



طراحی جدید از خشک‌کن‌های بسترسیال جریان متقاطع

ظاهره ذوقی^۱، شاهرخ شاه‌حسینی^{۲*}، کمال نصرتی^۲

^۱دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

^۲دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۴ اسفند ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۱ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۹ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خشک‌کن جریان متقاطع
خشک‌کن بسترسیال چندطبقه
صرفه‌جویی مصرف انرژی
مدل‌سازی دینامیک
پراکنندگی محوری

چکیده: به علت بازده انرژی پایین خشک‌کن‌های صنعتی، فرآیند خشک‌کردن مصرف انرژی بالایی دارد. بنابراین مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی خشک‌کن‌ها در جهت بهینه‌سازی و طراحی خشک‌کن‌های جدید ضروری است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی خشک‌کن بسترسیال با جریان متقاطع طراحی جدید از این خشک‌کن‌ها ارزیابی قرار گرفته است. یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی دما و رطوبت جامد و همچنین دما و رطوبت گاز خروجی مورداستفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از نتایج تجربی یک واحد نیمه‌صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی مدل حاکی از آن است که مدل با دقت خوبی رفتار سیستم را پیش‌بینی می‌نماید. بنابراین از محیط شبیه‌سازی به وجود آمده برای بررسی یک طرح جدید از خشک‌کن بسترسیال ۳ طبقه استفاده شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با درصد رطوبت جامد ورودی ۰/۳۲ و سایر شرایط مشابه، درصد رطوبت خروجی جامد در حالت تک محفظه ۰/۱۹ و در حالت چند محفظه ۰/۱۳ می‌باشد که حاکی از آن است که این طرح جدید می‌تواند درصد رطوبت جامد را ۵۰٪ بیشتر کاهش دهد که به معنی استفاده بهتر از هوای داغ و از آن طریق کاهش مصرف انرژی می‌باشد.

۱- مقدمه

فرآیند خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین عملیات واحدهای مورداستفاده در فرآوری مواد گوناگون است. اساس کار خشک‌کردن مواد شامل تولید حرارت جهت تبخیر آب و انتقال آب تبخیر شده از داخل خشک‌کن توسط سیال عامل می‌باشد [۱]. خشک‌کردن به روش بسترسیال یکی از مهم‌ترین روش‌های خشک‌کردن است [۲] که برای مواد گوناگون از قبیل تولیدات و محصولات کشاورزی، غذایی، دارویی، شیمیایی و صنعتی مورداستفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین مزایای خشک‌کن‌های بسترسیال می‌توان به سرعت بالای انتقال جرم و حرارت، ناشی از سطح تماس بالا بین ماده جامد و جریان هوای خشک‌کننده، اختلاط کامل مواد درون بستر سیال شده، رطوبت و دمای یکنواخت محصول خشک‌شده، سهولت ورود مواد به درون بستر و خروج آن‌ها از بستر، حمل بادی مواد درون بستر بدون نیاز به تجهیزات مکانیکی و امکان کنترل آسان رطوبت و دمای محصول اشاره کرد [۱ و ۳].

مطالعه و توسعه انواع مختلف خشک‌کن‌های بسترسیال در بسیاری از فرآیندهای صنعتی بر اساس نوع محصول و عملکرد موردنظر، صورت گرفته است. در میان انواع مختلف خشک‌کن‌های بسترسیال، خشک‌کن بسترسیال ناپیوسته، خشک‌کن بسترسیال پیوسته اختلاط کامل و خشک‌کن بسترسیال

پیوسته جریان متقاطع دارای کاربرد صنعتی بیشتری می‌باشند [۱]. از روش ناپیوسته بیشتر برای بررسی هیدرودینامیک بستر از جمله توزیع زمان ماند استفاده می‌شود [۴-۶]. به دلیل نیاز به مواد با رطوبت یکنواخت استفاده از خشک‌کن‌های بسترسیال قالبی پیوسته رشد کرده است. در این خشک‌کن، ورود و خروج ماده به شکل هم‌زمان اتفاق می‌افتد که منجر به محصول خروجی دارای رطوبت یکنواخت می‌شود [۱]. عوامل مؤثر در خشک‌کردن بسترسیال شامل دمای سیال [۷]، ارتفاع مواد در بستر و شرایط جامد ورودی و سرعت هوای ورودی می‌باشد [۸].

گسترده‌تری کاربرد و سختی‌های کار تجربی در ابعاد آزمایشگاهی و صنعتی برای دستیابی به درک درست از این فرآیند، لزوم انجام شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن را توجیه می‌نماید. بیشتر کارهایی که در این زمینه انجام شده است بر پایه تجربی و نیمه تجربی بوده است. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی خشک‌کن بسترسیال استفاده شده است. یکی از ساده‌ترین روش‌ها، مدل تک فازی می‌باشد. در این مدل، بسترسیال به صورت پیوسته و تک جزئی در نظر گرفته می‌شود و معادله‌های تعادلی رطوبت و انرژی در کل بستر ارائه می‌شود [۹]. یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی بسترسیال، مدل‌سازی دوفازی است. در این مدل‌سازی، بسترسیال به صورت ترکیبی از دو فاز حباب و فاز شامل ذرات جامد و گاز لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، معادله‌های تعادلی جرم و انرژی در هر فاز با در نظر گرفتن انتقال

