

# شبیه‌سازی خشک‌کردن پاششی پودر شوینده

منصور کلباسی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهدی محمدی (فوق‌لیسانس)

پژوهشکده توسعه فرایندها، پژوهشگاه صنعت نفت

فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف  
فروردین-مهرماه ۱۳۸۷، شماره‌ی چهارم و یکم، ص. ۲۲-۲۳ (پادداشت فنی)

برای خشک‌کردن پاششی پودر شوینده، یک گاز مثل هوای داغ با قطرات خوراک به‌صورت ناهمسو تماس داده می‌شود. طی این تماس پدیده‌های انتقال گشتاور، جرم و حرارت به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. در این شبیه‌سازی مدلی برای پیش‌بینی پارامترهای عملیاتی، زمان خشک‌شدن و ارتفاع برف مورد نظر ارائه شده و تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد خشک‌کن پاششی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور معادلات موازنه‌ی جرم و انرژی و گشتاور حول یک المان کوچک از برف و برای هر دو فاز ذرات و گاز، نوشته شده و اعداد بدون بعد و ضرایب انتقال جرم و حرارت محاسبه شدند. سپس با نوشتن یک برنامه‌ی رایانه‌ی مناسب و تلفیق معادلات گشتاور و موازنه‌های جرم و انرژی، و با روش تقاضای اجزای محدود دستگاه معادلات حل شده و یک مدل ریاضی ارائه شد. به کمک این مدل یک پروفیل نزولی برای دمای گاز و روند صعودی برای دمای ذرات پیش‌بینی شد. پروفیل رطوبت گاز و ذرات نیز بررسی شد و روند کاهش برای ذرات و روند افزایش برای رطوبت گاز به دست آمد. نتایج حاصله حاکی از آن است که سرعت شعاعی ذرات خروجی از اتم‌ساز در کسری از ثانیه به صفر، و سرعت محوری ذرات نیز به مقداری ثابت می‌رسد. اثر قطر ذرات خروجی از اتم‌ساز نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی صحت این مدل از داده‌های یک برج خشک‌کن پودر شوینده استفاده شده و توافق خوبی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده شده است. از نتایج این شبیه‌سازی می‌توان در بهینه‌سازی واحدهای موجود، تغییر شرایط عملیاتی آنها، و نیز در طراحی واحدهای جدید استفاده کرد.

mkalbasi@aut.ac.ir  
mohammady@ripi.ir

## ۱. مقدمه

محتوای جامد بالا) و برای دوره‌ی زمانی خشک‌شدن با شدت ثابت ارائه شد.<sup>[۶]</sup> این مدل قادر به پیش‌بینی تشکیل پوسته به‌صورت تابعی از خواص خوراک و پارامترهای عملیاتی، و نیز تشکیل پوسته‌ی درون قطرات به‌صورت تابعی از پارامترهای عملیاتی و خواص دوغاب است. مدل‌های ریاضی مرور شده در سه گزیه طبقه‌بندی می‌شوند: گزیه اول شامل مدل‌هایی است که معادله‌های آن به‌گونه‌ی بنا می‌شود که قابل حل تحلیلی باشد. در سال ۱۹۸۴ برای محاسبه‌ی دمای گاز، از معادله‌ی موازنه‌ی حرارت سمیتیکی استفاده کردند.<sup>[۷]</sup> موازنه‌های کلی حرارت و جرم، از دیگر معادلات مورد استفاده در این مدل‌ها هستند. دمای هر ذره طی تمام فرایند خشک‌کردن برابر دمای اشباع بی‌درز (آدیاباتیک) فرض می‌شود.<sup>[۸]</sup> در این مدل‌ها جریان هوا و ذرات دو شاخه فرض می‌شود. همچنین در بعضی از این مدل‌ها فرض می‌شود که رطوبت در مواد نفوذ می‌کند.<sup>[۹]</sup> در مدل‌های این گزیه خواص فیزیکی گاز طی خشک‌کردن محاسبه می‌شوند ولی تعداد فرضیات ساده‌کننده به قدری زیاد است که نتایج کاملاً قابل اعتماد نیستند. به علاوه، فرم تحلیلی نهایی حل مدل به قدری پیچیده است که کاهش بیشتر فرضیات ساده‌کننده مشکوک به نظر می‌رسد.

