

مدلسازی ریاضی و مطالعه پارامتری عملکرد یک خشک کن خورشیدی تماس غیرمستقیم

امیر رحیمی*، میثم ناظری، آرزو نیکسیر

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: rahimi@eng.ui.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، مدلسازی ریاضی و بررسی پارامتری عملکرد یک خشک کن خورشیدی با تماس غیرمستقیم است. بدین منظور، به کمک قوانین بقای انرژی و جرم و اصول فیزیکی حاکم بر عملکرد این سیستم‌ها، معادلات حاکم بر بخش جمع‌کننده خورشیدی و بخش بستر ثابت در حالت عملکرد ناپایا استخراج و به کمک روش‌های عددی مناسب حل گردید. تأثیر متغیرهای عملیاتی و ساختاری خشک کن خورشیدی بر عملکرد آن به کمک مدل توسعه داده شده بررسی و بازدهی خشک کردن در شرایط مختلف محاسبه گردید. نتایج حاصل از این مدل با انتظارات مرتبط با قوانین بقاء و اصول فیزیکی حاکم بر این سیستم‌ها به خوبی مطابقت دارد.

کلمات کلیدی: خشک کن خورشیدی، انرژی خورشیدی، مدل‌سازی ریاضی، جمع‌کننده خورشیدی

۱- مقدمه

تبخیر سطحی آن، شدت خشک شدن کاهش می‌یابد. در خصوص مواد جامد متخلخل، پدیده نفوذ رطوبت در سطح ماده و از طریق لوله‌های موئین درون آن و یا حتی تبخیر رطوبت در درون جامد نیز مشاهده شده است. بنابراین بررسی و مطالعه خشک شدن این نوع مواد به دلیل پیچیدگی‌های نظری مربوط به حرکت سیالات و انتقال جرم و گرما در محیط‌های متخلخل، کار چندان ساده‌ای نیست. از بدو ساخت و توسعه خشک‌کن‌های صنعتی، مشابه با اکثر صنایع از انرژی‌های فسیلی به‌عنوان منبع اصلی تولید حرارت استفاده شده است؛ اما با توجه به محدودیت‌های خاص سوخت‌های فسیلی نظیر پتانسیل بالای آلاینده‌گی هوا، حمل و نقل، کاهش این منابع و در دسترس نبودن آن در تمام نقاط، نیاز به جایگزین کردن آن با منابع

عملیات خشک کردن یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین عملیات مهندسی در اغلب صنایع نظیر صنایع غذایی، شیمیایی، داروسازی، سرامیک و کاغذسازی می‌باشد که هدف از آن جذب آب از ماده و کاهش رطوبت آن است. در طی این عملیات، پدیده‌های انتقال جرم و گرما به‌صورت همزمان درون جامد و سیال حامل انرژی انجام می‌پذیرد. مکانیسم یا مکانیسم‌های خشک شدن مواد جامد بر اساس شدت و روند خشک شدن آن ماده طبقه‌بندی می‌شود. در مواد حاوی رطوبت سطحی شدت تبخیر رطوبت همراه جامد، ثابت است و به دما، رطوبت و سرعت هوای حامل انرژی حرارتی بستگی دارد. در مرحله دوم، به دلیل لزوم نفوذ رطوبت از درون جامد به سطح و

جدید انرژی کاملاً محسوس است [۱].

خشک‌کن‌های هیبریدی از هر دو مکانیسم یاد شده به طور همزمان بهره‌می‌گیرند [۵].

مطالعات آزمایشگاهی مختلفی در خصوص عملکرد این نوع از سیستم‌های تبادل جرم و گرما و در زمینه خشک کردن مواد و محصولات مختلف صورت پذیرفته است [۹-۶]. بررسی سینتیک خشک شدن نیز از جمله مطالعاتی بوده است که توسط محققان تعقیب شده است [۱۱ و ۱۰]. با وجود این، مدلسازی ریاضی عملکرد این سیستم‌ها، که می‌تواند ابزاری کارآمد جهت طراحی دقیق و بهینه‌سازی باشد، بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به موارد پیش‌گفته، هدف از انجام این تحقیق، مدلسازی ریاضی یک خشک‌کن خورشیدی با تماس غیرمستقیم است. سیستم مورد مطالعه شامل یک جمع‌کننده خورشیدی جهت گرم کردن هوا و یک بستر ثابت از ذرات خشک‌شونده می‌باشد که هر دو بخش این سیستم بر اساس قوانین بقا و فیزیک سیستم مورد مدلسازی قرار می‌گیرند. شایان ذکر است که بر اساس بررسی‌های به عمل آمده تاکنون مدلسازی این نوع سیستم‌ها مورد توجه محققان قرار نگرفته است.

۲- مدل ریاضی

۲-۱ طرح اجمالی سیستم مورد مطالعه

شکل (۱) طرح اجمالی یک خشک‌کن خورشیدی با تماس غیرمستقیم مورد نظر در این مطالعه را نشان می‌دهد. جمع‌کننده خورشیدی مورد مطالعه از نوع مسطح انتخاب شده است که جنس صفحه جذب‌کننده انرژی عمدتاً از نیکل سیاه می‌باشد. پوشش شیشه‌ای برای عبور تابش خورشیدی روی جمع‌کننده خورشیدی به کار برده شده و به غیر از پوشش شیشه‌ای، تمام سطح خارجی جمع‌کننده خورشیدی عایق فرض شده است. قسمت خروجی جمع‌کننده خورشیدی به یک برج که در آن ماده خشک‌شونده به صورت یک بستر ثابت قرار گرفته است، متصل شده است. هوای گرم از قسمت خروجی جمع‌کننده خورشیدی وارد برج شده و محصولات را خشک می‌کند. این سیستم برای خشک کردن محصولات کشاورزی مانند گندم، جو، برنج، نخود سبز و لوبیا و غیره مناسب است.

در این راستا به دلیل هزینه‌های اولیه و عملیاتی اندک و سازگاری با محیط زیست، امروزه انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع لایزال، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است [۲]. شاید انسان از همان آغاز برای خشک کردن مواد، همواره از انرژی خورشیدی به طور مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌نموده است. در بهره‌گیری مستقیم از انرژی خورشیدی همواره مسائل و مشکلاتی نیز وجود دارد که از آن جمله می‌توان به احتمال آلودگی محصول به ذرات گرد و غبار و آلاینده‌های هوا، امکان آلودگی‌های میکروبی، هدر رفتن محصول و بسیاری مسائل دیگر اشاره کرد. به عنوان مثال، هیل را نمی‌توان از این طریق خشک کرد، زیرا سبزی‌نگی آن محو می‌شود [۳]. به همین دلیل نیاز به طراحی دستگاه‌هایی که در عین فراهم نمودن امکان استفاده از انرژی خورشیدی، معایب روش خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید را نداشته باشند کاملاً احساس می‌شود. برای این منظور، انرژی خورشید در یک مرحله برای گرمایش حجم معینی از هوا به کار می‌رود و در مرحله بعد، هوای گرم شده از روی مواد خشک‌شونده عبور داده می‌شود. امروزه چنین تجهیزاتی به عنوان خشک‌کن‌های خورشیدی نامیده می‌شوند [۴].