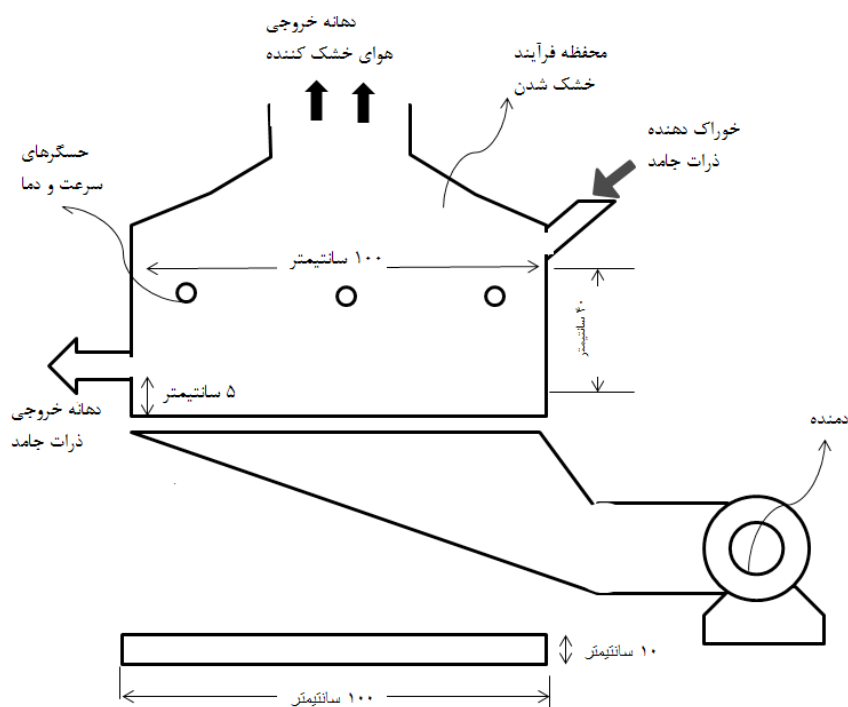


Fig. 1. schematic of setup

شکل ۱: شمای کلی دستگاه

خشک کردن مواد بیشتری را دارد. افزایش ارتفاع بستر جهت استفاده بیشتر از هوای ورودی به دلیل مشکلات هیدرودینامیکی مانند افزایش افت فشار و برهم خوردن یکنواختی محصولات نمی تواند راهکار مناسبی باشد. در این پژوهش با سری قرار دادن محفظه های خشک کن، مدلی همراه با در نظر گرفتن پدیده پراکندگی محوری در جریان غیر ایده آل، ارائه شده است تا بتوان این فرآیند را از دیدگاه اقتصادی و مصرف انرژی بررسی نمود. استفاده بهینه و بیشتر از انرژی هوا به عنوان هدف تعیین شده است که این امر با سری قرار دادن محفظه های خشک کن بررسی شده است که در کارهای قبلی انجام نشده است.

۲- روش شبیه سازی

در این تحقیق خشک کردن ذرات مرطوب برنج توسط هوای داغ در یک خشک کن بستریال پیوسته با جریان متقاطع هوا و جامد در مقیاس نیمه صنعتی شبیه سازی شده است. دستگاه خشک کن شامل یک محفظه مستطیلی به ابعاد $1\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.1\text{m}$ که فضای رهایش و سیال شدن دانه ها است، ورودی خوراک جامد در بالای محفظه، بخش خروج ذرات جامد در سمت دیگر بستر، پمپ هوا و گرم کننده هوا، مسیرهای هدایت جریان هوای گرم در زیر بستر، خروجی هوا در بالای بستر و حسگرهای رطوبت و دمای هوا می باشد. همان طور که شکل ۱ مشخص است دانه های جامد در مسیر افقی و هوا در جهت عمودی حرکت می کنند.

جهت بررسی فرآیند خشک کردن تحت تأثیر پارامترهای مختلف نیاز به تحلیل دقیق انتقال جرم و حرارت در داخل محصول است. از سوی دیگر

جرم و حرارت بین فازها ارائه می شود. [۱۰-۱۲]

به دلیل خطای بالای روش تک فازی و سخت بودن در نظر گرفتن همه فازها، برای مدل سازی بسترهای قالبی پیوسته از روش دوفازی استفاده می شود که برای انطباق بهتر با نتایج تجربی روش های مختلفی اعمال شده است. فیر و همکاران [۱۳] مدل سازی ریاضی خشک کردن بستریالی پیوسته جریان قالبی را مورد مطالعه قرار دادند. به منظور مدل سازی پدیده پراکندگی محوری، خشک کن به صورت ترکیب سری از چند واحد خشک کن اختلاط کامل در نظر گرفته شد. بیکر و همکاران [۸] شبیه سازی خشک کن بستریالی پیوسته جریان متقاطع را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، خشک کن به صورت ترکیب سری از تعداد معینی واحد خشک کن بستریالی اختلاط کامل در نظر گرفته شد و ارتباط واحدها بر اساس تئوری پراکندگی محوری انجام شد.

راملی و همکاران [۱۴] مدل سازی خشک کردن بستریالی پیوسته جریان قالبی شلتوک را مورد بررسی قرار داد. بستر خشک کن در راستای طولی به حجم های دیفرانسیلی تقسیم گردید و معادله های تعادلی رطوبت و انرژی در آن ها ارائه شد.

در کارهای گذشته، بیشترین توجه بر تأثیر پارامترهای کنترلی بر کیفیت مواد خشک شده بوده است [۱۵-۱۷]، ولی اهمیت مصرف انرژی و استفاده بهینه از آن، لزوم توجه به فاز گاز به عنوان فاز تأمین کننده انرژی را نشان داد [۱۸]. فراهم کردن هوای با دمای مناسب نیازمند تأمین انرژی زیادی می باشد، در حالی که مهم ترین عیب بسترهای متقاطع این است که هوای خروجی از بستر هنوز رطوبت نسبی پایین و دمای بالایی دارد و قابلیت

