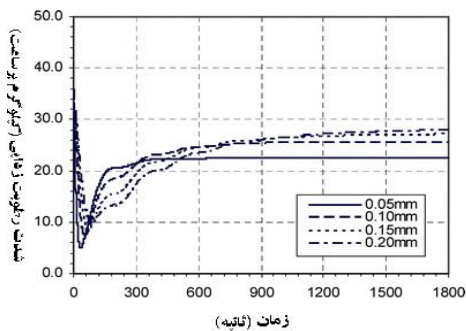
شکل ۳. مقایسه پارامترهای خروجی حاصل از مدل و داده‌های آزمایشگاهی.

در این مورد درجه حرارت هوای احیاء همچنان  $88^{\circ}\text{C}$  است اما درجه حرارت هوای ورودی بخش جذب  $35^{\circ}\text{C}$  است. نتایج نشان می‌دهد که درجه حرارت پیشگویی شده خروجی از بخش جذب به مقدار ناچیزی کمتر از درجه حرارت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی است. اختلاف حدود ۲ و ۳ درجه است. ظرفیت یا شدت رطوبت‌زدایی نزدیک به داده‌های تجربی است. درجه حرارت خروجی از بخش احیاء مقایسه نشده است چون داده‌های آن موجود نبوده است.

این مدل جزئیات شکل ظاهری رطوبت و درجه حرارت در هر دو جریان هوا در داخل کانال و ماده جاذب را نشان می‌دهد. یک نوع پروفیل تناوبی از پارامترهای حرارتی یک المان (کانال) در شرایط پایدار شامل درجه حرارت و آب محتوی بستر در شکل ۴ نشان داده شده است. رطوبت نسبی هوای ورودی به بخش جذب در این اشکال ۷۵ درصد است.

پروفیل تناوبی به صورت یک دوره تناوبی از بخش جذب و احیاء تشکیل شده است. این مدل عددی یک ابزار قوی را برای درک و محاسبه فرآیندهای کوپل پیچیده داخل چرخ فراهم نموده است. براساس آنالیز حاصل از اشکال ۲، ۳ و ۴، اگرچه اندکی اختلاف بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج مدل‌سازی با مدل مذکور وجود دارد اما این مدل به طور

دسیکنت) پس از عبور هوای فرآیندی یا هوای مرطوب به تدریج خشک شده و جریان هوای احیاء نیز با جذب رطوبت مرطوب می‌گردد لذا وضعیت این جریان‌ها در داخل بستر و پس از عبور از چرخ برای طراحی بسیار مهم است و لذا حل مدل نیز در شرایط گذرا با گذشت زمان صورت گرفته است. مدل ریاضی به کار رفته در این مطالعه همچنین قادر است جزئیات شکل ظاهری رطوبت و درجه حرارت در هر دو جریان هوا در داخل کانال و ماده جاذب را در دوره‌های مختلف گردش چرخ نشان دهد. یک نوع پروفیل تناوبی از پارامترهای حرارتی یک المان (کانال) در شرایط پایدار شامل نسبت رطوبت، آب محتوی بستر و درجه حرارت هوا در اشکال ۴ نشان داده شده است. پروفیل تناوبی به صورت یک دوره تناوبی از بخش جذب و احیاء تشکیل شده است. این مدل عددی یک ابزار قوی را برای درک و محاسبه فرآیندهای کوپل پیچیده داخل چرخ فراهم نموده است. براساس آنالیز حاصل از اشکال حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه این نتیجه حاصل می‌شود که اگرچه اندکی اختلاف بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج مدل‌سازی با مدل مذکور وجود دارد اما این مدل به طور کلی می‌تواند عملکرد چرخ رطوبت زدایی با دقت معقولی در شرایط گذرا و پایدار پیشگویی کند. در اشکال ارائه شده تغییرات نسبت رطوبت جریان هوا را برای دور اول و دوم گردش چرخ برای بخش جذب و احیاء نشان داده شده است. این اشکال نشان می‌دهد که در پریود دوم گردش چرخ نسبت رطوبت هوا در هر دو بخش جذب و احیاء اندکی تغییر کرده است. علت تغییر شرایط منحنی‌ها با یکدیگر در دور اول گردش چرخ به دور دوم، تغییرات درجه حرارت جریان هوا به دلیل افزایش درجه حرارت بستر (ناشی از جریان هوای داغ احیاء) و نیز تغییر شرایط آب محتوی بستر در ورودی به دور دوم گردش چرخ است.



