

شبیه‌سازی فرایند انتقال حرارت و رطوبت برای خشک کردن ذرات در بستر

شناور با استفاده از مدل دوسیالی

محمدرضا عساری (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

حسن بصیرت تبریزی (دانشیار)

مجید صفار اول (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

یکی از روش‌های مؤثر در فرایند خشک کردن ذرات، شناورسازی آنها در جریانی از هوای گرم است. در این نوشتار، برای تحلیل فرایند خشک شدن ذرات، از الگوی دو سیالی استفاده شده است. با استفاده از این الگو می‌توان دما و رطوبت گاز و ذرات را در طول فرایند خشک شدن محاسبه کرد، و اثر عواملی همچون دمای گاز ورودی و قطر ذرات را بر این فرایند مورد مطالعه و بررسی قرار داد. به منظور بررسی تجربی این فرایند، دستگاه آزمایشگاهی خشک‌کن بستر شناور طراحی و ساخته شده است، و با استفاده از آن آزمایشاتی جهت مقایسه‌ی نتایج نظری و تجربی انجام شده که نشان‌دهنده‌ی هماهنگی مناسب بین نتایج الگوی ریاضی و تجربی است.

مقدمه

افراد بسیاری پدیده‌ی خشک کردن ذرات در بستر شناور را بررسی کرده‌اند، که در این زمینه می‌توان به فعالیت‌های پالانز^[۳] و نیز لی و یامین چن^[۴] اشاره کرد. این افراد خشک کردن ذرات را در حالت پیوسته و با استفاده از مدل دوفازی مورد بررسی قرار داده‌اند. کاندرا^[۵] براساس اطلاعات تجربی، برای تعیین نرخ خشک شدن در هر دو حالت پیوسته و غیر پیوسته مدلی برای مواد مشخص ارائه داد. در سال‌های اخیر با استفاده از الگوی دو سیالی^[۶] برای خشک کردن مواد دانه‌ی در حالت دو بعدی الگویی نیز ارائه شده است.

خشک کردن از جمله پدیده‌هایی است که در بسیاری از فرایندهای تولیدی خصوصاً در صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی و کشاورزی از اهمیت خاصی برخوردار است. تاکنون از روش‌ها و سازوکارهای مختلفی برای خشک کردن مواد استفاده شده است که هر کدام ویژگی‌های خاصی دارند. یکی از جدیدترین و کارآمدترین روش‌های خشک کردن مواد دانه‌ی، که امروزه به عنوان مؤثرترین روش معرفی شده است، خشک کردن با استفاده از شناورسازی ذرات در جریانی از هوای گرم است. روش شناورسازی از سال ۱۹۴۵ میلادی به عنوان یکی از شیوه‌های مؤثر در فرایندهایی که افزایش سطح در آنها، نقش مؤثری ایفا می‌کند، مطرح شده، و از سال ۱۹۷۵ این روش برای خشک کردن مواد دانه‌ی مورد توجه و استفاده قرار گرفته است.^[۷]

الگوی ریاضی

با توجه به مدل دو سیالی معادلات بقاء جرم، گشتاور و انرژی برای هر دو فاز گاز و ذرات جامد به صورت جداگانه نوشته می‌شوند. ولی از آنجا که رژیم جریان حداقل شناوری فرض شده، لذا معادلات بقاء گشتاور حذف شده و معادلات بقاء جرم و انرژی برای هر دو فاز در مختصات استوانه‌ی نوشته می‌شوند. این معادلات به دلیل انتقال حرارت و جرمی که بین هر دو فاز اتفاق می‌افتد به یکدیگر مرتبط و وابسته‌اند.^[۷]

معادلات بقاء جرم

برای فاز گاز

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \varepsilon_g x_g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_w \varepsilon_g u_g x_g) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_w \varepsilon_g v_g x_g) = \dot{m} \quad (1)$$

چون شناور بودن ذرات در این روش، باعث گستردگی سطح در تماس با هوا می‌شود، به هنگام خشک شدن مواد، نرخ انتقال حرارت و جرم به مقدار قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد، و نیز از آنجا که ذرات در این روش جابه‌جا می‌شوند، خشک شدن آن‌ها با یکنواختی بسیار خوبی صورت می‌پذیرد. عمده‌ترین اشکالی که برای این روش مطرح است افت فشار نسبتاً زیاد جریان هوا در داخل بستر است. تحلیل فرایندهای شناوری به دلیل وجود ذرات شناور در جریان هوا بسیار پیچیده است، خصوصاً وقتی که شناور شدن ذرات هم‌زمان با انتقال حرارت و جرم در بستر صورت می‌گیرد.