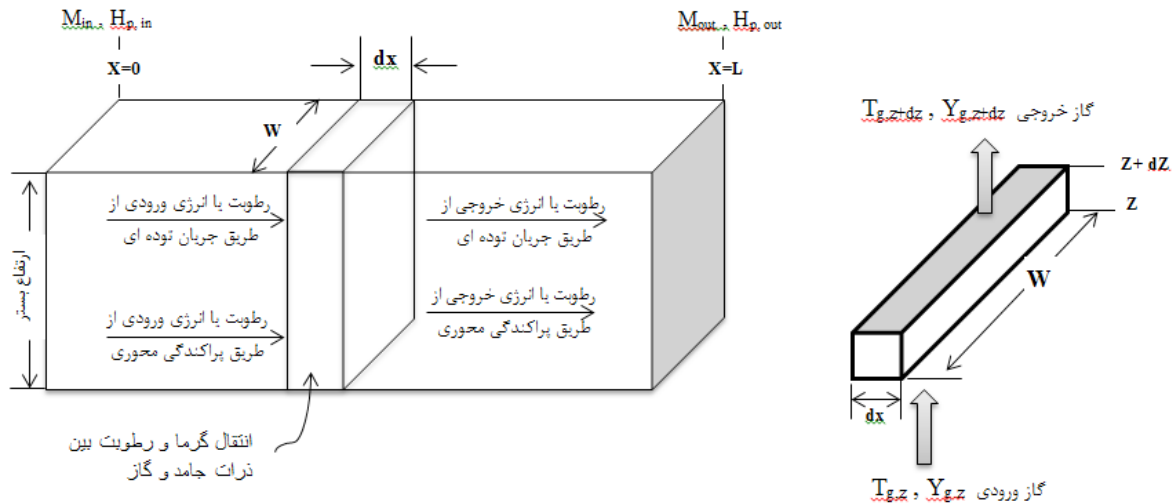


Fig. 2. elementation in System

شکل ۲: المان گیری در سیستم

پدیده پراکندگی محوری نیز حضور دارد که مشابه نفوذ مولکولی در انتقال جرم است. با نوشتن موازنه رطوبت برای جامد و ساده‌سازی معادله آن، معادله موازنه جرم رطوبت ذرات جامد در شرایط پایا به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$D \frac{d^2 M}{dx^2} - u \frac{dM}{dx} - R = 0 \quad (1)$$

که ترم اول آن ناشی از انتقال جرم ناشی از پراکندگی محوری، ترم دوم آن ناشی از جریان توده‌ای و قسمت سوم آن نرخ رطوبت خروجی ناشی از تبخیر می‌باشد. لازم به ذکر است که در این خشک‌کن‌ها حرکت جامدات ناشی از شیب بستر و به دلیل نیروی جاذبه می‌باشد.

با توجه به فرض مدل که جریان هوا به صورت قالبی ایده‌آل است، ورود و خروج رطوبت به حجم کنترل تنها ناشی از حرکت توده‌ای سیال می‌باشد. با نوشتن موازنه رطوبت در جریان هوا و با ساده‌سازی معادله آن در شرایط پایا به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$-U_0 \rho_g \frac{dY}{dz} + R \rho_{bed} = 0 \quad (2)$$

در این معادله، ترم اول ناشی از حرکت توده‌ای سیال و ترم بعدی ناشی از رطوبت تبخیر شده از مواد جامد است و در آن U_0 سرعت گاز می‌باشد. خشک‌کن بسترسیال تحت شرایط عملیاتی حداقل سیالیت عمل می‌کند و ذرات به دلیل شیب بستر و نیروی جاذبه حرکت می‌کنند. لازم به ذکر است که چگالی ذرات خیلی بیشتر از هوا و ارتفاع کلی دستگاه بسیار بلندتر از ارتفاع ذرات موجود در بستر می‌باشد. بنابراین در این شرایط ذرات با هوا از بستر خارج نمی‌شوند و پدیده همراه بری رخ نمی‌دهد. با افزایش زیاد سرعت هوای ورودی (که در برخی منابع کار شده است) به دلیل ارتفاع خیلی بلندتر بستر نسبت به ارتفاع ذرات در بستر امکان خروج ذرات میسر نیست.

مشابه رابطه موازنه جرمی رطوبت ذرات جامد، موازنه انرژی آن نیز

معادلات ضریب انتقال مناسب، برای توسعه گسترده مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق سینتیک فرآیند مورد نیاز است. در این تحقیق یک مدل برای پیش‌بینی تغییرات دما و رطوبت جامد و گاز خروجی با در نظر گرفتن پدیده‌های انتقال در خشک‌کن بسترسیال و حل معادلات حاکم بر آن با توجه به شرط مرزی و اولیه حاصل شده است.

فرضیات مورداستفاده در این مدل‌سازی به شرح زیر است:

- با فرض اختلاط کامل ذرات در راستای عمودی، دما و رطوبت جامد در المان‌های طولی بستر یکنواخت است. چون در اثر به هم خوردگی ذرات جامد در راستای ارتفاع، گرادیان حرارتی و رطوبتی در داخل حجم کنترل طولی در نظر گرفته نمی‌شود.
 - به دلیل ارتفاع کم ذرات و توزیع مناسب گاز در توزیع‌کننده، جریان گاز خشک‌کننده (هوا) درون محفظه به صورت جریان قالبی ایده‌آل در نظر گرفته شده است و از حرکت فاز هوا در راستای طولی صرف‌نظر می‌شود.
 - به دلیل اختلاف دمای نسبتاً کم و حرکت ناشی از جاذبه ویژگی‌های فیزیکی و سیالی ذرات در طول خشک‌کن و توزیع سرعت ذرات جامد در راستای طولی، یکنواخت فرض شده است.
 - از گرادیان دما در داخل ذرات جامد به دلیل کوچک بودن اندازه آن‌ها چشم‌پوشی شده است.
 - از اتلاف حرارتی بدنه محفظه صرف‌نظر شده است.
 - به هم چسبیدگی و شکستن ذرات در طول فرآیند نیز نادیده گرفته شده است.
- برای نوشتن معادلات انتقال، هر یک از ابعاد محفظه به المان‌های کوچک مطابق شکل ۲ تقسیم شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بر سیستم

برای توسعه موازنه جرم در ذرات، علاوه بر انتقال به وسیله جریان توده،

$$M_{in} = M_{=0} - \frac{D}{u} \left(\frac{dM}{dx} \right)_{=0} \quad (7)$$

شرط مرزی موازنه انرژی ذرات جامد در ابتدای خشک کن نیز به طور مشابه از برابری دبی جرمی رطوبت قبل و بعد نقطه $x=0$ به دست می‌آید؛ که با جایگذاری نرخ انتقال انرژی و ساده‌سازی رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$H_{p,in} = H_{px=0} - \frac{D}{u} \left(\frac{dH_p}{dx} \right)_{x=0} \quad (8)$$

در خروجی خشک کن، جریان ذرات جامد پیوسته است یعنی ذرات خروجی بخشی از ذرات انتهایی بستر هستند؛ بنابراین در سرریز خروجی هیچ‌گونه تغییر آنتالپی و رطوبت مواد وجود ندارد؛ شرایط مرزی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{dM}{dx} \right)_{x=L} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{dH_p}{dx} \right)_{x=L} = 0 \quad (10)$$