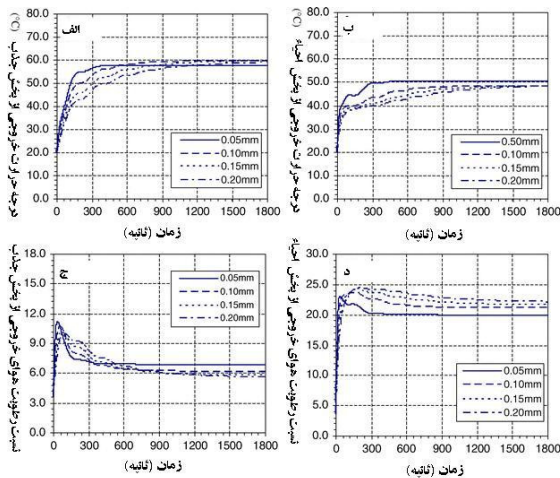
شکل ۵. شدت رطوبت زدایی برای بخش جذب بر حسب زمان در ضخامت‌های مختلف ماده جاذب.

شکل ۶ تأثیر ضخامت ماده جاذب را بر روی درجه حرارت و نسبت رطوبت خروجی از هر بخش چرخ دوار نشان می‌دهد. ظاهراً ضخامت ماده دسیکنت در شرایط گذرا و پایدار بر روی عملکرد چرخ دسیکنت اثر دارد. در موردیکه

پیشگویی حساسیت عملکرد چرخ دسیکنت نسبت به

مدل ریاضی به کار رفته در این مطالعه همچنین قادر است جزئیات شکل ظاهری رطوبت و درجه حرارت در هر دو جریان هوا در داخل کانال و ماده جاذب را در دوره‌های مختلف گردش چرخ نشان دهد. یک نوع پروفیل تناوبی از پارامترهای حرارتی یک المان (کانال) در شرایط پایدار شامل نسبت رطوبت، آب محتوی بستر و درجه حرارت هوا در اشکال ۴ نشان داده شده است. پروفیل تناوبی به صورت یک دوره تناوبی از بخش جذب و احیاء تشکیل شده است. این مدل عددی یک ابزار قوی را برای درک و محاسبه فرآیندهای کوپل پیچیده داخل چرخ فراهم نموده است. براساس آنالیز حاصل از اشکال حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه این نتیجه حاصل می‌شود که اگرچه اندکی اختلاف بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج مدل‌سازی با مدل مذکور وجود دارد اما این مدل به طور کلی می‌تواند عملکرد چرخ رطوبت زدایی با دقت معقولی در شرایط گذرا و پایدار پیشگویی کند. در اشکال ارائه شده تغییرات نسبت رطوبت جریان هوا را برای دور اول و دوم گردش چرخ برای بخش جذب و احیاء نشان داده شده است. این اشکال نشان می‌دهد که در پریود دوم گردش چرخ نسبت رطوبت هوا در هر دو بخش جذب و احیاء اندکی تغییر کرده است. علت تغییر شرایط منحنی‌ها با یکدیگر در دور اول گردش چرخ به دور دوم، تغییرات درجه حرارت جریان هوا به دلیل افزایش درجه حرارت بستر (ناشی از جریان هوای داغ احیاء) و نیز تغییر شرایط آب محتوی بستر در ورودی به دور دوم گردش چرخ است. پیشگویی حساسیت عملکرد چرخ دسیکنت نسبت به