مؤلفه‌ی محوری جریان گاز در رژیم حداقل شناوری از رابطه‌ی [۱۰] و مؤلفه‌ی شعاعی سرعت از اطلاعات ارائه شده توسط تسو [۱۰] محاسبه می‌شود.

$$\frac{d\rho V_{mf}\rho_g}{\mu_g} =$$

$$\left[\left(\frac{33}{V} \right)^2 + 0.0408 \frac{d\rho\rho_g(\rho_{ws}-\rho_g)g}{\mu_g^2} \right]^{0.5} - 33/V \quad (10)$$

میزان گستردگی سطح به حجم ذرات را می‌توان از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه کرد. [۱۲]

$$a = \frac{6(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s d_p} \quad (11)$$

برای محاسبه‌ی مقدار رطوبت در فاز جامد لازم است مقدار تبخیر سطحی ذرات تعیین شود. پالانز [۱۳] فرض کرد که در اطراف هر ذره، ناحیه‌ی فعالی، همانند یک لایه‌ی مرزی، وجود دارد که تبادلات جرم و انرژی بین ذره و گاز را میسر می‌سازد. با توجه به این نظریه مقدار تبخیر، یا در واقع میزان انتقال رطوبت از سطح ذرات از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = \sigma_p(x_{pg}^* - x_g) \quad (12)$$

ضریب تبخیر سطحی در رابطه‌ی ۱۲ برابر است با:

$$\sigma_p = \frac{h_v \rho_g D_g}{\phi_s k_g} \quad (13)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در بستر شناور را می‌توان از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه کرد. [۱۱]

$$h_v = C_g V_o \rho_g J_h Pr^{-2/3} \quad (14)$$

$$j_h = \frac{Nu_p}{Re_o Pr_g} = \begin{cases} 1/\sqrt{V} Re_p^{-2/4} & Re_p \geq 30 \\ 5/\sqrt{V} Re_p^{-7/8} & Re_p < 30 \end{cases} \quad (15)$$

$$Re_o = \frac{d_p v_g \rho_g}{\varepsilon_{mf} \mu_g} \quad (16)$$

محتوای رطوبت ذرات متأثر از دما و رطوبت آنها است، البته در زمانی که ذره‌ی با نرخ ثابت در حال خشک شدن است، این مقدار فقط متأثر از دمای ذره است. رابطه‌ی ۱۶ بیانگر میزان رطوبت در لایه‌ی مرزی مجاور ذرات است.

$$x_{pg}^* = \Phi_1(T_s) \Phi_2(x_s) \quad (17)$$

$$\Phi_1(T_s) = 0.622 \frac{P_w}{\sqrt{P_o} - P_w} \quad (18)$$

برای فاز جامد

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ws} \varepsilon_s x_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{ws} \varepsilon_s u_s x_s) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{ws} \varepsilon_s v_s x_s) = -am \quad (2)$$

معادلات بقاء انرژی

برای فاز گاز

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_{wg} I_g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_g \rho_{wg} I_g u_g) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_g \rho_{wg} I_g v_g) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_g \varepsilon_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_g \varepsilon_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right] + ah_v (T_s - T_g) + am (c_{wg} T_g + \gamma_o) \end{aligned} \quad (3)$$

برای فاز جامد

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_{ws} I_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_s \rho_{ws} U_s I_s) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_s \rho_{ws} v_s I_s) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_s \varepsilon_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_s \varepsilon_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right] - am (C_{wg} T_g + \gamma_o) + ah_v (T_g - T_s) \end{aligned} \quad (4)$$

با توجه به کمیت‌های تعریف شده در معادلات فوق، لازم است از معادلات کمکی، استفاده شود.