گزیه دوم شامل مدل‌هایی است که در آن‌ها نقش معادلات مشابه گزیه اول است ولی تعداد فرضیات ساده‌کننده کم‌تر است و سبب می‌شود تا حل عددی مورد استفاده قرار گیرد. این مدل‌ها با فرض غیر یکنواخت بودن افسانه و هیدرودینامیک

امروزه بسیاری از محصولات شیمیایی و غذایی جامد به‌صورت پودر یا دانه به بازار عرضه می‌شوند. معمولاً این صنایع (از جمله صنایع تولید پودرهای شوینده) از یک برج خشک‌کن پاششی برای تولید محصول خود استفاده می‌کنند.<sup>[۱]</sup> خشک‌کردن پاششی عبارت است از خشک‌کردن یک خوراک مایع از طریق پاشش آن به درون یک جریان گاز داغ که طی آن، خوراک مایع به یک محصول پودری تبدیل می‌شود.<sup>[۲]</sup> خوراک ممکن است به‌صورت محلول، تعلیق (سوسپانسیون)، دوغاب یا خمیر باشد. محصول خشک‌شده نیز ممکن است به‌صورت پودر، دانه یا کلوخه باشد. پیشرفت‌های انجام‌شده در این زمینه موجب شده که این روش به خوبی با دیگر روش‌های خشک‌کردن رقابت کند.<sup>[۳]</sup>

به علت اهمیت عملی روش خشک‌کردن پاششی و نیز دشواری توصیف ریاضی کامل این فرایند، تاکنون مدل‌های متعددی ارائه شده است.<sup>[۴]</sup> در سال ۱۹۹۵ یک مدل جامع ریاضی شامل انتقال جرم، حرارت و گشتاور ارائه شد.<sup>[۵]</sup> که در آن حتی توزیع ذرات و تأثیر حمل آن‌ها توسط هوا نیز مورد توجه قرار گرفت و با فرض شبکه‌های موازی، یک پروفیل تخت از شدت جریان هوا درون برج خشک‌کن در نظر گرفته شد. همچنین در سال ۲۰۰۱ مدلی برای خشک‌کردن پاششی قطرات دوغابی (با

قطرات خروجی از نازل محاسبه شده و محاسبات را در مورد آن انجام می‌دهیم. در مورد نازل فشاری مورد استفاده در تحقیق حاضر برای محاسبه قطر متوسط ذرات از معادله‌ی زیر استفاده شد:

$$dp = \gamma \times 10^{-5} (do)^{1.52} (\sigma)^{0.713} (\mu_L^{1.155}) (Q)^{-0.744}$$

که در آن قطر گلوگاه نازل،  $\sigma$  کشش سطحی سیال،  $\mu_L$  گران‌ریزی سیال و  $Q$  دبی حجمی است. همچنین به دلیل تشکیل سریع پوسته در لایه‌ی خارجی ذرات پودر شوینده، قطر ذرات طی عبور از خشک‌کن ثابت در نظر گرفته می‌شود. در حالت کلی برای سیال خروجی از اتم‌ساز می‌توان سه مؤلفه‌ی سرعت — محوری، شعاعی، مماسی — در نظر گرفت. شکل ۱ نمای شماتیک خشک‌کن پاششی با جریان ناهم‌سو و نازل فشاری را نشان می‌دهد.

بر هر ذره‌ی در حال سقوط در خشک‌کن چهار نیرو شامل وزن، بایونسی، درگ، و اندازه حرکت وارد می‌شود. با نوشتن رابطه‌ی تعادلی بین این نیروها و حل معادله در سه جهت  $x, y, z$  (محوری، شعاعی، مماسی) معادلات ۱ تا ۳ حاصل می‌شوند:

$$\frac{dU_{px}}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} C_D \frac{U_p (U_{px} + U_{gx}) \rho_g}{\rho_p d_p} \quad (1)$$

$$\frac{dU_{pr}}{dt} = \frac{U_{pt}^2}{r} - \frac{3}{4} C_D \frac{U_p (U_{pr} + U_{gr}) \rho_g}{\rho_p d_p} \quad (2)$$

$$\frac{dU_{pt}}{dt} = -\frac{U_{pt} U_{pr}}{r} - \frac{3}{4} C_D \frac{U_p (U_{pt} + U_{gt})}{\rho_p d_p} \quad (3)$$

که در آن‌ها  $U_p$  سرعت نسبی ذره در جریان هواست که از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

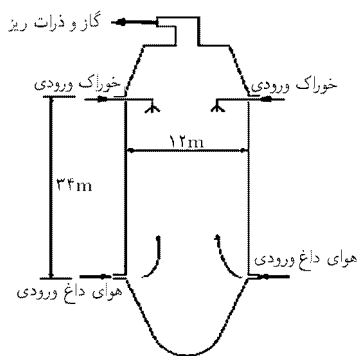
$$U_p = \left[ (U_{px} + U_{gx})^2 + (U_{pr} + U_{gr})^2 + (U_{pt} + U_{gt})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

به علت طول زیاد برج و همچنین نوع پخش‌کننده‌ی هوا، جریان هوا به صورت یک‌بعدی است و مؤلفه‌های شعاعی و مماسی هوا صفر هستند:

$$U_{gr} = U_{gt} = 0$$

همچنین از آنجا که اتم‌ساز مورد استفاده در صنعت از نوع نازل فشاری است، مؤلفه‌ی سرعت مماسی ذرات صفر می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان روابط سرعت را چنین نوشت:

$$\frac{dU_{px}}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} C_D \frac{U_p (U_{px} + U_{gx}) \rho_g}{\rho_p d_p} \quad (5)$$



شکل ۱. نمای شماتیک خشک‌کن پاششی با جریان ناهم‌سو و نازل فشاری.