ساختار اکثر خشک‌کن‌های خورشیدی تقریباً یکسان و شامل محفظه خشک‌کن، جمع‌کننده‌های خورشیدی، تجهیزات ایجاد جریان هوا، وسایل اندازه‌گیری و کنترل، سایر تجهیزات مانند لوله‌ها و در بعضی موارد، وسایل ذخیره گرما می‌باشد [۵ و ۳].

در یک دسته‌بندی کلاسیک می‌توان خشک‌کن‌های خورشیدی را به دو دسته فعال (خشک‌کن‌هایی با انتقال گرمای جابجایی اجباری) و غیرفعال (خشک‌کن‌های جابجایی طبیعی مانند: کابینتی، خیمه‌ای، گلخانه‌ای، سینی‌دار) تقسیم‌بندی کرد. همچنین هر یک از انواع خشک‌کن‌های فعال و غیرفعال به سه زیرمجموعه شامل خشک‌کن‌های مستقیم، غیرمستقیم و هیبریدی قابل طبقه‌بندی هستند. منظور از خشک‌کن‌های تماس مستقیم، سیستم‌هایی است که محصولات خشک‌شونده در محفظه جمع‌کننده به طور مستقیم در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرند. خشک‌کن‌های تماس غیرمستقیم سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها محصولات خشک‌شونده در یک بستر ثابت، سیال شده یا متحرک در معرض هوایی که توسط جمع‌کننده گرم شده است قرار می‌گیرند.

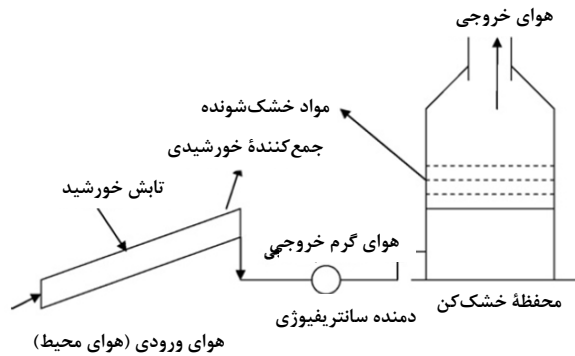
۳. با توجه به عایق‌بندی صفحه کف جمع‌کننده خورشیدی و خصوصیات سطحی منتخب آن، این صفحه از نظر تابشی سیاه فرض می‌شود.

۴. با فرض جسم خاکستری ضرایب جذب، عبوردهی و انعکاس شیشه و صفحه جمع‌کننده، ثابت و مستقل از طول موج فرض می‌شود.

۵. هوا گاز ایده‌آل فرض می‌شود.

۶. از افت فشار گاز در مسیر حرکت آن صرف‌نظر می‌شود.

۷. جریان گاز در درون جمع‌کننده خورشیدی قالبی فرض می‌شود.



شکل ۱- طرح اجمالی یک خشک‌کن خورشیدی با تماس غیرمستقیم

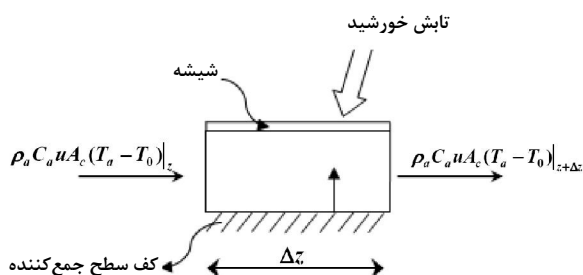
(الف) معادله موازنه انرژی برای هوای عبوری از جمع‌کننده

با توجه به شکل (۲)، که نمایی از المان (عنصر) مفروض جهت برقراری موازنه انرژی را نشان می‌دهد، معادله موازنه انرژی برای هوای عبوری از جمع‌کننده به صورت زیر قابل بیان است:

$$\rho_a C_a u A_c (T_a - T.) \Big|_z - \rho_a C_a u A_c (T_a - T.) \Big|_{z+\Delta z} + h_2 (W \Delta z) (T_S - T_a) + h_2 (W \Delta z) (T_C - T_a) = 0 \quad (1)$$

در این معادله h_2 ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوا در جمع‌کننده است که از مرجع [۱۲] به دست می‌آید. جملات سوم و چهارم این معادله به ترتیب تبادل انرژی بین هوا با کف جمع‌کننده و پوشش شیشه‌ای محفظه را نشان می‌دهد. ساده‌سازی این معادله در فرم دیفرانسیلی خود، منجر به رابطه زیر می‌گردد:

$$\frac{dT_a}{dz} = \frac{h_2 W [(T_S - T_a) + (T_C - T_a)]}{\rho_a C_a u A_c} \quad (2)$$



شکل ۲- عنصر مفروض برای جریان هوا در جمع‌کننده

سطح خارجی برج با توجه به هدف عملکردی برج و برای جلوگیری از اتلاف گرما، عایق فرض می‌شود. در داخل برج ثابت بستر برای توزیع یکسان هوا از توزیع‌کننده استفاده می‌شود.

بر اساس آنچه گفته شد در بخش جمع‌کننده فقط عملیات انتقال گرما وجود دارد. هوای محیط به وسیله وانتیلاتور با شدت جریان ثابتی وارد جمع‌کننده شده و از طریق مکانیسم‌های انتقال گرمای تابشی، جابجایی و هدایتی گرم می‌شود. در برج ثابت بستر خشک‌کن، عملیات انتقال گرما و انتقال جرم (خشک‌شدن) به طور همزمان انجام می‌شود.

در ادامه و با توجه به ساختار قید شده معادلات حاکم بر این سیستم استخراج می‌گردد. مشابه با ساختار فیزیکی سیستم، مدل ریاضی نیز شامل دو قسمت می‌باشد. قسمت اول شامل معادلات حاکم بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی و قسمت دوم شامل معادلات حاکم بر عملکرد برج خشک‌کن ثابت بستر است.

۲-۲ مدل ریاضی جمع‌کننده خورشیدی

هدف از مدلسازی این بخش از سیستم، پیش‌بینی توزیع دمای هوا در طول خشک‌کن و دمای نهایی آن و همچنین امکان‌پذیری بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری و عملیاتی بر آن است. در مدلسازی این بخش از خشک‌کن خورشیدی فرضیات زیر اعمال گردیده است:

۱. دمای محیط پیرامونی و شدت تابش خورشید ثابت فرض می‌شود (فرض شرایط عملیاتی شبه پایا).