شرایط مرزی موازنه رطوبت و انرژی در جریان هوا با در نظر گرفتن جریان قالبی هوا درون بستر که بیان‌کننده برابری رطوبت مطلق و آنتالپی جریان هوا در نقطه ورود هوا به بستر ($z=0$) به دست می‌آید که به شرح زیر است:

$$Y_{z=0} = Y_{in} \quad (11)$$

$$T_{gz=0} = T_{g,in} \quad (12)$$

مدل ارائه‌شده برای سرعت تبخیر رطوبت بر اساس دو فرض زیر می‌باشد:

۱. در طول دوره نرخ ثابت مقاومت انتقال جرم در فاز گاز و نزدیک به سطح خارجی ذرات جامد می‌باشد،
 ۲. در دوره نرخ نزولی محتوای رطوبت یکنواخت نیست.
- با استفاده از این دو فرض و قانون فیک می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$R \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_i} \right) = a \left(C_{sat} - \frac{P}{R_g T} \frac{Y}{M_w} + \frac{1}{M_a} \right) \quad (13)$$

۲-۲- خشک‌کن‌های بسترسیال متوالی

همان‌طور که در انتهای بخش مقدمه گفته‌شده برای جلوگیری از اتلاف هوای گرم شده چیده‌مانی مطابق شکل ۳ از سه بستر متوالی استفاده شده است که در آن هوای خروجی از بسترهای سوم و دوم به ترتیب به عنوان

ناشی از انتقال انرژی توسط جریان توده‌ای و پراکندگی محوری در ورودی و خروجی حجم کنترل و انتقال توسط جریان همرفتی می‌باشد. با ساده‌سازی معادله رابطه موازنه انرژی در ذرات جامد، موازنه آن شرایط پایا به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$D \frac{d^2 H_p}{dx^2} - u \frac{dH_p}{dx} + \frac{a\alpha(T_{g,in} - T_p)}{\rho_{bed}} - R \left(C_w (T_p - T_{ref}) + h_v + C_v (T_{g,in} - T_p) \right) = 0 \quad (3)$$

در رابطه بالا آنتالپی ذرات جامد برابر با مجموع آنتالپی ذرات جامد خشک و آنتالپی رطوبت درون آن در نظر گرفته شده است.

$$H_p = (C_p + C_w M) (T_p - T_{ref}) \quad (4)$$

که ترم‌های معادله (۳) به ترتیب ناشی از پراکندگی محوری، جریان توده‌ای، جریان همرفتی و تبخیر رطوبت است. انرژی خروجی از حجم کنترل ناشی از تبخیر رطوبت، خود شامل آنتالپی خروجی توسط خروج رطوبت مایع از سیستم و انرژی موردنیاز برای تبخیر رطوبت می‌باشد. این انرژی تبخیر شامل مجموع انرژی جهت تبخیر در دمای ماده جامد و انرژی برای رسیدن به درجه حرارت هوای خشک‌کننده می‌باشد.

رابطه تعادلی انرژی در جریان هوا برحسب آنتالپی با در نظر گرفتن جریان پیستونی هوا در حجم کنترل محاسبه شده است. با ساده‌سازی معادله موازنه انرژی در جریان هوا در شرایط پایا به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$-U_0 \rho_g \frac{dH_g}{dz} - a\alpha(T_{g,in} - T_p) + R \rho_{bed} \left(C_w (T_p - T_{ref}) + h_v + C_v (T_g - T_p) \right) = 0 \quad (5)$$

که آن ترم‌ها به ترتیب ناشی از جریان توده‌ای، انتقال حرارت همرفتی و تبخیر رطوبت ذرات جامد است. آنتالپی هوای مرطوب برابر آنتالپی هوای خشک و آنتالپی رطوبت موجود در آن مطابق با رابطه زیر فرض شده است.

$$H_g = (C_g + C_v Y) (T_g - T_{ref}) + Y h_{v_0} \quad (6)$$

مواد جامد در هنگام ورود به بستر هیچ‌گونه اختلاطی با هم ندارند و جریان به شکل قالبی ایده‌آل وارد بستر می‌شود؛ در طول بستر در اثر تغییرات سرعت و فشار، پراکندگی محوری به وجود می‌آید و پس از مخلوط شدن با یکدیگر در طول بستر، به صورت جریان قالبی ایده‌آل از بستر خارج می‌شود؛ بنابراین شرط مرزی مربوط به رطوبت و آنتالپی ذرات جامد به صورت شرط مرزی بسته می‌باشد. شرط مرزی موازنه رطوبت ذرات جامد در ورودی خشک‌کن حاکی از برابری دبی جرمی رطوبت قبل و بعد نقطه $x=0$ دارد؛ که با جایگذاری رابطه دبی جرمی، رابطه زیر به عنوان شرط مرزی حاصل می‌شود.

$x=0$ مشتق وجود ندارد، ابتدا آن حدس زده می‌شود و سپس با حل معادلات با روش تکرار، مقدارش دوباره به دست می‌آید و جایگزین حدس می‌شود. این کار تا قابل اغماض شدن اختلاف این دو، ادامه می‌یابد. با حل معادلات رطوبت (M) به دست آوردن معادله انرژی جامد و سپس معادلات مربوط به فاز هوا میسر می‌گردد. برای حل معادلات جبری از نرم‌افزار متلب استفاده شد که فلوجارت کلی الگوریتم حل در شکل ۴ آورده شده است. معادلات سینی‌ها در شرایط مرزی وابسته به هم هستند (مانند برج تقطیر) و تمام معادلات حالت تک سینی برای همه سینی‌ها حل می‌شود و الگوریتم حل معادلات در این روش مشابه الگوریتم‌های رایج در حل برج تقطیر می‌باشد.