بودن گاز در خشک‌کن حل می‌شوند. نتایج حاصل در این مدل‌ها به خوبی فرایند خشک‌کردن پاششی را توصیف می‌کنند؛ هرچند برای محاسبه‌ی فرایند در ناحیه‌ی نازل لازم است نرخ حمل ذرات به‌طور تجربی تعیین شود که عملی بودن مدل را محدود می‌کند. به علاوه کاربرد معادلات موازنه‌ی کلی جرم و حرارت، تعیین محلی خواص هوا طی خشک‌کردن پاششی را غیرممکن می‌سازد. [۱۰] با این وجود باید گفت مدل‌های این گروه به‌آسانی قابل اجرا هستند و برای طراحی خشک‌کن پاششی مناسب‌اند. معایب یاد شده در دو گروه نام‌برده در گروه سوم از مدل‌ها رزی نمی‌دهند. تمام موازنه‌ها در این گروه توسط معادلات دیفرانسیلی توصیف می‌شوند. اولین مدل از این گروه در سال ۱۹۷۴ ارائه شد. [۱۱] در مدل‌های بعدی از این دسته توصیف بهتری از سازوکار خشک‌کردن پاششی ارائه شد. برای مثال، در سال ۱۹۹۵ توزیع محلی دما و رطوبت در خشک‌کن محاسبه شد. [۹] در این مدل ناحیه‌ی جریان به یک شبکه تقسیم شده و نقاط محاسباتی تعریف شدند. در این مدل با در نظر گرفتن این واقعیت که یک ذره منبع گشتاور، جرم و انرژی است برای هر نقطه یک موازنه انجام می‌شود؛ ولی همان‌طور که نویسنده بیان می‌کند اجرای مدل به دلیل جزئیات فراوان آن بسیار دشوار است. کارهای زیادی در ارتباط با بررسی خشک‌کن پاششی صورت گرفته است. [۶]

در این نوشتار برای به دست آوردن مدل، معادلات انتقال جرم، حرارت و گشتاور برای ذرات و جریان هوای داغ نوشته شده و حل می‌شوند. خشک‌کن پاششی پودر شوینده در صنعت به صورت جریان ناهم‌سوی ذرات و هوای داغ است، لذا شبیه‌سازی برای حالت ناهم‌سو انجام شده است. برای بررسی صحت مدل ارائه شده، داده‌های یک برج خشک‌کن صنعتی مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین در این شبیه‌سازی مدلی برای پیش‌بینی پارامترهای عملیاتی، زمان خشک‌شدن و ارتفاع برج ارائه شده و نیز تأثیر پارامترهای ورودی به خشک‌کن بررسی شد. برای حل هم‌زمان معادلات موازنه‌ی جرم، انرژی و گشتاور یک برنامه‌ی رایانه‌ی نوشته شده است.

## ۲. تئوری

فرضیات ساده‌کننده‌ی که برای نوشتن معادلات در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

۱. قطرات خروجی از اتم‌ساز کروی بوده و قطر تمامی آن‌ها یکسان‌اند و در طی عبور از خشک‌کن قطر خود را حفظ می‌کنند.
۲. رطوبت و دمای هر ذره در تمام حجم آن یکنواخت است؛ به عبارت دیگر توزیع رطوبت و دما در داخل ذرات یکنواخت است.
۳. در هر مرحله از محاسبات یعنی با هر گام زمانی و در یک سطح مقطع از برج کلیه‌ی خواص فیزیکی ذرات و هوا ثابت در نظر گرفته می‌شود.
۴. از اتلاف حرارتی دیواره‌ی خشک‌کن صرف نظر می‌شود.