تغییرات رطوبت گاز داخل بستر در طول فرایند خشک کردن، بر روی چگالی گاز اثر خواهد داشت. لذا تغییرات چگالی گاز را می‌توان از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد.

$$\rho_{vg} = \frac{\rho_g(1+x_g)}{1 + \frac{\rho_g}{\rho_w} x_{go}} \quad (5)$$

با فرض اینکه در زمان خشک شدن تغییری در حجم ذرات ایجاد نمی‌شود، چگالی ذرات در طول فرایند خشک شدن از رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

$$\rho_{wg} = \rho_s \frac{1+x_s}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} x_{so}} \quad (6)$$

آنتالپی گاز و ذرات را می‌توان با توجه به وجود رطوبت در گاز و ذرات جامد از رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه کرد.

$$I_g = (c_g + x_g c_{wv}) T_g \quad (7)$$

$$I_s = (c_s + x_s c_w) T_s \quad (8)$$

با توجه به اینکه رژیم جریان حداقل شناوری در نظر گرفته شده است، توزیع ذرات در بستر از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود. [۸]

$$\varepsilon_{mf} = 0.586 \phi_s^{-0.772} \left[\frac{\mu_g^2}{\rho_g(\rho_{ws}-\rho_g)gd_p^3} \right]^{0.29} \left[\frac{\rho_g}{\rho_{ws}} \right]^{0.21} \quad (9)$$

شناور داخل بستر منتقل می‌شود، و در صورتی که ذرات، دارای رطوبت سطحی باشند، دمای ذرات تا رسیدن به دمای حباب تر بستر افزایش می‌یابد. در این شرایط دما تقریباً ثابت می‌ماند و حرارت دریافت شده توسط ذرات باعث تبخیر سطحی رطوبت از روی آنها می‌شود؛ این شرایط تا انتهای رطوبت سطحی از روی ذرات و رسیدن به رطوبت بحرانی ادامه خواهد داشت. بعد از پایان این مرحله، تحت عنوان نفوذ خارجی یا خشک شدن با نرخ ثابت، حرارت دریافتی توسط ذرات باعث افزایش دمای آنها و انتقال رطوبت از داخل ذرات به بیرون می‌شود و چون با گذشت زمان لایه‌ی مرطوب ذرات به داخل آنها حرکت می‌کند، مقاومت مسیر حرکت رطوبت دائماً در حال افزایش بوده و خشک شدن با یک نرخ نزولی صورت می‌پذیرد. این شرایط تا رسیدن به وضعیت تعادلی دمایی و رطوبتی بین ذرات و محیط اطراف ادامه خواهد داشت. خشک شدن ذرات در ناحیه‌ی اول بیشتر متأثر از شرایط خارجی است و کمتر تحت تأثیر شرایط داخل ذرات است ولی در ناحیه‌ی دوم، خشک شدن متأثر از هر دو شرایط داخلی و خارجی است. در بررسی اثر متغیرها بر روی فرایند خشک شدن، اثر دمای ورودی گاز در شکل ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

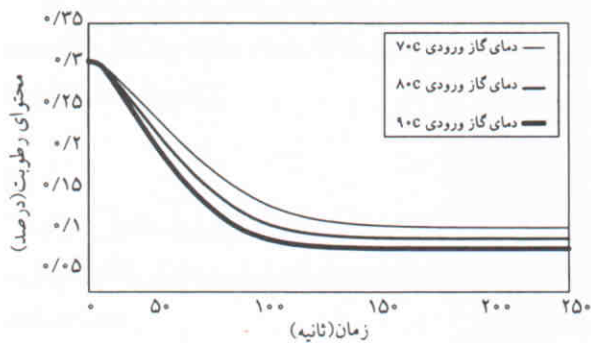
$$\Phi_T(x_s) = \begin{cases} 1 & x_s > x_{sc} \\ \frac{x_s^n (x_{sc}^n + K)}{x_{sc}^n (x_s^n + K)} & x_s \leq x_{sc} \end{cases} \quad \text{اگر} \quad (19)$$

$$P_w = 10 \left[0.622 + \frac{V/5 T_s}{238 + T_s} \right] \quad (20)$$

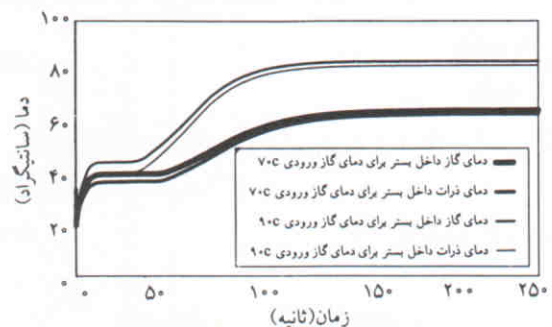
در رابطه‌ی ۱۹، n و K مقادیری ثابت، و به ترتیب برابر با ۳ و ۰/۰۰۱ هستند.