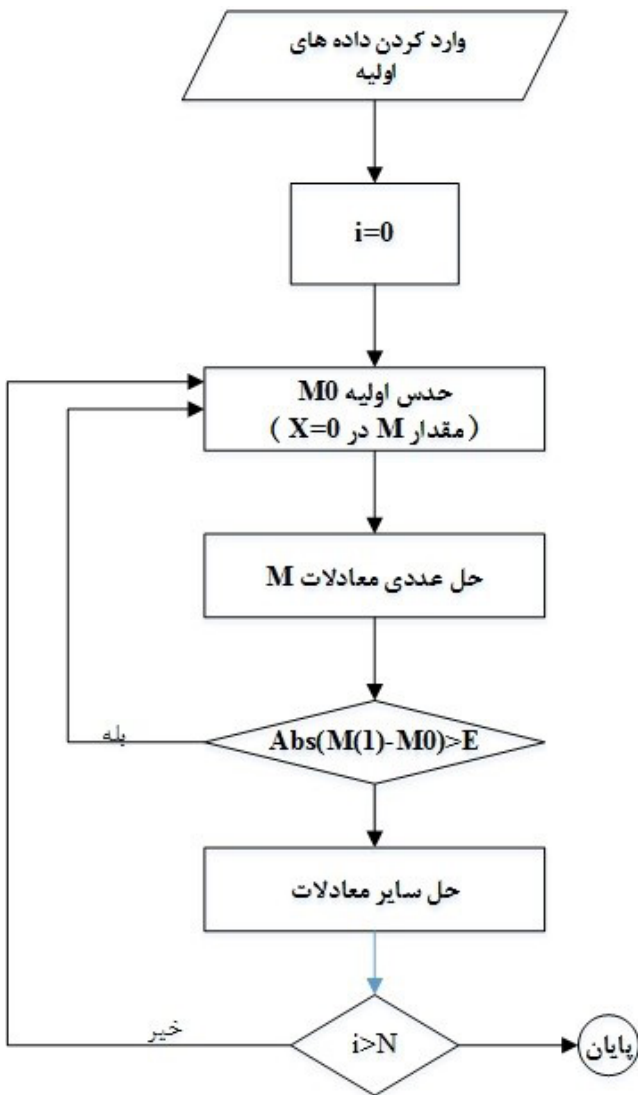


Fig. 4. the algorithm of solving equations

شکل ۴: فلوجارت حل معادلات

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خشک‌کن بسترسیال تک محفظه

برای اطمینان از اعتبار مدل فرآیند ابتدا با استفاده از داده‌هایی که از

هوای ورودی بسترهای دوم و اول استفاده می‌شود. ذرات جامد از ورودی بالاترین بستر (سینی اول) وارد می‌شود. پس از طی سینی یکم وارد سینی دوم می‌شود. در این وضعیت، به دلایل اینکه هر سینی افت فشاری را ایجاد می‌کند و اینکه رطوبت نسبی هوای ورودی از پایین، بعد از طی چند سینی زیاد می‌شود، نمی‌توان تعداد سینی‌ها را خیلی افزایش داد؛ بنابراین فرض شده که تعداد سینی‌ها ۳ عدد باشد. البته اینکه تعداد آن‌ها بیشتر یا کمتر باشد می‌تواند در غالب یک موضوع تحقیقاتی دیگر مطرح شود و با توجه به مسائل فنی و اقتصادی طراحی شود. هرچند در تحقیق هدف فقط نشان دادن امکان استفاده از این نوع چیدمان به جای استفاده از فقط یک بستر و شبیه‌سازی آن بوده است.

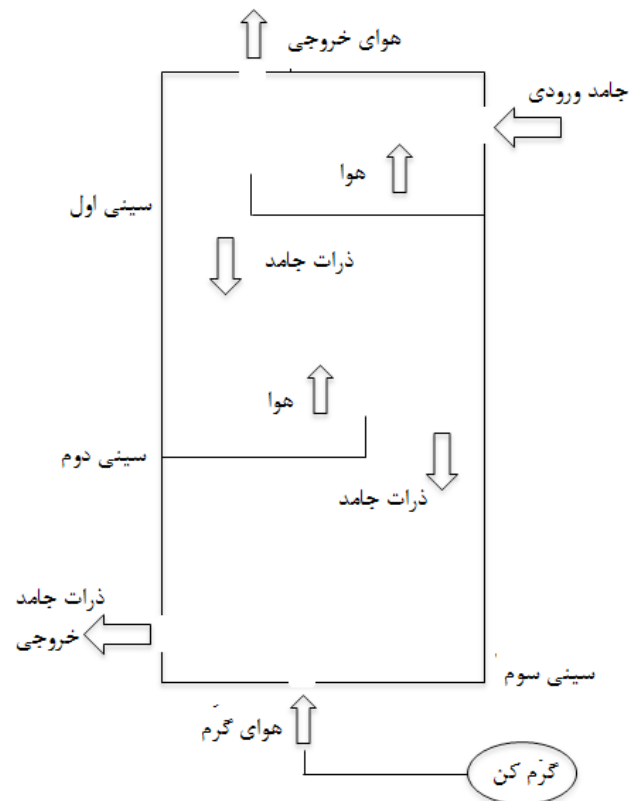


Fig. 3. schematic of new design of three story

شکل ۳: شماتیک کلی بستر سری

۳-۲- روش حل

معادله‌های یک خشک‌کن بسترسیال در حالت پایا از چهار معادله دیفرانسیل تشکیل شده است. معادله‌های دیفرانسیل (۱) و (۳) از نوع معادله‌های دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم غیرخطی می‌باشند و با توجه به معلوم بودن شرایط مرزی در آن‌ها، از نوع مسائل شرط مرزی محسوب می‌شوند. با توجه به پایا بودن همه معادلات، برای حل عددی از روش تفاضل محدود صریح استفاده شده است. برای حل با روش صریح چون در

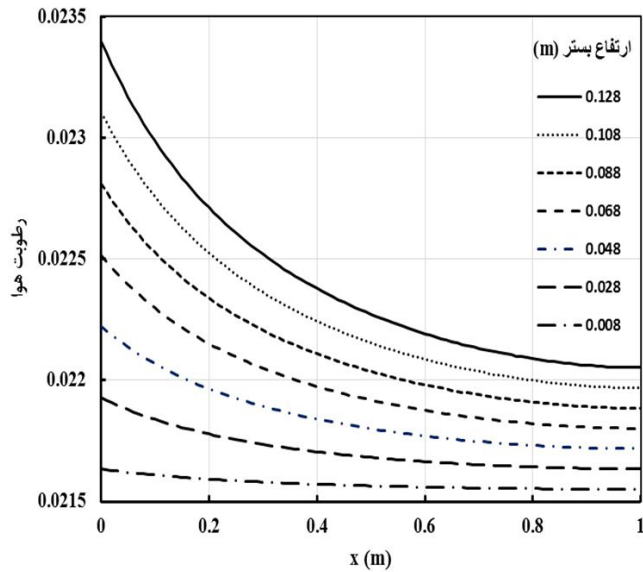


Fig. 6. Change of air moisture in bed- Each line is related to a height of the bed.