### ۱.۲. معادلات هیدرودینامیکی

اولین مرحله از فرایند خشک‌کردن پاششی، خروج سیال از نازل فشاری و تشکیل قطرات مایع است. طی این عمل قطرات با قطرهای متفاوت تشکیل می‌شوند. از این رو دو روش برای بررسی خشک‌شدن قطرات وجود دارد. در روش اول، توزیع اندازه، ذرات از طریق تجربی مشخص می‌شود و سپس با دسته‌بندی کل ذرات به چند دسته، محاسبات را به‌ازای هر دسته انجام داده و برآیند آنها را در نظر می‌گیریم. در روش دوم، با توجه به نوع نازل و معادلات تجربی ارائه شده برای آن، قطر متوسط

در محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت ( $K_H$ )، عدد بدون بعد ناسلت ( $Nu$ ) برای سطح کرزی ذره از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (14)$$

$$K_H = \frac{Nu \cdot \kappa}{d_p} \quad (15)$$

برای نوشتن موازنه‌ی انرژی بین فاز گاز و ذرات یک المان از برج، شامل جریان‌های ورودی و خروجی گاز و ذرات مد نظر، آنتالپی ورودی را برابر آنتالپی خروجی قرار می‌دهیم. در نتیجه تغییر دمای گاز را به صورت رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آوریم. (برای سهولت دمای مبنا را برابر صفر در نظر می‌گیریم).

$$G_g C_g T_g + G_s C_{ms} T_p = G_g C_g (T_g + \Delta T_g) + G_s C_{ms} (T_p + \Delta T_p) + \Delta m_p \lambda$$

$$\Delta T_g = - \frac{(G_s C_{ms} \cdot \Delta T_p) + \Delta m_p \lambda}{G_g C_g} \quad (16)$$

### ۳. روش حل ریاضی مدل حاضر

پس از نوشتن معادلات انتقال جرم، حرارت و گشتاور باید آنها را به طور هم‌زمان حل کرد. برای نوشتن برنامه‌ی رایانه‌ی، معادلات با روش تفاضل اجزاء محدود مرتب می‌شوند. معادلات ۱ و ۲ را در محاسبه‌ی سرعت محوری و شعاعی ذرات، می‌توان چنین نوشت:

$$U_{px}(i+1) = U_{px}(i) + \left[ \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} C_D \frac{U_p(i) * (U_{px}(i) + U_{gx}) * \rho_g}{\rho_p d_p} \right] * \Delta t \quad (17)$$

$$U_{pr}(i+1) = U_{pr}(i) + \left[ -\frac{3}{4} C_D \frac{U_p(i) * U_{pr}(i) * \rho_g}{\rho_p d_p} \right] * \Delta t \quad (18)$$

همچنین معادلات ۸ و ۱۲ را برای محاسبه‌ی تغییرات رطوبت ذرات و هوا می‌توان به معادلات ۱۹ تا ۲۲ تبدیل کرد:

$$\Delta m_p(i) = -f A_p K_g (Y_{eq} - Y(i)) * \Delta t \quad (19)$$

$$G_{ms}(i+1) = G_{ms}(i) - \Delta m_p(i) \quad (20)$$

$$X(i+1) = [G_{ms}(i+1) - G_s] / G_s \quad (21)$$

$$Y(i+1) = Y(i) + \frac{(X(i+1) - X(i)) * G_s}{G_g} \quad (22)$$

معادلات ۱۳ و ۱۶ برای محاسبه‌ی دمای ذرات و هوا به معادله‌ی ۲۳ تبدیل شدند:

$$T_p(i+1) = T_p(i) + (C_p - C_r) / (G_{ms}(i+1) * C_{pms}) \quad (23)$$

$$\frac{dU_{pr}}{dt} = -\frac{3}{4} C_D \frac{U_p U_{pr} \rho_g}{\rho_p d_p} \quad (6)$$

$$U_p = \left[ (U_{px} + U_{gx})^2 + U_{pr}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

### ۲.۲. انتقال جرم

قطراتی که با هوای داغ در تماس‌اند، با گرفتن گرما از هوا رطوبت خود را از دست می‌دهند و در نتیجه دما و رطوبت قطره تغییر می‌کند. تغییرات جرم قطره برحسب زمان از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\frac{dm_p}{dt} = -f A_p K_g (Y_{eq} - Y) \quad (8)$$

که در آن رطوبت تعادلی،  $Y_{eq}$  رطوبت گاز،  $K_g$  ضریب انتقال جرم، و  $A_p$  سطح ذرات است. ضریب  $f$ ، طبق تعریف، برابر نسبت شدت خشک‌شدن در مرحله‌ی نزولی به شدت خشک‌شدن در مرحله‌ی ثابت است. در واقع ضریب  $f$  برای تصحیح نیروی محرکه‌ی انتقال جرم است. برای به دست آوردن  $f$  آزمایشاتی به عمل آمد و طی آن شدت خشک‌شدن برحسب زمان رسم شد، و از تقسیم رابطه‌ی شدت خشک‌شدن نزولی بر مقدار شدت خشک‌شدن ثابت،  $f$  عبارت است از:

$$f = 10.9291X^4 - 17.1937X^3 + 8.74007X^2 - 0.73318X + 0.0434 \quad (9)$$

رابطه‌ی ۹ برای حالتی است که مقدار رطوبت جسم از رطوبت بحرانی کوچک‌تر است. برای محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم ( $K_g$ ) عدد بی‌بعد شرود ( $Sh$ ) محاسبه، و برای انتقال جرم از سطح کرزی از رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (10)$$

$$K_g = \frac{Sh \cdot D_{AB} \cdot \rho_g}{d_p} \quad (11)$$

برای نوشتن موازنه‌ی جرم بین فاز گاز و ذرات یک المان از برج، شامل جریان‌های ورودی و خروجی گاز و ذرات در نظر گرفته و تغییر رطوبت گاز را به صورت زیر به دست می‌آوریم.