شده تغییرات نسبت رطوبت جریان هوا را برای دور اول و دوم گردش چرخ برای بخش جذب و احیاء نشان داده شده است. این اشکال نشان می‌دهد که در پرپود دوم گردش چرخ نسبت رطوبت هوا در هر دو بخش جذب و احیاء اندکی تغییر کرده است. علت تغییر شرایط منحنی‌ها با یکدیگر در دور اول گردش چرخ به دور دوم، تغییرات درجه حرارت جریان هوا به دلیل افزایش درجه حرارت بستر (ناشی از جریان هوای داغ احیاء) و نیز تغییر شرایط آب محتوی بستر در ورودی به دور دوم گردش چرخ است.



شکل ۶. اثرات ضخامت ماده جاذب را بر روی درجه حرارت و نسبت رطوبت خروجی از هر بخش چرخ دوار.

### فهرست علائم اختصاری

$$B_i = \text{عدد بایوت کانال عبور جریان هوا با رابطه } \frac{h_i \cdot d}{k}$$

$$B_{im} = \text{عدد بایوت ماده جاذب با رابطه } \frac{h_m \cdot \delta}{k}$$

$$C_p = \text{ظرفیت گرمایی ویژه (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})}$$

$$d = \text{قطر کانال عبور جریان هوا}$$

$$D_s = \text{ضریب نفوذ مولکولی ماده دسیکنت (m^2 \cdot s^{-1})}$$

$$D_e = \text{قطر معادل منافذ چرخ دسیکنت (m)}$$

$$D_w = \text{قطر چرخ دوار دسیکنت (m)}$$

ماده جاذب ضخیم‌تر به کار رفته زمان طولانی‌تری برای رسیدن به حالت پایدار نیاز می‌باشد. در شرایط پایدار اختلافی در درجه حرارت خروجی از هر بخش وجود دارد. اشکال 6a و 6b جزئیات این موضوع را نشان می‌دهند. به طور مشابه در مورد نسبت رطوبت در اشکال 6c و 6d ملاحظه می‌شود. دلیل این پدیده‌ها این است که جاذب ضخیم‌تر ظرفیت بیشتری را برای انتقال جرم و حرارت داراست. بنابراین افزایش ضخامت ماده جاذب تأثیر مثبتی بر روی شدت رطوبت‌زدایی داخل یک چرخ دسیکنت دارد. به دلیل اینکه شرایط بستر رطوبت‌زدایی جامد (دسیکنت) پس از عبور هوای فرآیندی یا هوای مرطوب به تدریج خشک شده و جریان هوای احیاء نیز با جذب رطوبت مرطوب می‌گردد لذا وضعیت این جریان‌ها در داخل بستر و پس از عبور از چرخ برای طراحی بسیار مهم است و لذا حل مدل نیز در شرایط گذرا با گذشت زمان صورت گرفته است.

مدل ریاضی به کار رفته در این مطالعه همچنین قادر است جزئیات شکل ظاهری رطوبت و درجه حرارت در هر دو جریان هوا در داخل کانال و ماده جاذب را در دوره‌های مختلف گردش چرخ نشان دهد. یک نوع پروفیل تناوبی از پارامترهای حرارتی یک المان (کانال) در شرایط پایدار شامل نسبت رطوبت، آب محتوی بستر و درجه حرارت هوا در اشکال ۴ نشان داده شده است. پروفیل تناوبی به صورت یک دوره تناوبی از بخش جذب و احیاء تشکیل شده است. این مدل عددی یک ابزار قوی را برای درک و محاسبه فرآیندهای کوپل پیچیده داخل چرخ فراهم نموده است. براساس آنالیز حاصل از اشکال حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه این نتیجه حاصل می‌شود که اگرچه اندکی اختلاف بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج مدل‌سازی با مدل مذکور وجود دارد اما این مدل به طور کلی می‌تواند عملکرد چرخ رطوبت‌زدایی با دقت معقولی در شرایط گذرا و پایدار پیشگویی کند. در اشکال ارائه