شکل ۶: تغییرات رطوبت هوا در بستر- هر خط مربوط به یک ارتفاع از بستر می‌باشد.

ذرات جامد با دریافت گرما از هوای داغ ورودی، رطوبت خود را از دست می‌دهند. این مرحله با دمای ثابت در دوره خشک شدن ثابت رخ می‌دهد؛ با ورود این فرآیند به دوره نزولی، خارج شدن رطوبت داخلی با افزایش دمای جامد همراه خواهد بود؛ بنابراین متناسب با تغییرات دمای هوا به علت جریان برگشتی، دمای ذرات جامد در طول بستر نیز در ابتدا افزایش می‌یابد همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود پس از مدت کوتاهی به دلیل اختلاط زیاد درون بستر دمای جامد تقریباً با دمای هوا برابر خواهد شد و به یک حالت پایا می‌رسد. یکی دیگر از پارامتر مورد بررسی در خشک‌کن، دمای هوای ورودی به خشک‌کن است که به سرعت و رطوبت اولیه خوراک بستگی دارد. از نتایج موجود در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص می‌گردد که دمای هوا در طول بستر تغییرات چندانی ندارد و می‌توان دمای هوا را در بستر را یکنواخت فرض نمود و این فرض برای حالت سری شده لحاظ گردیده است.

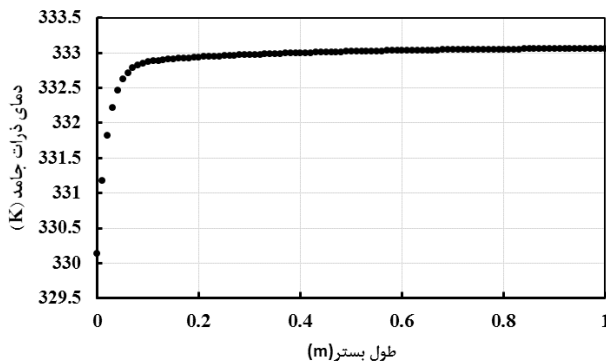


Fig. 7. change of Solid temperature in length of bed

شکل ۷: تغییرات دمای جامد در طول بستر

مقاله مدل‌سازی و بررسی خشک‌کن بسترسیال جریان قالبی تحت شرایط پایا [۲۰] به‌دست‌آمده نتایج مدل برای یک خشک‌کن تک سینی مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است. شرایط اولیه و ورودی فازها به بستر در جدول ۱ اشاره شده است. با حل معادلات حاکم بر مسئله، خروجی فازها به‌صورت جدول ۲ می‌شود.

جدول ۱: داده‌های ورودی

Table 1. Input data

رطوبت اولیه جامد	رطوبت اولیه هوا	دمای جامد	دمای هوا
۰/۳۲	۰/۰۲۱۵	۳۰۱/۱۶	۳۳۳/۱۶

جدول ۲: داده‌های خروجی

Table 2. Output data

رطوبت جامد خروجی	رطوبت هوای خروجی	دمای جامد خروجی	دمای هوای خروجی
۰/۱۸۸۶	۰/۰۲۳۰	۳۳۲/۹۰	۳۳۲/۹۰

با رسم نمودار رطوبت جامد در طول بستر (شکل ۵) مشاهده می‌شود رطوبت جامد در ابتدا افت زیادی می‌کند که ناشی از ارتباط با هوا هنگام ریزش است و با رطوبت قبلی اختلاطی ندارد که این امر در شرط مرزی نیز قابل مشاهده است. به‌عبارت‌دیگر ذرات جامد پس از تماس با هوا، ابتدا رطوبت سطحی خود را از دست می‌دهند سپس با کاهش رطوبت و تبخیر کامل رطوبت سطحی، رطوبت داخلی باقیمانده در جامد، تبخیر خواهد شد و با عبور در طول بستر شیب منحنی کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان پدیده نفوذ که به‌کندی صورت می‌گیرد، دانست.

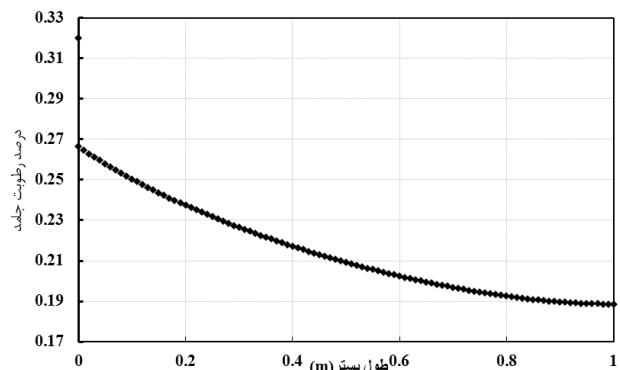


Fig. 5. change of Solid moisture in bed

شکل ۵: تغییرات رطوبت جامد در بستر

اگر تغییرات رطوبت هوا در طول بستر رسم شود، شکل ۶ حاصل می‌گردد. با توجه به آنچه از شکل یافت می‌شود می‌توان گفت با افزایش ارتفاع رطوبت هوا افزایش می‌یابد که به دلیل انتقال رطوبت جامد می‌باشد و در طول بستر هم به دلیل آنکه رطوبت جامد در ابتدای بستر بیشتر می‌باشد و انتقال بیشتری به هوا صورت می‌گیرد، دارای سیر نزولی می‌باشد.

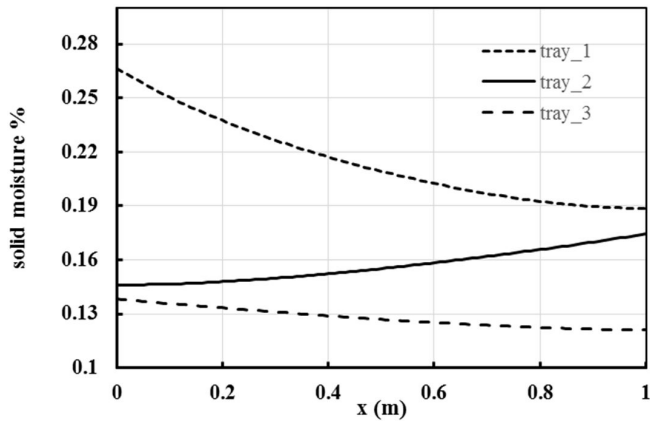


Fig. 9.