$$G_g Y + G_p X = G_g (Y + \Delta Y) + G_p (X + \Delta X)$$

$$\Delta Y = -\frac{G_p}{G_g} \cdot \Delta X \quad (12)$$

### ۳.۲. انتقال حرارت

برای محاسبه‌ی تغییرات دمای ذره حین خشک‌شدن، آگاهی از مقدار انرژی انتقال یافته از گاز داغ به ذره و مقدار انرژی لازم برای تبخیر و تغییر دمای ذره لازم است. معادله‌ی ۱۳ نشان‌گر رابطه‌ی این انرژی‌ها است:

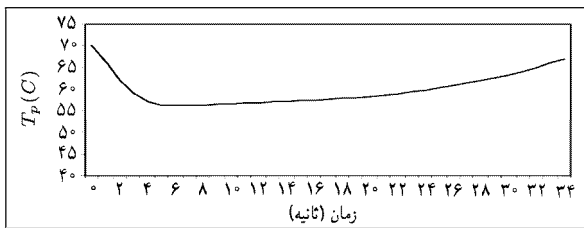
$$K_H A_p (T_g - T_p) = \underbrace{-\frac{dm_p}{dt} \lambda}_{\text{حرارت انتقالی}} + \underbrace{m_p C_p \frac{dT_p}{dt}}_{\text{حرارت تغییر دما}} \quad (13)$$

جدول ۱. داده‌های خشک‌کن صنعتی موجود.

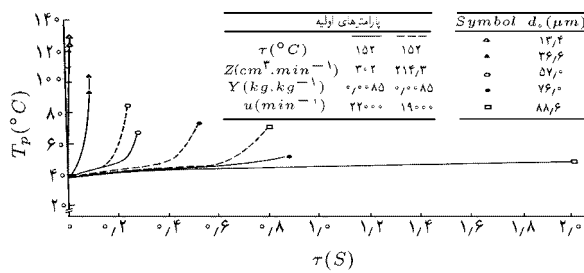
دبی خوراک	۱۵۱۰۶ (kg/hr)	قطر متوسط ذرات	۶۰۰ (μm)
رطوبت خوراک	۰٫۶۶ (kg/kg)	سرعت هوا	۰٫۳ (m/sec)
دمای خوراک	۷۰ (°C)	رطوبت هوای ورودی	۰٫۱۴ (kg/kg)
سرعت محوری	۱۳۰ (m/sec)	دمای هوای خروجی	۹۰ (°C)
جفت نازن	۲۷ (m/sec)	رطوبت محصول	۰٫۱۱ (kg/kg)

جدول ۲. نتایج خروجی شبیه‌سازی.

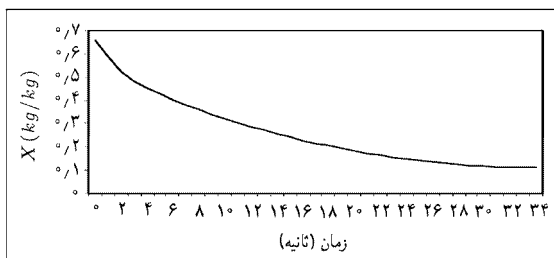
دمای هوای ورودی	۳۴۶°C	ارتفاع برج	۳٫۵ m
دمای محصول خروجی	۶۷°C	زمان اقامت ذرات	۳۴ sec



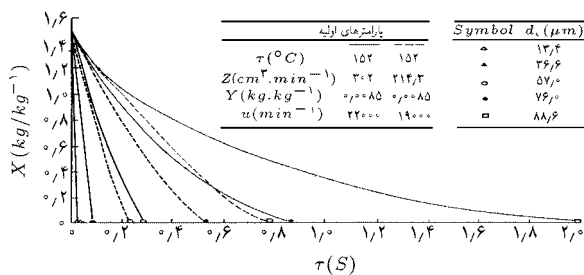
شکل ۳. تغییرات دمایی ذرات.