بررسی حل عددی

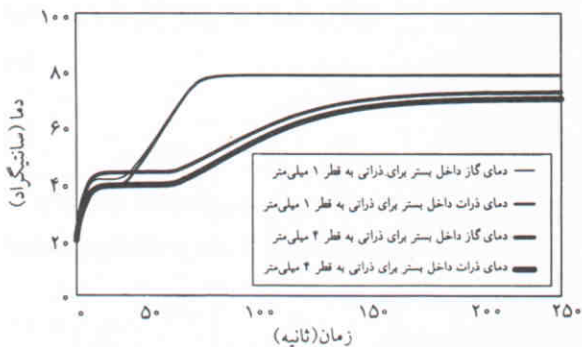
مدل ارائه شده با استفاده از روش حجم کنترل و شبکه‌ی غیر یکنواخت در جداره‌ها و ورودی بستر، و برای حالت خشک شدن غیر پیوسته و با رطوبت سطحی روی ذرات حل شده است. با توجه به این که معادله‌ی گشتاور بین معادلات اصلی وجود ندارد و ضمناً فاصله‌های زمانی حل، کوچک و برابر با ۰/۰۰۱ ثانیه تعیین شده است، حل عددی معادلات با همگرایی به‌خوبی صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از الگوی ریاضی، مشاهده می‌شود که با شروع فرایند خشک شدن، حرارت از گاز به ذرات



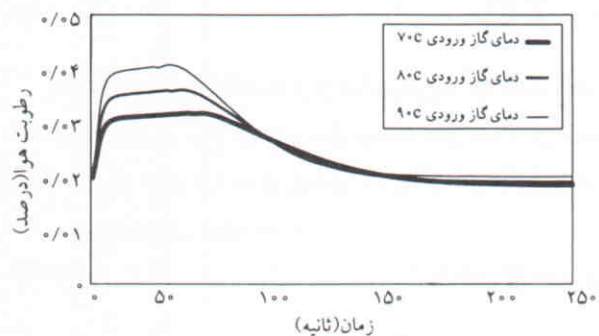
شکل ۳. تغییرات محتوای رطوبت ذرات داخل بستر شناور.



شکل ۱. تغییرات دمای گاز و ذره در بستر شناور.



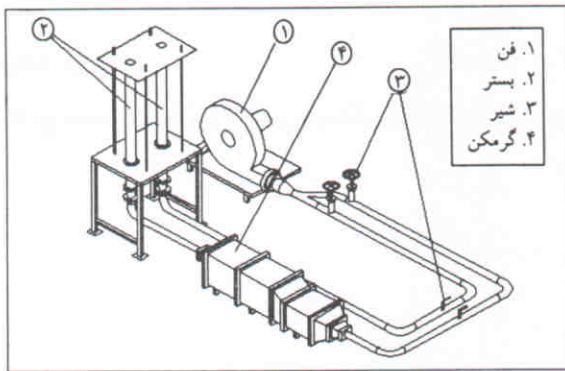
شکل ۴. تغییرات دمای گاز و ذره در بستر شناور.



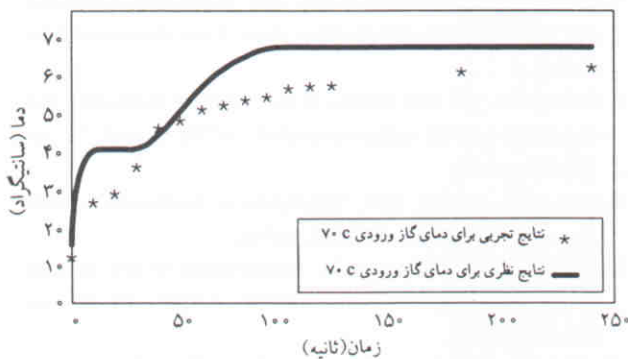
شکل ۲. تغییرات رطوبت هوای داخل بستر شناور.

سرعت و در نتیجه دبی هوای ورودی به بستر را می توان کنترل کرد. توجه به وسایل اندازه گیری به کار گرفته شده در دستگاه مذکور، امکان اندازه گیری دمای گاز و ذرات با دقت ۱/۰ درجه فراهم شده، و ضمناً تغییرات رطوبت ذرات با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی که تغییرات وزن کل ذرات داخل بستر را با دقت یک گرم اندازه گیری می کند، اندازه گیری شده است. با استفاده از این دستگاه خشک کردن مواد دانه ای همچون برنج، لپه، گندم، ماش، شاه دانه و سیلیکاژل بررسی شده و نتایج به دست آمده از آزمایش ها در مقایسه با نتایج حاصل از مدل به خوبی مطابقت کند، نتایج مربوط به آزمایش با دانه های گندم در شکل های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