2 = شرایط ورودی بخش احیاء  
 0 = شرایط اولیه  
 a = شرایط محیط  
 eq یا \* = شرایط عملکرد تعادلی  
 f = ماده دسیکانت جامد  
 g = شرایط جریان هوای فرآیندی یا مرطوب

$\frac{f_v}{f_s}$  = نسبت مساحت سطح چرخ دسیکانت به حجم آن که ممکن است به صورت  $f_v$  نیز نمایش داده شود ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )  
 $h_i$  و  $h_m$  = ضرایب انتقال حرارت جابجایی در داخل ماده جاذب و هوا که معادل  $\frac{h_i}{\rho_i C_{p,i} Le}$  می باشد ( $w \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$ )

$Nu_D$  = عدد بدون بعد ناسلت که معادل  $\frac{h_i D}{k_f}$  است

$k_f$  = ضریب انتقال حرارت هدایتی که فقط برای ماده جاذب تعریف می شود ( $w \cdot m^{-1} \cdot C^{-1}$ )

$K_Y$  = ضریب انتقال جرم ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$L_w$  = ضخامت ماتریس یا طول چرخ دسیکانت (m)

$Le$  = عدد بدون بعد لوئیس که برای سیستم آب و هوا تقریباً برابر  $0.894$  است

mod = مفهوم عملگر ریاضی باقیمانده تقسیم

$n$  و  $o$  = سطوح زمان جدید و قدیم در حل مدل

RH = رطوبت نسبی (%)

$T$  = درجه حرارت ( $^{\circ}C$ )

$u_g$  = سرعت جریان هوای فرآیندی ( $m \cdot s^{-1}$ )

$W$  = آب محتوی دسیکانت ( $kg_{water} \cdot kg^{-1}_{adsorbent}$ )

$Y$  = نسبت رطوبت ( $g_{moisture} \cdot kg^{-1}_{dry air}$ )

$Re_D$  = عدد رینولدز داخل کانالهای چرخ دوار

#### نشانه های یونانی

$\rho$  = دانسیته ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\square$  = جزء زاویه ای بخش جذب

$\delta$  = ضخامت ماده جاذب داخل کانالها

$\theta, z$  = محورهای مختصات

$\mu$  = ویسکوزیته جریان هوا

$\theta$  = زاویه گردش چرخ

$\omega$  = سرعت زاویه ای چرخ ( $sec^{-1}$ )