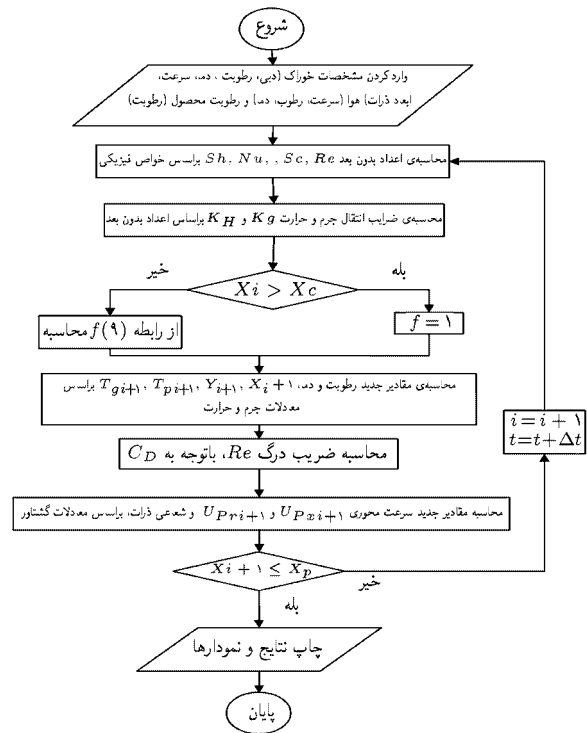
شکل ۴. تغییرات دمایی ذرات توسط Zbicinski [۱۷].



شکل ۵. تغییرات رطوبت ذرات.



شکل ۶. تغییرات رطوبت ذرات توسط Zbicinski [۱۷].



شکل ۲. الگوریتم برنامه رایانه‌ای مدل حاضر.

که در آن

$$C_1 = K_H A_p (T_g(i) - T_p(i))$$

$$C_2 = \Delta m_p(i) * \lambda$$

$$T_g(i+1) = T_g(i) +$$

$$\frac{G_{ms}(i+1) C_{pms}(T_p(i+1) - T_p(i)) + \Delta m_p \lambda}{G_g(i+1) C_g} \quad (24)$$

برای حل هم‌زمان معادلات فوق در یک برنامه رایانه‌یی، مراحل مطابق با فلوجارت ارائه شده در شکل ۲ به ترتیب اجرا می‌شوند.

#### ۴. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

برای اجرای برنامه رایانه‌یی و بررسی صحت مدل ارائه‌شده، از داده‌های یک خشک‌کن صنعتی، مطابق جدول ۱، استفاده شد. یادآور می‌شود که این داده‌ها مربوط به بالای برج (نقطه‌ی شروع شبیه‌سازی) هستند. با اجرای برنامه رایانه‌یی، نتایج مطابق جدول ۲ حاصل شده است.

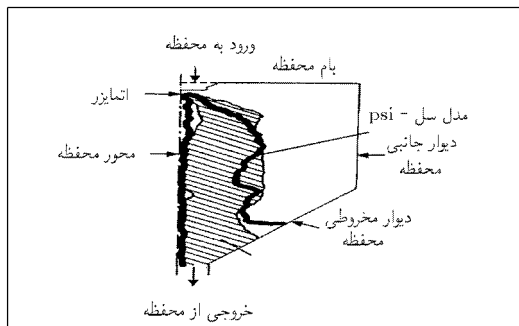
شکل‌های ۳ تا ۱۱ تغییرات دما، رطوبت و سرعت ذرات و هوا را طی عبور از خشک‌کن نشان می‌دهند. دمای هوای ورودی به برج از شبیه‌سازی حدود ۳۴۶°C به دست آمد، در حالی که با توجه به داده‌های تجربی این مقدار ۳۷۰°C است. وجود این اختلاف ممکن است ناشی از نادیده‌گرفتن اثرات حرارتی در برج باشد. ارتفاع برج از شبیه‌سازی حدود ۳٫۵ متر به دست آمد، در حالی که ارتفاع برج صنعتی ۳٫۵ متر است. این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که در شبیه‌سازی، کارایی انتقال جرم و حرارت را صدم درصد فرض کردیم؛ درحالی که در عمل به‌علت کارایی پایین‌تر ارتفاع برج بزرگ‌تری مورد نیاز است. در ضمن در ساخت برج خشک‌کن

از گرمای تبخیر رطوبت بیشتر شده و موجب بالا رفتن دمای ذره خواهد شد. در مقایسه‌ی این نتیجه با کارهای انجام‌شده‌ی قبلی، که نتایج آن در شکل ۴ ملاحظه می‌شود [۱۲]، در می‌یابیم که دما تا قبل از خشک شدن کامل، نزدیک دمای اشباع بی‌درز (آدیاباتیک) است، ولی در انتها بعد از خشک شدن کامل، دما روند افزایشی خواهد داشت.