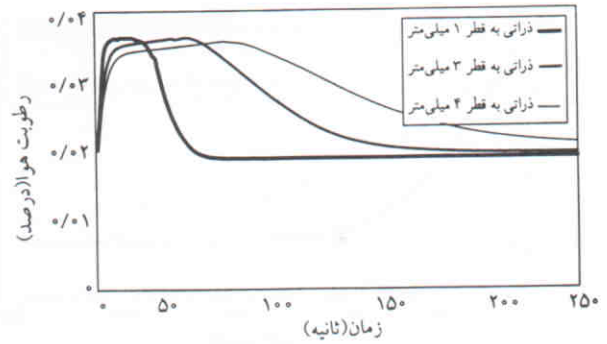
از آنجا که وسایل اندازه گیری دما برای گاز قابلیت کنترل مناسب تری از وسایل به کار گرفته شده برای ذرات دارند، هماهنگی نتایج نظری و تجربی در شکل ۹ بهتر از شکل ۸ است. در شکل ۱۰ با توجه به نحوه اندازه گیری رطوبت ذرات، سهم خطای ناشی از وسایل اندازه گیری در این شکل بیشتر از دو شکل دیگر مشهود است. خطای بین نتایج ناشی از عوامل متعدد، از جمله انتخاب وسایل اندازه گیری به دلیل محدودیت این وسایل و دقت آنها و نیز فرضیات به کار گرفته شده است. به عنوان مثال فرض عایق بودن جداره، یکنواختی شکل ذرات، یکسان فرض کردن خواص فیزیکی



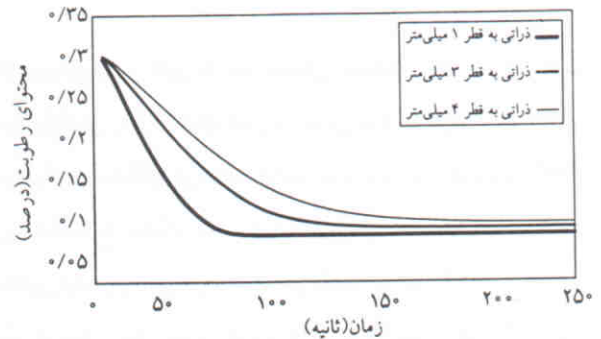
شکل ۷. دستگاه خشک کن بستر شناور.



شکل ۸. مقایسه ی نتایج نظری و تجربی دمای ذرات گندم در بستر شناور.



شکل ۵. تغییرات رطوبت هوای داخل بستر شناور.

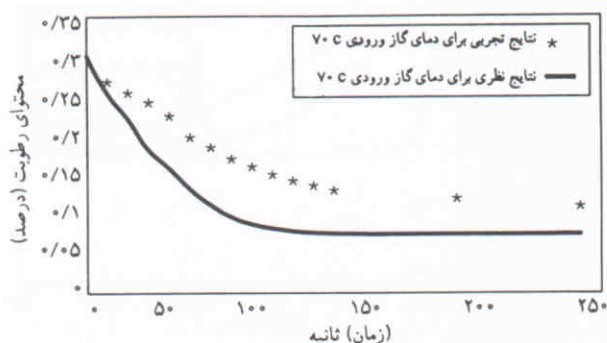


شکل ۶. تغییرات محتوای رطوبت ذرات داخل بستر شناور.

همان گونه که مشاهده می شود با افزایش دمای گاز ورودی، نرخ انتقال حرارت بین گاز و ذرات افزایش یافته و در نتیجه نرخ خشک شدن افزایش می یابد. در شکل ۴، ۵ و ۶ اثر قطر ذرات در فرایند خشک شدن نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودارها مشاهده می شود، با کاهش قطر، سطح در تماس ذرات افزایش یافته و زمان خشک شدن کوتاه می شود و تغییرات دما با شدت بیشتری در ذرات صورت می پذیرد. افزایش قطر ذرات در ناحیه ی خشک شدن با نرخ نزولی اثر محسوس تری نسبت به ناحیه ی خشک شدن با نرخ ثابت دارد.