۲. خصوصیات حرارتی و ترموفیزیکی شیشه و هوا ثابت است.

شرط مرزی برای این معادله به صورت زیر است:

$$\text{at } z = 0 : \quad T_a = T_{am}$$

از آنجایی که دمای صفحه جذب کننده (T_s) و دمای پوشش داخلی شیشه (T_c) در طول جمع کننده متغیر است، ضروری است که معادلاتی برای تغییرات دمای آن‌ها نیز به دست آید.

(ب) موازنه انرژی برای صفحه جذب کننده

صفحه جذب کننده انرژی تابشی عبوری از پوشش شیشه‌ای را به طور کامل جذب کرده و با هوای درون جمع کننده از طریق مکانیسم جابجایی تبادل انرژی می‌کند. در نتیجه، معادله موازنه انرژی برای این صفحه به صورت زیر قابل بیان است:

$$I_0 \tau_c + h_2(T_a - T_s) = 0 \quad (3)$$

بنابراین:

$$T_s = \frac{I_0 \tau_c + h_2 T_a}{h_2} \quad (4)$$

به طوری که، $I_0 \tau_c$ درصدی از انرژی تابشی خورشید است که از شیشه عبور کرده است.

(پ) موازنه انرژی برای شیشه

در مدلسازی این بخش از سیستم انرژی تابشی خورشید که توسط شیشه جذب می‌گردد به عنوان یک منبع انرژی درونی برای شیشه لحاظ می‌شود. معادله توزیع دما و شرایط مرزی مربوط به شیشه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{d^2 T_c}{dx^2} + \frac{q}{k_c} = 0$$

که در آن، $q = \frac{I_0 \alpha_c}{\delta}$ با دو بار انتگرال گیری از معادله فوق چنین به دست می‌آید:

$$T_c = -\frac{q}{2k_c} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (5)$$

در معادله (5) C_1 و C_2 ضرایب ثابتی هستند که با توجه به شرایط مرزی زیر تعیین می‌شوند:

$$\text{at } x = 0 : \quad k_c \frac{dT_c}{dx} = h_2(T_c - T_a) \quad (6)$$

$$\text{at } x = \delta : \quad k_c \frac{dT_c}{dx} = h_1(T_{am} - T_c)$$

با اعمال شرایط مرزی فوق، پاسخ معادله مربوط به تغییرات دمای شیشه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_c = \frac{q\delta + \frac{qh_1\delta^2}{2k} + h_1 T_{am} + h_2 T_a + h_1 h_2 \frac{\delta}{k_c} T_a}{h_1 + h_2 + \frac{h_1 h_2}{k_c}} \quad (7)$$

۳-۲ مدل ریاضی مربوط به برج خشک کن ثابت بستر

هدف از مدلسازی بخش خشک کن ثابت بستر یافتن روند کاهش رطوبت ذرات جامد با زمان و در نقاط مختلف بستر است. به منظور تعیین سرعت تبخیر رطوبت از هر ذره از مدل سینتیک خشک شدن ماده مورد نظر استفاده شده است. مزیت این نوع روابط در تعیین سرعت خشک شدن، عدم الزام به حل معادله توزیع رطوبت در درون ذره، پرهیز از پیچیدگی و تابعیت آن از پارامترهای عملیاتی سیستم است. این روش در خصوص مواد خشک شونده‌ای که شکل هندسی مشخصی ندارند تقریباً گریزناپذیر است. در این بخش معادلات حاکم بر عملکرد خشک کن ثابت بستر شامل معادله تغییرات رطوبت ذره با زمان و مکان، معادله تغییرات رطوبت و دمای گاز در طول بستر و زمان و معادله تغییرات دمای ذره استخراج و به طور همزمان حل می‌شوند.

در مدلسازی بخش خشک کن ثابت بستر، فرضیات زیر به کار رفته است:

۱. چروکیدگی ماده خشک شونده ناچیز است و تغییر در تخلخل بستر به وجود نمی‌آید.
۲. از وجود توزیع دما درون ذره صرف نظر می‌شود.
۳. از توزیع غلظت و دما در جهت شعاعی بستر صرف نظر می‌شود.
۴. برج نسبت به محیط آدیاباتیک است.
۵. از انتقال گرمای هدایتی در جهت حرکت سیال صرف نظر می‌شود.
۶. خواص ترموفیزیکی آب، هوا و ذره جامد و رطوبت همراه، ثابت فرض می‌شود.

عددی مدل برای هر لایه از ذرات این معادله به طور جداگانه به کار می‌رود.

(ب) موازنه انرژی برای هوا

با در نظر گرفتن یک عنصر طولی در جهت حرکت گاز در درون بستر چنین نتیجه می‌شود:

$$\dot{m}_{ad} H \Big|_z - \dot{m}_{ad} H \Big|_{z+\Delta z} + N_A a A M_A \Delta z \lambda_0 - h_a a A \Delta z (T_a - T_p) = A \Delta z \varepsilon \rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (13)$$

در این معادله h_a ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوا در بستر ثابت است [۱۳].

با تقسیم معادله بر حجم عنصر مفروض و میل دادن اندازه آن به سمت صفر معادله زیر حاصل می‌شود:

$$-\dot{m}_{ad} \frac{\partial H}{\partial z} + N_A a A M_A \lambda_0 - h_a a A (T_a - T_p) = A \varepsilon \rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (14)$$

که در آن آنتالپی گاز مرطوب به صورت زیر تعریف شده است،

$$H = C_M (T_a - T_0) + y' \lambda_0 \quad (15)$$

$$C_M = C_a + y' C_v \quad (16)$$

با جایگذاری معادلات (۱۵) و (۱۶) در معادله (۱۴) و پس از ساده‌سازی، معادله نهایی مربوط به تغییرات دمای گاز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$-\dot{m}_{ad} C_M \frac{\partial T_a}{\partial z} - h_a a A (T_a - T_p) = A \varepsilon \rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (17)$$

شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله (۱۷)، به شرح زیر می‌باشند:

$$\text{at } z = 0 : \quad T_a = T_0$$

$$\text{at } t = 0 : \quad T_a = T_0$$

(الف) سینتیک خشک شدن و موازنه جرم برای رطوبت ذره رابطه زیر برای محاسبه سرعت خشک شدن ارائه شده است [۱۱]:

$$-\frac{\partial X}{\partial t} = K (X - X_e) \quad (8)$$

در معادله (۸)، X رطوبت ماده خشک‌شونده، X_e رطوبت تعادلی (هر دو بر مبنای خشک)، K ضریب سرعت خشک کردن (min^{-1}) و t مدت خشک کردن است. معادلات زیر برای محاسبه ضریب سرعت خشک شدن و رطوبت تعادلی فلفل سبز ارائه شده است [۱۱]:

$$K = K_0 d_p^{k_1} T_a^{k_2} v_a^{k_3} R h^{k_4} \quad (9)$$

$$X_e = b_1 \exp\left(\frac{b_2}{T_a}\right) \left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^{b_3} \quad (10)$$

$$a_w = \frac{R h}{100} \quad (11)$$

برای حل معادله (۸) نیاز به یک شرط اولیه می‌باشد که می‌توان از شرط اولیه زیر استفاده کرد:

$$\text{at } t = 0 : X = X_i$$

معادله موازنه جرم رطوبت برای ذره خشک‌شونده به رابطه زیر منجر می‌گردد،

$$-m_s \frac{\partial X}{\partial t} = N_A A_p M_A \rightarrow N_A = \frac{m_s}{A_p M_A} K (X - X_e) \quad (12)$$

که N_A شار مولی انتقال جرم آب از سطح ماده خشک‌شونده به هوا و m_s جرم ماده خشک می‌باشد. همان‌گونه که گفته شد N_A بر حسب یک رابطه سینتیک خشک‌شدن از مرتبه اول نوشته می‌شود.

با مشاهده معادله (۸) در نگاه اول این چنین به نظر می‌رسد که رطوبت ذره تابعیت مکانی ندارد. این در حالی است که به این دلیل که X_e و K تابع رطوبت و دمای هوا هستند و این دو پارامتر در طول برج متغیراند، x هم تابع زمان و هم تابع مکان خواهد بود. در حل

(پ) موازنه جرم برای رطوبت هوا

افزایش رطوبت هوا در طول بستر ناشی از تبخیر رطوبت همراه جامد است. لذا معادله بقای جرم رطوبت در فاز گاز به صورت زیر قابل بیان است:

$$(1-\varepsilon)\rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_a a (T_a - T_p) - \frac{m_S a \lambda_0}{A_p M_A} K (X - X_e) \quad (22)$$

شرط اولیه برای حل معادله (۲۲) عبارت است از:

$$\text{at } t = 0 : \quad T_p = T_{am}$$

چگالی (ρ_p) و ظرفیت گرمایی (C_p) ماده خشک شونده از مرجع [۷] به دست می آید.

از سویی بازدهی خشک کن ثابت بستر به صورت نسبت رطوبت جدا شده از ذرات به رطوبت اولیه قابل تعریف است. اما از آنجایی که رطوبت ذرات در نقاط مختلف بستر یکسان نیست لذا باید از متوسط توده ای رطوبت موجود در ذرات استفاده کرد. بنابراین:

$$\eta = \frac{X_i - \bar{X}(t)}{X_i} \times 100 \quad (23)$$

به طوری که،

$$\bar{X}(t) = \frac{\int_0^L X(z,t) dz}{L} \quad (224)$$

۳- نتایج و بحث

همان گونه که پیشتر ذکر شد، سیستم مورد مطالعه شامل دو بخش گرم کن خورشیدی و خشک کن ثابت بستر است. لذا ارائه نتایج نیز به دو بخش نتایج مربوط به بخش های یاد شده تقسیم می شود. تأثیر پارامترهای عملیاتی و ساختاری بر عملکرد و بازدهی گرم کن خورشیدی و خشک کن ثابت بستر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط عملیاتی و ابعاد فیزیکی سیستم مورد نظر در جدول (۱) آورده شده اند. زمانی که اثر یک پارامتر بررسی می شود، سایر مشخصات عملیاتی ثابت بوده و مقادیر پیش فرض جدول (۱) برای آن ها جایگذاری می شود.

$$\dot{m}_{ad} y' \Big|_z - \dot{m}_{ad} y' \Big|_{z+\Delta z} + N_A a M_A \Delta z = A \Delta z \varepsilon \rho_a \frac{\partial y'}{\partial t} \quad (18)$$

در فرم دیفرانسیلی، این معادله به صورت زیر قابل بازنویسی است،

$$-\dot{m}_{ad} \frac{\partial y'}{\partial z} + N_A a M_A = A \varepsilon \rho_a \frac{\partial y'}{\partial t} \quad (19)$$

در این معادله، N_A شار مولی تبخیر است که از روابط ذکر شده قبلی، مربوط به سینتیک خشک شدن به دست می آید. شرط مرزی و شرط اولیه این معادله به صورت زیر است:

$$\text{at } z = 0 : \quad y' = y'_i$$

$$\text{at } t = 0 : \quad y' = y'_i 0$$

در شرط مرزی قید شده $z = 0$ نشان دهنده ابتدای خشک کن است.

(ت) موازنه انرژی برای ذرات خشک شونده

معادله بقای انرژی مربوط به ذره جامد خشک شونده با لحاظ کردن تمامی عوامل مؤثر در تغییر محتوای انرژی آن به صورت زیر قابل بیان است،

$$h_a a \Delta z (T_a - T_p) - N_A a \Delta z \lambda_0 = A \Delta z (1-\varepsilon) \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (20)$$

این معادله در فرم دیفرانسیلی به صورت زیر نوشته می شود،

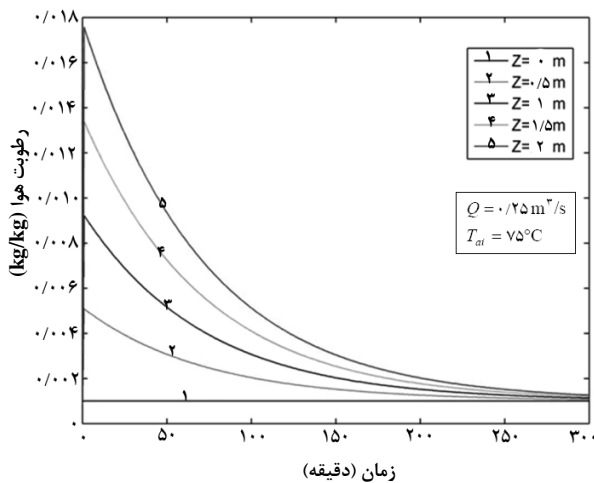
$$h_a a (T_a - T_p) - N_A a \lambda_0 = (1-\varepsilon) \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (21)$$

با جایگذاری معادله (۱۲) در معادله (۲۱) چنین نتیجه می شود:

جدول ۱- مشخصات عملیاتی و ساختاری

مورد استفاده در حل مدل

مقدار	تعریف (پارامتر و واحد)
۰/۲۵	شدت جریان هوا ($Q, m^3/s$)
۸۰۰	شدت انرژی خورشیدی بر واحد سطح ($I_0, W/m^2$)
۳۰	دمای محیط ($T_{am}, ^\circ C$)
۰/۰۰۱	رطوبت ابتدایی هوا (v'_i)
۱۶/۴۷	رطوبت ابتدایی ماده (X_{i0})
۲۰	طول جمع کننده (m)
۲	طول برج جمع کننده (m)
۱	عرض صفحه جذب کننده و شیشه (W, m)
۰/۰۵	ارتفاع جمع کننده (H, m)



شکل ۳- تغییرات رطوبت هوا با گذشت زمان در طول‌های مختلف از برج ثابت بستر

شکل (۴) - (الف) و (ب) نمودار تغییرات دمای هوا در طول برج خشک‌کن ثابت بستر در زمان و مکان‌های مختلف را نشان می‌دهد. دمای هوا در طول برج ثابت بستر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در یک زمان مشخص دمای هوا در پایین برج بیشتر از بالای برج است. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با گذشت زمان اختلاف دمای هوای پایین و بالای برج کاهش می‌یابد و اگر زمان کافی برای خشک‌کردن در اختیار باشد به طوری که رطوبت ماده خشک‌شونده به رطوبت تعادلی متناسب با هوای ورودی کاهش یابد، دمای هوا در طول برج، ثابت خواهد ماند.

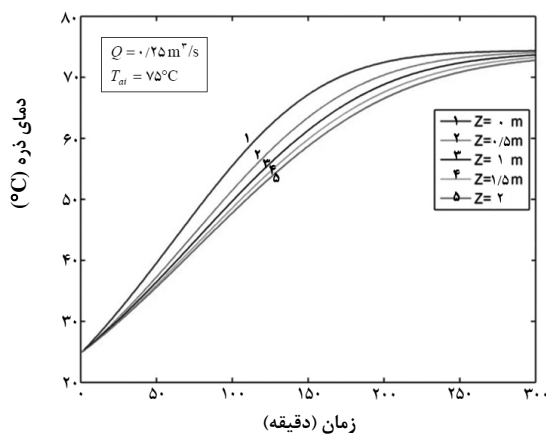
شکل (۵) روند تغییرات دمای ماده خشک‌شونده با گذشت زمان در طول‌های مختلف از برج ثابت بستر را نشان می‌دهد. در یک طول مشخص از برج با گذشت زمان دمای ماده خشک‌شونده زیاد می‌شود. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در زمان‌های نهایی، دمای ماده خشک‌شونده به دمای هوای ورودی نزدیک می‌شود.

شکل (۶) نمودار تغییرات رطوبت ماده خشک‌شونده با گذشت زمان در طول‌های مختلف برج ثابت بستر را نشان می‌دهد. ضریب سرعت خشک‌شدن به صورت تجربی از معادله (۹) به دست می‌آید و چون تنها تابعیت ضعیفی از دمای هوا (T_{air}) دارد [۱۱]، تغییرات ضریب سرعت خشک‌شدن (K) چندان زیاد نمی‌باشد. بنابراین نمودارهای به دست آمده به ازای طول‌های مختلف، بسیار به هم نزدیک هستند. این نمودار نشان می‌دهد که رطوبت ماده خشک‌شونده با گذشت زمان کاهش می‌یابد و سرعت کاهش آن در زمان‌های اولیه بیشتر

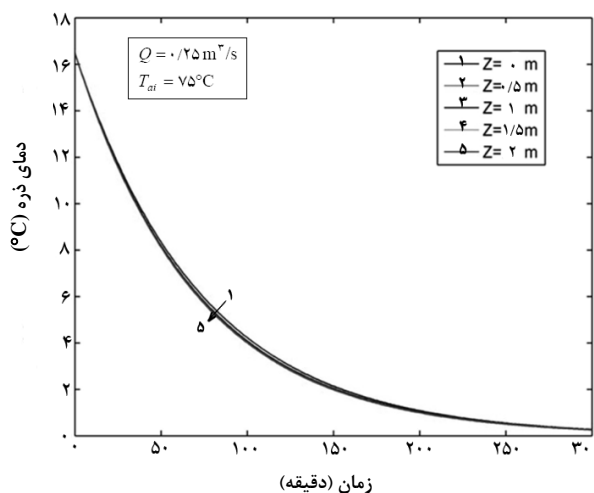
۳-۱ نتایج مدل

شکل (۳) نمودار تغییرات رطوبت هوا با گذشت زمان در طول‌های مختلف از برج ثابت بستر را نشان می‌دهد. در یک طول مشخص از برج با گذشت زمان رطوبت هوا کاهش می‌یابد. در واقع به دلیل اینکه با گذشت زمان رطوبت ماده خشک‌شونده کاهش می‌یابد، سرعت خشک‌شدن کاهش خواهد یافت. بنابراین در یک زمان مشخص، رطوبت کمتری از ماده خشک‌شونده به هوا منتقل شود و در نتیجه رطوبت هوا با گذشت زمان در طول مشخصی، از برج کاهش می‌یابد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در زمان‌های نهایی، رطوبت در تمام برج به مقدار رطوبت هوای ورودی همگرا می‌شود. نکته مهمی که با توجه به شکل (۱) استنباط می‌شود این است که به طور کلی مدت لازم برای کاهش رطوبت محصول در خشک‌کن خورشیدی مورد مطالعه بالا است که این امر احتمالاً ناشی از کم بودن انرژی ورودی به سیستم می‌باشد. این مسئله موجب می‌شود که علی‌رغم رایگان بودن انرژی مصرفی، طولانی بودن عملیات خشک‌کردن در خشک‌کن‌های خورشیدی، کاربرد این نوع خشک‌کن‌ها را محدود سازد.

ملاحظه می‌گردد دمای هوا از 30°C تا نزدیک به 75°C افزایش می‌یابد. این در حالی است که دمای صفحه جمع‌کننده تا 110°C نیز قابل افزایش است. یادآور می‌شود عرض صفحه جمع‌کننده در این نمودار ۱ متر فرض شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، برای افزایش دمایی در حدود 50°C ، جمع‌کننده‌ای به طول ۲۰ m مورد نیاز است. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که تأمین هوای گرم مورد نیاز برای خشک کردن محصولات کشاورزی مستلزم صرف هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالایی باشد.