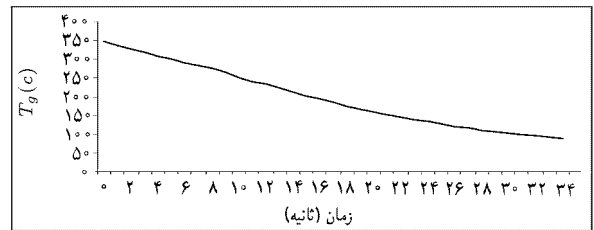
مطابق شکل ۵، رطوبت ذرات بعد از ورود به خشککن ابتدا به سرعت کاهش می‌یابد و سپس این روند کاهش به تدریج کند می‌شود. مطابق معادله‌ی ۸ در آغاز به علت این که نیروی محرکه‌ی انتقال جرم (اختلاف رطوبت ذره و هوا) بیشتر است، رطوبت ذره سریع‌تر کاهش می‌یابد. اما در ادامه با کاهش رطوبت ذره و کم شدن اختلاف رطوبت ذره و هوا، روند کاهش رطوبت کند می‌شود. در مقایسه‌ی این نتیجه با کارهای انجام‌شده‌ی قبلی، که نتایج آن در شکل ۶ مطرح شده [۱۳]، ملاحظه می‌شود که روند کاهش رطوبت ابتدا سریع بوده و به تدریج شیب تغییرات کندتر می‌شود.

مطابق شکل ۷ دمای گاز ورودی به خشککن روند نزولی دارد. همچنین براساس معادله‌ی ۱۶ تغییرات دمایی گاز متناسب با میزان حرارت انتقال یافته از فاز گاز به فاز ذرات است. بنابراین کاهش دمای گاز، متناسب با میزان تبخیر رطوبت ذرات است. مطابق شکل ۸ روند افزایش رطوبت گاز بعد از ورود به خشککن ابتدا کند است و به تدریج سریع‌تر می‌شود. همچنین براساس معادله‌ی ۱۲ رطوبت گاز متناسب با تغییرات رطوبت ذرات است و بنابراین از آنجا که تغییرات رطوبت ذرات در محل ورود به بالای برج شدیدتر است، تغییرات رطوبت گاز نیز در بالای برج بیشتر است. در مقایسه‌ی این نتیجه با کارهای انجام‌شده‌ی قبلی برای حالت جریان هم‌سوی هوا و ذرات، که در شکل ۹ ارائه شده است [۱۴]، ملاحظه می‌شود که دمای گاز سیر نزولی و رطوبت گاز سیر صعودی دارد.

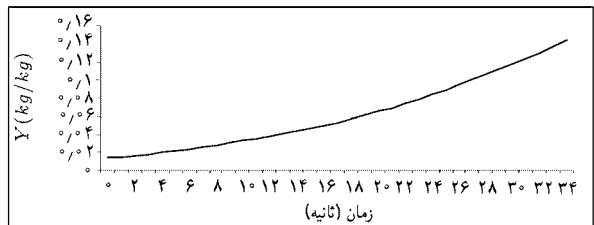
چنان که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سرعت محوری ذرات ورودی به خشککن به شدت کاهش یافته و به سرعت ثابتی (سرعت حد) می‌رسد. همچنین بر اساس معادله‌ی ۱ در این حالت مجموع عبارات مربوط به نیروهای اندازه حرکت گاز، درگ و بویانسی (ارشمیدس) با نیروی ثقل در تعادل نسبی قرار دارد. مطابق شکل ۱۱ سرعت شعاعی ذرات ورودی به خشککن بلافاصله کاهش یافته و به صفر می‌رسد؛ و براساس معادله‌ی ۲ مجموع عبارات مربوط به نیروهای اندازه حرکت گاز، درگ و بویانسی (ارشمیدس) بر نیروی اندازه حرکت شعاعی ذره غلبه کرده و حرکت شعاعی ذره را متوقف می‌کند. این نتایج با نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ [۱۵] قابل مقایسه است. چنان که در این شکل ملاحظه می‌شود، ذرات خروجی از اتم‌ساز بعد از طی مسیر کوتاهی، دیگر حرکت شعاعی ندارند و مطابق نتایج تصریح شده، به سرعت محوری ثابتی رسیده و با همان سرعت سقوط می‌کنند.