شکل ۹: تغییرات رطوبت جامد در بستر سینی‌ها

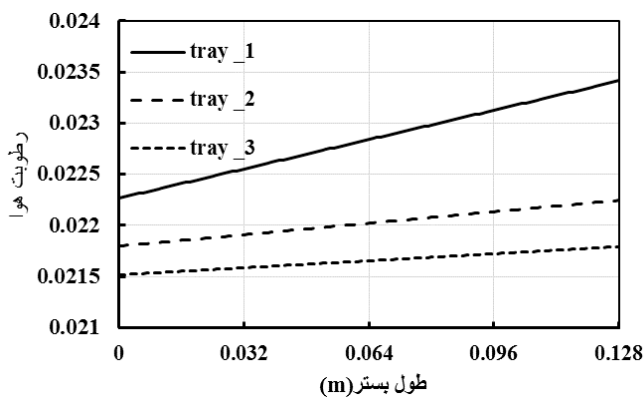


Fig. 10.

شکل ۱۰: تغییرات رطوبت هوا در بستر سینی‌ها

که انتظار می‌رود در سینی‌های پایینی تغییرات رطوبت جامد کاهش می‌یابد پس می‌توان نتیجه گرفت که لزوماً افزایش تعداد زیاد سینی‌ها منطقی به نظر نمی‌رسد. بر طبق پیش‌بینی‌های صورت گرفته در سینی اول به دلیل اینکه جامد دارای بیشترین میزان رطوبت بود انتقال جرم بیشتری صورت گرفته است و مطابق با شکل ۱۰ میزان افزایش رطوبت هوا در سینی‌های ابتدایی از سینی‌های پایینی بیشتر است. با توجه به اینکه دمای هوا در طول فرآیند تغییر چندانی نمی‌کند. هوای مورد استفاده برای خشک کردن در حالت سری بازده بیشتری نسبت به خشک شدن در حالت تک محفظه دارد که از دلایل آن می‌توان به استفاده کامل‌تر از میزان گرمای هوای ورودی اشاره نمود. به بیان دیگر در خشک‌کن تک محفظه هوای خروجی با جذب درصد کمی از رطوبت از خشک‌کن خارج می‌شود؛ اما در حالت سری هوای خروجی از محفظه اول هنوز ظرفیت جذب رطوبت را دارد که وارد مرحله بالاتر شده و ذرات جامد بیشتری در تماس با آن رطوبت خود را از دست می‌دهند. برای بررسی میزان اثربخشی طراحی جدید خشک‌کن پارامتر زیر تعریف می‌شود:

$$F = \frac{(M_{in} - M_{out})_{series} - (M_{in} - M_{out})_{single}}{(M_{in} - M_{out})_{single}} \quad (14)$$

۳-۲- اعتبارسنجی

در شکل ۸ و جدول ۳ مقایسه نتایج حاصل در این پروژه با داده‌های تجربی به دست آمده در مقاله خانعلی و همکاران [۲۰] انجام شده است که نشان دهنده سازگاری مناسب میان مدل سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که هندسه مورد بررسی، خواص فیزیکی ذرات و هوا، کلیه شرایط اولیه (دما، غلظت اولیه و ...) مشابه آن در مرجع در نظر گرفته شده است.

مقدار خطای مدل در ابتدای بستر که به دلیل تفاوت در مکانیسم انتقال رطوبت در ریزش از ناودان با طول بستر در حدود ۴٪ است. مقدار دقیق در خطا در نقاط مختلف در جدول ۳ گزارش شده است.

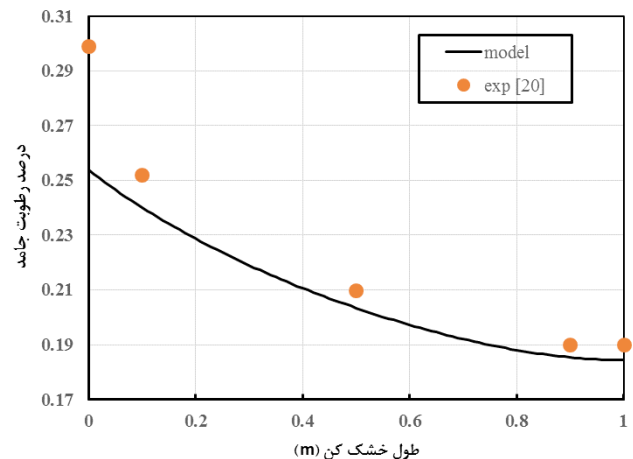


Fig. 8. comparing between result of the model and experimental data [19]

شکل ۸: مقایسه نتایج مدل حاضر با نتایج تجربی [۲۰]

جدول ۳: مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی [۲۰]

Table 3. comparing between result of the model and experimental data [19]

مکان اندازه‌گیری	نتایج تجربی [۲۰]	مدل حاضر	err= exp - model /exp
۰	۰/۲۹۹	۰/۲۹۹	۰
۰/۱	۰/۲۵۲	۰/۲۴	۴/۷۶۲
۰/۵	۰/۲۱	۰/۲	۴/۷۶۲
۰/۹	۰/۱۹	۰/۱۸۵	۲/۶۳۲
۱	۰/۱۹	۰/۱۸۴	۳/۱۵۸

۳-۳- فرآیند خشک کردن با محفظه‌های سری

در این مدل سازی به منظور بررسی خشک‌کن‌های سری از سه سینی قرار گرفته در یک محفظه استفاده شده است. در سری نمودن با افزایش تعداد سینی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که جریان هوا می‌تواند به خوبی در برج سینی‌دار عمل کند که نتایج مربوط به آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. شکل ۹ تغییرات رطوبت جامد در طول بستر را نشان می‌دهد، همان‌طور

علامت یونانی	
α	ضریب انتقال حرارت (W/m^2k)
ρ	چگالی (kg/m^3)
اندیس	
b	حباب
bed	بستر
g	گاز
in	ورودی
out	خروجی
p	ذرات
ref - 0	مرجع
s - L	جامد
V	بخار آب
W	آب