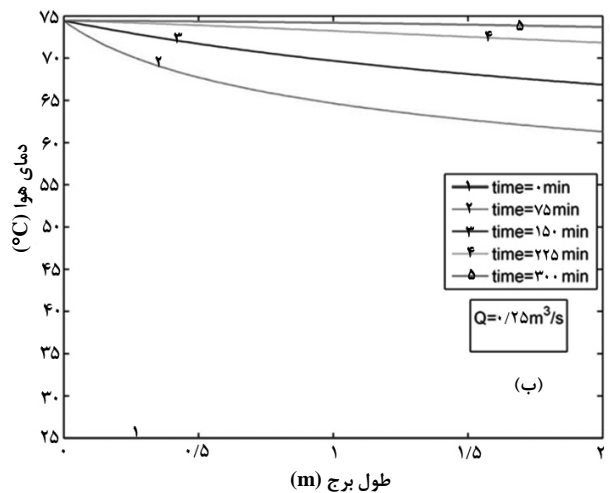
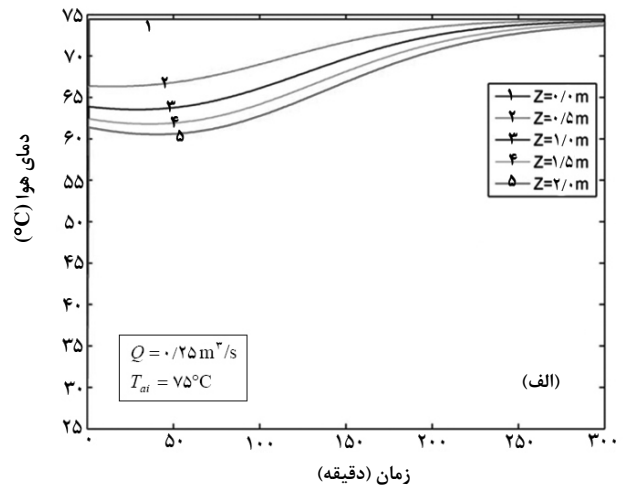


شکل ۵- تغییرات دمای ماده خشک‌شونده با گذشت زمان در طول‌های مختلف برج ثابت بستر



شکل ۶- تغییرات رطوبت ماده خشک‌شونده با گذشت زمان در طول‌های مختلف برج ثابت بستر

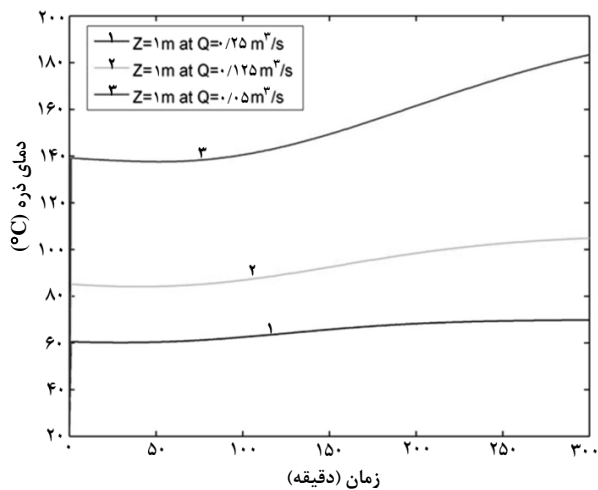
است. در واقع بالا بودن مقدار رطوبت ماده خشک‌شونده در ابتدای فرایند منجر به بالا بودن سرعت تبخیر می‌شود. بنابراین با گذشت زمان سرعت خشک شدن کاهش می‌یابد تا در نهایت دیگر ماده خشک‌شونده رطوبت خود را از دست نمی‌دهد، در این حالت ماده جامد به رطوبت تعادلی رسیده است.



شکل ۴- تغییرات دمای هوا در طول برج ثابت بستر در زمان‌ها و مکان‌های مختلف

در شکل (۷) روند تغییرات دمای هوا در جمع‌کننده خورشیدی همراه با تغییرات دمای صفحه جمع‌کننده پایینی و دمای شیشه محافظ آن در طول گرم‌کن نشان داده شده است. همان‌گونه که

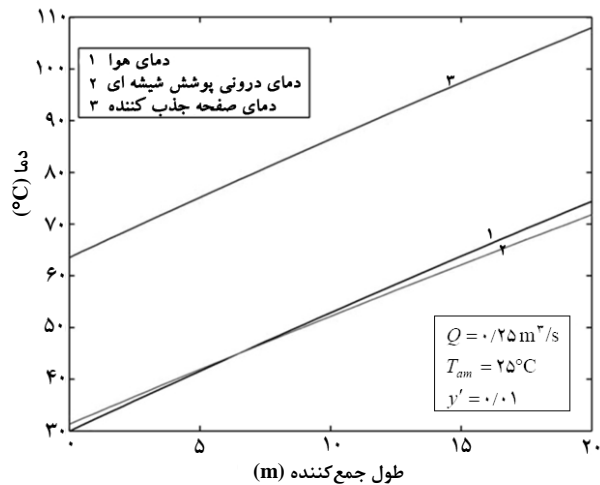
شکل (۹) تأثیر شدت جریان هوای عبوری از خشک‌کن را بر روند تغییرات دمای هوا در درون برج نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با گذشت زمان دمای هوا افزایش می‌یابد. در شدت جریان‌های بالاتر، دمای هوا کمتر خواهد بود. همچنین می‌توان دریافت که در شدت جریان‌های بالاتر، مدت دستیابی به دمای هوای ورودی نیز کمتر خواهد بود. در حقیقت با افزایش شدت جریان هوای ورودی، عملیات خشک‌کردن در مدت کمتری انجام می‌شود.



شکل ۹- تأثیر شدت جریان هوا بر روند تغییرات دمای هوا در یک طول مشخص از برج

شکل (۱۰) تأثیر شدت جریان هوا بر روند تغییرات رطوبت آن در یک نقطه از برج را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، اگر شدت جریان هوا کم باشد، تغییر محسوسی در رطوبت هوا در زمان‌های اولیه مشاهده نمی‌شود. در این شرایط، رطوبت هوا برابر با رطوبت اشباع خواهد بود. با گذشت زمان، تغییرات رطوبت در این نقطه از برج آغاز می‌شود. البته در صورتی که شدت جریان هوای ورودی خیلی کم باشد، هوا در طول برج از رطوبت اشباع می‌شود و در این شرایط انتقال جرم بیشتر بین هوا و ماده خشک‌شونده امکان‌پذیر نخواهد بود.