$\Phi_T, \Phi_{TM}, \Phi_M$  = ضرایب کمکی اضافه شده در روابط اصلی

$\Psi_T, \Psi_{TM}, \Psi_M$  = ترم های کمکی در معادلات اصلی

#### زیر نویس ها

1 = شرایط ورودی بخش جذب

## مراجع

- Zhiming Gao, Viung C. Mei, John J. Tomlinson "Theoretical analysis of dehumidification process in a desiccant wheel", *Heat Mass Transfer*, Vol. 41 (2005) 1033-1042.
- Ahmad A. Pesaran, Keith B. Wipke, "Use of Unglazed Transpired Solar Collectors for Desiccant Cooling", *Solar Energy*, Vol. 52, No 5 (1994) 419-427.
- D. Baharathan, J.M. Parsons, I.L. Maclain-Cross, "Experimental Studies of Heat and Mass Exchange in Parallel Passage Rotary Desiccant Dehumidifiers for Solar Cooling Applications", *Solar Energy Research Institute Report*, SERI/TR, (1987) 252-289.
- D.V. Shastry, B.S. Jagadish, G.K. Sharma, "Performance Studies On Adsorbents For Desiccant Cooling", *7th International Conference on Alternative Energy Recourses*, Miami University, (1992) 49-57
- W. Zheng, W.M. Worek, "Numerical Simulation of Combined Heat and Mass Transfer Processes in a Rotary Dehumidifier", *Numerical Heat Transfer*, Part A, Vol. 23, (1993) 211-232.
- W. Zheng, W.M. Worek, V. Novosel, "Performance Optimization of Rotary Dehumidifiers", *ASME Journal of Solar Energy Science and Engineering*, Vol. 117, (1995) 40-44.
- D. Charoensupaya, W. M. Worek, "Parametric Study of an Open Cycle Adiabatic Solid Desiccant Cooling System", *Energy*, Vol. 13, (1988) 739-747.
- D. Charoensupaya, W. M. Worek, "Effect of Adsorbent Heat and Mass Transfer Resistances on Performance of an Open Cycle Adiabatic Desiccant Cooling System", *Heat Recovery Sys.*, Vol 6, (1988) 537-548.
- P. Majumdar, W.M. Worek, Combined Heat and Mass Transfer in a Porous Adsorbent, *Energy*, Vol. 14, (1989) 161-175.
- Jung-Yang San, "Heat and Mass Transfer in a Two Dimensional Cross Flow Regenerator with a Solid Conduction Effect", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, (1993) 633-643.
- Jung-Yang San, S.C. HSIAU, (1993), Effect of Axial Solid Heat Conduction and Mass Diffusion in a Rotary Heat and Mass Regenerators, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, 2051-2059.

12. G. Konard, G. Eigenberger, "Heat and Mass Regenerators in Rotor Adsorber", *Chem. Eng. Tech.*, Vol. 66, (1994) 321-331.
13. A. Kodama, M. Goto, H. Tsutoma, T. Kuma, "Experimental Study of Operation for a Honeycomb Adsorber Operated with Thermal Swing", *J. Chem. Engineering of Japan*, Vol. 26, (1993) 530-535.
14. A. Kodama, M. Goto, H. Tsutoma, T. Kuma, "Temperature Profile and Optimum Rotational Speed of a Honey", *J. Chem. Engineering of Japan*, Vol. 27, (1994) 644-649.
15. A. Kodama, M. Goto, H. Tsutoma, T. Kuma, "Performance Evaluation of a Thermal Swing Honeycomb Rotor Adsorber Using a Humidity Chart", *J. Chem. Engineering of Japan*, Vol. 28, (1995) 19-24.
16. Pahlavanzadeh H, Mozaffari H, "Performance optimization of rotary desiccant dehumidifiers", *Iranian Journal of science and Technology*, vol. 27, (2003) 337-344.
17. Pahlavanzadeh H, Zamzamin A.H, "A mathematical model for a fixed desiccant bed dehumidifier concerning Ackermann correction factor", *Iranian Journal of science and Technology*, vol. 30, (2006) 353-362.
18. Pahlavanzadeh H, Zamzamin A.H, Omidkhah M.R, "Analysis of Effectiveness Parameter in the Rotary desiccant Wheel Performance", *Journal of Sharif university*, vol. 21, (2006) 124-129.
19. Zhang HF, Yu JD, Liu ZS, "The research and development of the key components for desiccant cooling system", *World Renewable Energy Congress*, (1996) 653-656.
20. Ahmad A. Pesaran, Keith B. Wipke, "Use of Unglazed Transpired Solar Collectors for Desiccant Cooling", *Solar energy*, Vol. 52, No 5, (1994) 419-427.
21. L.A. Sphaier, W.M. Worek, "Analysis of Heat and Mass Transfer in Porous Sorbents Used in Rotary Regenerators", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, (2004), 3415-3430.
22. F.P. Incropera, D.P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer", *3rd Ed. Wiley*, Toronto, Canada, Ch. 4, (1996) 435-440.
23. F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, *4th ed., Wiley*, Toronto, Canada, Ch. 11, (1996) 210-220.
24. S.J. Slayzak, A.A. Pesaran, C.E. Hancock, "Experimental Evaluation of Commercial Desiccant Dehumidifier Wheels", *National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report*, USA (1998).