منابع

- [1] A.S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*, Crc Press, 2014.
- [2] H. Darvishi, M.H. Khoshtaghaza, S. Minaei, Effects of fluidized bed drying on the quality of soybean kernels, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2) (2015) 134-139.
- [3] W.R.W. Daud, Fluidized bed dryers—Recent advances, *Advanced Powder Technology*, 19(5) (2008) 403-418.
- [4] A. Wanjari, B. Thorat, C. Baker, A. Mujumdar, Design and modeling of plug flow fluid bed dryers, *Drying technology*, 24(2) (2006) 147-157.
- [5] F. Brod, K. Park, R. De Almeida, Image analysis to obtain the vibration amplitude and the residence time distribution of a vibro-fluidized dryer, *Food and bioproducts processing*, 82(2) (2004) 157-163.
- [6] S. Satija, I. Zucker, Hydrodynamics of vibro-fluidized beds, *Drying Technology*, 4(1) (1986) 19-43.
- [7] C. Baker, Predicting the energy consumption of continuous well-mixed fluidized bed dryers from drying kinetic data, *Drying Technology*, 17(7-8) (1999) 1533-1555.
- [8] C. Baker, The design and performance of continuous well-mixed fluidized bed dryers-an analytical approach, *Drying Technology*, 18(10) (2000) 2327-2349.
- [9] S. Syahrul, I. Dincer, F. Hamdullahpur, Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles, *International Journal of Thermal Sciences*, 42(7) (2003)

که این مقدار این پارامتر برای سه سینی برابر $0/54$ و برای دو سینی $0/15$ می‌باشد و افزودن سینی بیشتر با شرایط این مسئله تأثیر زیادی بر روی F ندارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور استفاده بهینه از هوای به کاررفته در فرآیند خشک کردن ذرات جامد خشک کن جدیدی به صورت بسترهای سیال متقاطع و چندطبقه پیشنهاد شده است. بررسی و تحلیل رفتار این خشک کن جدید در محیط شبیه سازی استفاده شد؛ بنابراین ابتدا از یک مدل ریاضی خشک کن بسترسیال یک طبقه برای شبیه سازی استفاده شد. سپس پیش بینی های مدل توسط نتایج تجربی یک خشک کن بسترسیال یک طبقه در مقیاس نیمه صنعتی ارزیابی شد. با توجه به آنکه خطای پیش بینی مدل در حد کمتر از ۵ درصد بود قابلیت خوب مدل در شبیه سازی این فرایند مشخص گردید؛ بنابراین در نهایت رفتار خشک کن بسترسیال سه طبقه در محیط شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این شبیه سازی نشان می‌دهد که در شرایط مشابه ورودی (دما و رطوبت یکسان برای فاز هوا و جامد) با درصد رطوبت جامد ورودی $0/32$ ، درصد رطوبت خروجی جامد در حالت تک محفظه $0/19$ و در حالت چند محفظه $0/13$ می‌باشد که حاکی از آن است که این طرح جدید می‌تواند درصد رطوبت جامد را 50% بیشتر کاهش دهد که منجر به استفاده بهتر از هوای داغ شده و از آن طریق در مصرف انرژی صرفه جوی می‌گردد.

فهرست علائم

a	سطح ویژه توسعه یافته (m^2/m^3)
C	گرمای ویژه ($J/kg.K$)
D	ضریب نفوذ (m^2/s)
h_v	گرمای تبخیر (J/kg)
H	آنتالپی (J/kg)
L	طول بستر (m)
M	رطوبت جامد ($kg_{H_2O} / kg_{Drysolid}$)
R	نرخ خشک شدن ($kg_{H_2O} / kg_{Drysolid.s}$)
T, θ	دما ($K, ^\circ C$)
u	سرعت جریان جامد محوری (m/s)
U	سرعت گاز (g/cm^3)
w	عرض بستر (m)
x	مختصات طول بستر (m)
Y	رطوبت گاز (kg گاز خشک / kg آب)
z, l_{mf}	مختصات ارتفاع بستر (m)

- Technology*, 25(7-8) (2007) 1229-1235.
- [15] B. Abbasi Souraki, Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer during Convective Dehydration of an Anisotropic Cylindrical Foodstuff, *Heat Transfer—Asian Research*, 44(3) (2015) 257-271.
- [16] S. Suherman, S. Priyanto, Drying of Soybean Seeds in Fluidized Bed: Experimental and Scale-up Simulation in Continuous Operation Mode, *Advance Journal of Food Science and Technology*, 6(3) (2014) 403-407.
- [17] N. Parlak, Fluidized bed drying characteristics and modeling of ginger (*zingiber officinale*) slices, *Heat and Mass Transfer*, 51(8) (2015) 1085-1095.
- [18] M.K. Moraveji, R. Davarnejad, M. Farjami, Investigation of some effective parameters on the fluidized bed grain dryers, *Iranica Journal of Energy and Environment*, 4(4) (2013) 391-397.
- [19] M. Khanali, S. Rafiee, A. Jafari, S.H. Hashemabadi, Experimental investigation and modeling of plug-flow fluidized bed drying under steady-state conditions, *Drying Technology*, 31(4) (2013) 414-432.
- 691-701.
- [10] R.A. Chayjan, K. Salari, Q. Abedi, A.A. Sabziparvar, Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying, *Journal of food science and technology*, 50(4) (2013) 667-677.
- [11] V. Abdolkarimi, Hydrodynamics Modeling of Particulates Coating in a Fluidized Bed, *Petroleum & Coal*, 56(2) (2014) 165-174.
- [12] M. Assari, H.B. Tabrizi, M. Saffar-Avval, Numerical simulation of fluid bed drying based on two-fluid model and experimental validation, *Applied thermal engineering*, 27(2) (2007) 422-429.
- [13] C. Fyhr, I.C. Kemp, Mathematical modelling of batch and continuous well-mixed fluidised bed dryers, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 38(1) (1999) 11-18.
- [14] W. Ramli, W. Daud, A cross-flow model for continuous plug flow fluidized-bed cross-flow dryers, *Drying*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

T. Zoghi, S. Shahhosseini, K. Nosrati, New Design of Cross-flow Fluidized Bed Dryers, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6)

(2018) 1351-1360.

DOI: 10.22060/mej.2017.12564.5367