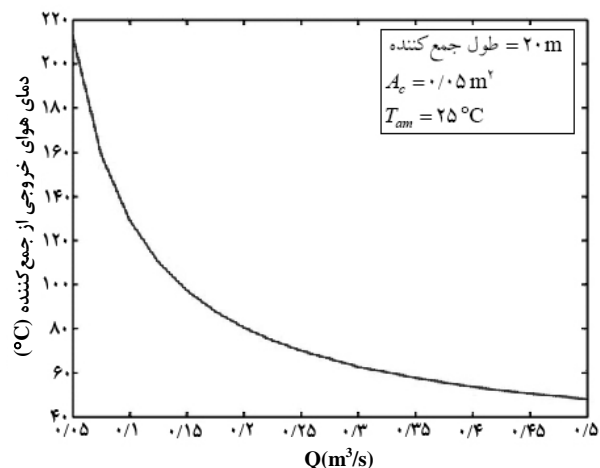
در شکل (۱۱) تأثیر شدت جریان هوا بر روند تغییرات رطوبت مواد خشک‌شونده در یک نقطه از برج نشان داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت با افزایش شدت جریان هوای ورودی به برج (با در نظر گرفتن اثر آن بر دمای ورودی)، زمان رسیدن رطوبت مواد



شکل ۷- تغییرات دماهای صفحه جذب‌کننده، هوا و داخلی پوشش شیشه‌ای در طول جمع‌کننده

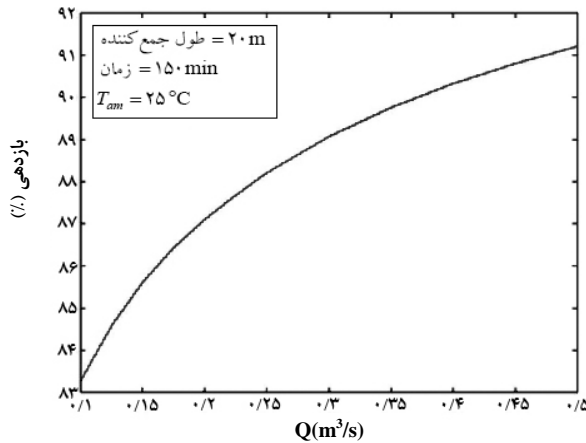
۲-۲ بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی

برای نشان دادن تأثیر شدت جریان هوای ورودی بر عملکرد خشک‌کن ابتدا ضروری است تأثیر تغییر این پارامتر بر دمای هوای خروجی از جمع‌کننده بررسی شود. شکل (۸) نمودار تغییرات دمای هوای خروجی از جمع‌کننده را بر حسب شدت جریان هوای ورودی به آن نشان می‌دهد. با توجه به ثابت بودن سطح مقطع جمع‌کننده، با افزایش شدت جریان، سرعت هوا در جمع‌کننده افزایش و در نتیجه زمان ماند آن کاهش می‌یابد. در نتیجه هوا فرصت کمتری برای تبادل گرما با صفحه جذب‌کننده انرژی دارد و دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد.



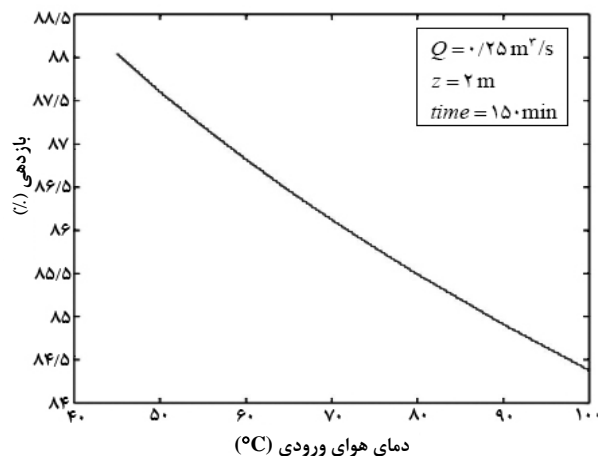
شکل ۸- تأثیر شدت جریان هوا بر دمای هوای خروجی از جمع‌کننده

جرم و از سویی دیگر موجب کاهش نرخ تغییرات رطوبت هوا در طول برج و در نتیجه بالا بودن نیروی محرکه انتقال جرم است.



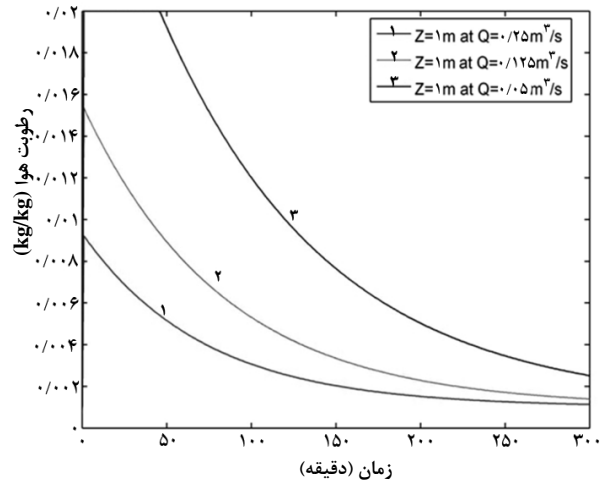
شکل ۱۲- تأثیر شدت جریان هوای ورودی بر روند تغییرات بازدهی خشک کن

شکل (۱۳) روند تغییرات بازدهی خشک کن با دمای هوای ورودی به آن را در یک زمان مشخص و در طول ۲ متری برج ثابت بستر نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش دمای هوای ورودی، بازدهی خشک کن کاهش یافته است. علت را باید در معادله سرعت خشک شدن برای فلفل سبز که از مرجع [۱۱] به دست آمده است، یافت. k_2 که توان دمای هوا در معادله (۹) است در خصوص ماده مورد نظر (فلفل سبز) منفی است. بنابراین ضریب سرعت خشک شدن با افزایش دما کاهش می‌یابد. این مسئله شاید به دلیل چروکیدگی محصولات کشاورزی در اثر خشک شدن در دماهای بالا باشد.

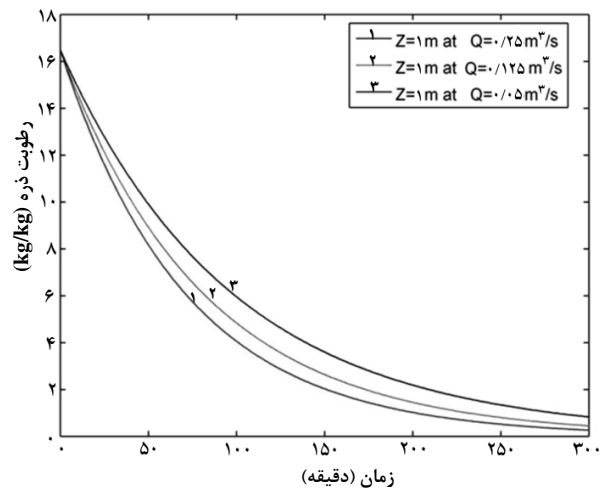


شکل ۱۳- تأثیر دمای هوای ورودی بر روند تغییرات بازدهی خشک کن

خشک شونده به یک مقدار مشخص کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش شدت جریان هوای ورودی عامل مؤثرتری در مقایسه با افزایش دمای هوای ورودی برای کاهش زمان خشک کردن محصول است.