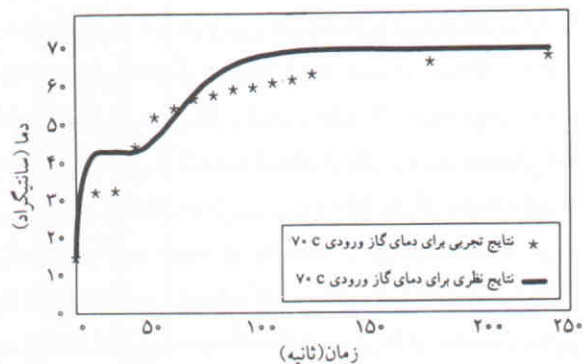
بررسی تجربی مدل

به منظور بررسی تجربی پدیده ی خشک کردن در بستر شناور، دستگاهی طراحی و ساخته شده است (شکل ۷) که قدرت فن آن ۷/۵ کیلو وات است و ۲۸۰۰ بار در دقیقه می چرخد. این دستگاه هوای مورد نیاز برای شناوری ذرات را تأمین می کند. هوای مذکور با عبور از یک منبع حرارتی که در آن ۱۰ المان حرارتی — که قدرت هر یک ۲ کیلو وات است — کار گذاشته شده است گرم می شود. منبع حرارتی مذکور می تواند هوای ورودی را تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد گرم کند. با استفاده از شیرهای کنترلی که در مسیر هوا قرار داده شده است



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج نظری و تجربی محتوای رطوبت ذرات گندم در بستر شناور.

گاز ورودی ضمن تغییر شرایط محیطی باعث افزایش نرخ خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن ذرات می‌شود. از طرف دیگر کاهش قطر ذرات باعث افزایش سطح تبادل حرارت و جرم شده و لذا انتظار می‌رود که نرخ خشک شدن ذرات افزایش و زمان خشک شدن کاهش یابد. چرخش ذرات در بستر باعث می‌شود که ذرات در هر زمان در بستر دارای دما و رطوبت تقریباً یکنواختی با همدیگر باشند. در مجموع نتایج حاصل از این مدل با نتایج تجربی به دست آمده به خوبی هماهنگ هستند، ولی لازم به نظر می‌رسد که ماهیت رفتاری پدیده‌ی خشک شدن مواد مختلف به گونه‌ی در این مدل در نظر گرفته شود.



شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج نظری و تجربی دمای گاز مجاور ذرات گندم در بستر شناور.

وهندسی ذرات و مغایرت رژیم جریان نظری و عملی از جمله‌ی این عوامل اند. در شکل ۱۰ در ناحیه‌ی مشخصی در ابتدای فرایند خشک شدن با نرخ نزولی میزان خطا به مراتب بیشتر از نواحی دیگر و تا حدود ۲۵ درصد است. این خطا عمدتاً مربوط به نرخ انتقال حرارت در آن ناحیه بوده و علت آن عدم اعمال اثر لایه‌ی مقاوم روی سطح ذرات در مدل ریاضی است. در شکل‌های ۸ و ۹ میزان خطا بین ۵ تا ۲۵ درصد در نوسان است.

نتیجه‌گیری

از نتایج به دست آمده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که افزایش دمای

منابع

- Geldart, D., *Gas fluidization Technology*, John Wiley, (1986).
- Kunii, D., Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, Butterworth Heinemann, (1991).
- Palancz, B., "A mathematical model for continuous fluidized bed drying", *Chem. Eng. Sci.*, **38**, pp. 1045-1059, (1983).
- Lai, F.S., Chen, Y., "Modeling and simulation of a continuous fluidized-bed dryer", *Chem. Eng. Sci.*, **41**, pp. 2419-2430, (1986).
- Chandran, A.N., Subba Rao, S. and Varma, Y.B.G., "Fluidized bed drying of solid", *AIChE Journal*, **36**, pp. 29-38, (1990).
- Basirat, H., Saffar avval, M. and Assari, M.R., "The design experimental setup and theoretical investigation of fluidized bed drying", *General design analysis, considerations and applications*, pp. 121-125, (1998).
- Gidaspow, D., *Multiphase flow and fluidization-continuum and kinetic theory descriptions*, New York: Academic Press (1994).
- Broadhurst, T.E. and Becker, H.A., "Onset of fluidization and slugging in beds of uniform particles", *AIChE Journal*, **21**, pp. 238-247, (1975).
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H., "Mechanics of fluidization", *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **62** (100), (1966).
- Tsuo, Y.P. and Gidaspow, D., "Computation of flow patterns in circulating fluidized beds", *AIChE Journal*, **36** (6), pp. 885-896, (1990).
- Chu, J.C., Kalil, J. and Wetteroth, W.A., *Chem. Engng Prog.*, **49** (141), (1953).