شکل ۱۰- تأثیر شدت جریان هوا بر روند تغییرات رطوبت هوا در یک طول مشخص از برج



شکل ۱۱- تأثیر شدت جریان هوا بر روند تغییرات رطوبت مواد خشک شونده در یک طول مشخص از برج

شکل (۱۲) تأثیر شدت جریان هوای ورودی بر بازدهی نهایی برج خشک کن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در یک زمان مشخص بازدهی خشک کردن با افزایش شدت جریان هوا افزایش می‌یابد. در واقع با زیاد شدن شدت جریان هوا در یک زمان مشخص می‌توان رطوبت بیشتری را از ماده خشک شونده جدا کرد. افزایش شدت جریان هوا از یک سو موجب افزایش ضرایب انتقال گرما و

۴- نتیجه گیری

ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوا در جمع‌کننده

h_2	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوا در جمع‌کننده
$(W/m^2.K)$	خورشیدی
I_0	شدت انرژی ورودی خورشید بر سطح (W/m^2)
K	ثابت سرعت خشک شدن (min^{-1})
k	ضریب انتقال گرمای هدایتی $(W/m.K)$
L	طول جمع‌کننده (m)
M_A	جرم مولکولی آب (kg/mol)
m_s	جرم ذره خشک (kg)
\dot{m}_{ad}	شدت جریان جرمی هوای خشک (kg/s)
\dot{q}	منبع انرژی تعریف‌شده در شیشه (W/m^2)
Rh	رطوبت نسبی هوا (%)
T	دما (K)
T_0	دمای مبنا (K)
t	زمان (s)
U	سرعت هوا (m/s)
W	عرض صفحه جذب‌کننده و شیشه (m)
X	رطوبت ذره $(kg/kg \text{ dry solid})$
X_e	رطوبت تعادلی محصول $(kg/kg \text{ dry solid})$
x	جهت محور مختصات و نشان‌دهنده ضخامت شیشه (m)
y'	رطوبت هوا $(kg/kg \text{ dry air})$
z	جهت محور مختصات و نشان‌دهنده مسیر حرکت هوا
	(m)

حروف یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
τ_c	ضریب عبوردهی شیشه
α	ضریب جذب
η	بازدهی خشک‌کردن
λ_0	گرمای نهان تبخیر در دمای مبنا (J/kg)
δ	ضخامت شیشه (m)
زیروندها	
a	هوا
am	محیط
C	پوشش شیشه‌ای

با استفاده از قوانین بقای جرم و انرژی، یک خشک‌کن خورشیدی با تماس غیرمستقیم، مشتمل بر دو بخش جمع‌کننده و خشک‌کن ثابت بستر مورد مدلسازی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مدل با انتظارات مرتبط با قوانین بقاء و اصول فیزیکی حاکم بر این سیستم‌ها از تطابق خوبی برخوردار است. به طور کلی موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج اصلی این مدلسازی برشمرد:

- با افزایش شدت جریان هوای ورودی، مدت انجام عملیات خشک‌کردن کاهش، و بازدهی خشک‌کردن افزایش می‌یابد.
- در صورتی که شدت جریان هوای ورودی خیلی کم باشد، هوا در طول برج از رطوبت اشباع می‌شود و عملیات خشک‌کردن متوقف می‌گردد.
- برخلاف آنچه انتظار می‌رود، بسته به تابعیت ثابت سرعت خشک شدن ماده بر اثر دما، ممکن است بازدهی خشک‌کردن یک ماده با افزایش دمای هوای ورودی کاهش یابد.
- برای گرم کردن هوای مورد نیاز جهت خشک‌کردن محصولات کشاورزی نیاز به طول قابل ملاحظه جمع‌کننده می‌باشد. این امر موجب بالا رفتن سرمایه‌گذاری اولیه نیز می‌گردد.
- به جهت میزان کم انرژی ورودی به سیستم، در خشک‌کن‌های خورشیدی مدت زیادی برای انجام عملیات خشک‌کردن مورد نیاز است. بنابراین با وجود رایگان بودن انرژی مصرفی، کم بودن بازدهی زمانی، از عواملی است که بهره‌بردن از چنین سیستم‌هایی را با چالش مواجه می‌کند.

۵- علائم اختصاری

A	سطح مقطع برج (m^2)
A_C	سطح مقطع ورودی هوای جمع‌کننده (m^2)
A_p	سطح ذره محصول (m^2)
a	سطح ویژه (m^2/m^3)
C	ظرفیت گرمایی $(J/kg.K)$
d_p	قطر ذره (m)
H	ارتفاع جمع‌کننده (m)
h_a	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوا $(W/m^2.K)$
h_l	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی هوای محیط $(W/m^2.K)$

- [6] Ezekoye, B.A., Enebe, O.M. "Development and performance evaluation of modified integrated passive solar grain dryer", *The Pacific Journal of Science and Technology*, 7(2), 185–190 (2006).
- [7] Eltief, Salah A., Ruslan, M.H., Yatim B. "Drying chamber performance of V-groove forced convective solar dryer", *Desalination*, 209, 151–155 (2007).
- [8] Sevda, M.S., Rathore N.S. "Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryer for drying di-basic calcium phosphate", *CIGR Ejournal*, IX (2007).
- [9] Azad, E. "Design and experimental study of solar agricultural dryer for rural area", *Solar Energy Laboratory, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST)*, 20 (2010).
- [10] El-Sebaï, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Gohary, H.G. "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables", *Energy*, 27(9), 845–859 (2002).
- [11] Krokida M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos_Kouris, D. "Drying kinetics of some vegetables", *Journal of Food Engineering*, 59, 391–403 (2003).
- [12] Holman, J.P. "Heat Transfer", McGraw-Hill, pp. 90–130 (2002).
- [13] Nsofor E.C., Adebisi, G.A "Measurements of the gas-particle convective heat transfer coefficient in a packed bed for high-temperature energy storage", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24, 1–9 (2001).

ورودی *i*

ذره *p*

بخار *v*

صفحه جذب‌کننده *S*

مراجع

- [1] Rahimi, A. Niksiar, A. "Application of Markov Chain analysis and tanks-in-series model in mathematical modeling of impinging stream dryers", *Drying Technology*, 27(1), 30–39 (2009).
- [2] Devahastin, S. Pitaksuriyarat, S. "Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product", *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1705–1713 (2006).
- [3] حاج سقطی، اصغر، "اصول و کاربرد انرژی خورشیدی" مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ویرایش اول، صفحات ۸۰–۲۰ (۱۳۸۰).
- [4] Murthy, M.V.R. "A review of new technologies, models and experimental investigations of solar dryers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 835–844 (2009).
- [5] Ekechukwu, O.V., Norton, B. "Review of solar-energy drying systems II: on overview of solar drying technology", *Energy Conversion & Management*, 40, 615–655 (1999).