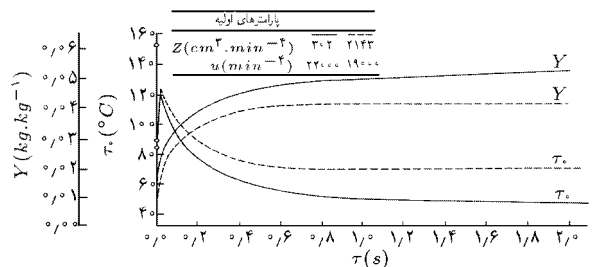
شکل ۱۲. مسیر حرکت ذرات خروجی از اتم‌ساز. [۱۵]



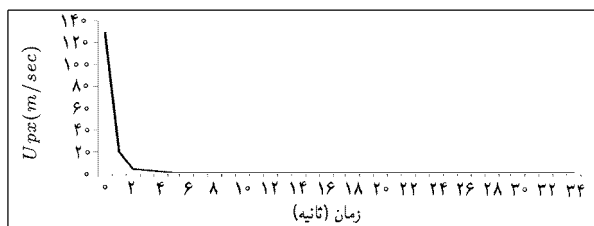
شکل ۷. تغییرات دمایی گاز.



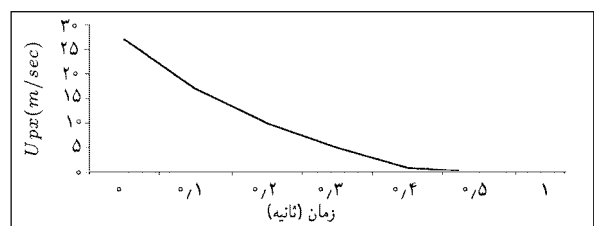
شکل ۸. تغییرات رطوبت گاز.



شکل ۹. تغییرات دمایی و رطوبت گاز. [۱۴]



شکل ۱۰. تغییرات سرعت محوری ذرات.



شکل ۱۱. تغییرات سرعت شعاعی ذرات.

صنعتی همواره فضایی برای نصب نازل‌های پاشنده و فضایی برای نصب ورودی هوا در نظر گرفته می‌شود. از این رو تمام ارتفاع برج خشککن صنعتی ناحیه‌ی انتقال جرم نیست.

مطابق شکل ۳ دمای ذرات بعد از ورود به خشککن ابتدا اندکی کاهش یافته و سپس به تدریج افزایش می‌یابد. مطابق معادله‌ی ۱۳ در آغاز به علت بیشتر شدن گرمای تبخیر از میزان حرارت منتقل شده به ذره، دمای ذره کاهش می‌یابد. در ادامه، با کاهش رطوبت ذره و افزایش دمای هوای مجاور میزان حرارت منتقل شده به ذره

## ۵. بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد خشک‌کن

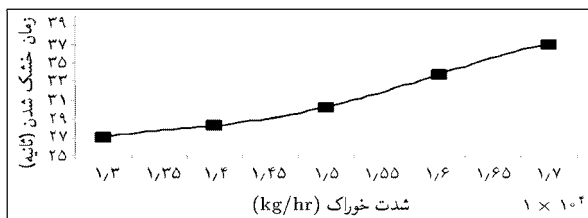
### پاششی

برای این منظور برنامه‌ی رایانه‌ی نوشته شده برای مدل خشک‌کن بازای داده‌های ورودی مختلف اجرا شد. شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ تأثیر دما، دبی، رطوبت، سرعت هوا و ذرات را بر زمان خشک شدن نشان می‌دهند.

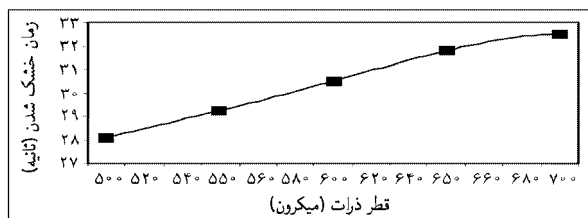
شکل ۱۳ تأثیر دمای هوای ورودی را بر زمان خشک‌شدن نشان می‌دهد. چنان که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای هوای ورودی زمان مورد نیاز کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش نیروی محرکه‌ی انتقال حرارت است، که موجب بالا رفتن شدت تبخیر رطوبت خواهد شد.

شکل ۱۴ تأثیر دبی هوای ورودی بر زمان خشک‌شدن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش دبی هوای ورودی زمان مورد نیاز کاهش می‌یابد، زیرا در این شرایط با افزایش سرعت و عدد رینولدز، ضرایب انتقال جرم و حرارت افزایش یافته و در نتیجه شدت تبخیر رطوبت افزایش می‌یابد. شکل ۱۵ تأثیر رطوبت هوای ورودی بر زمان خشک‌شدن را نشان می‌دهد. چنان که ملاحظه می‌شود، با افزایش رطوبت هوای ورودی زمان مورد نیاز افزایش می‌یابد؛ زیرا در این شرایط با افزایش رطوبت هوای ورودی نیروی محرکه‌ی انتقال جرم در معادله‌ی ۸، یعنی  $(Y_{eq} - Y)$  کاهش می‌یابد و در نتیجه شدت تبخیر کاهش یافته و زمان خشک‌شدن افزایش می‌یابد.

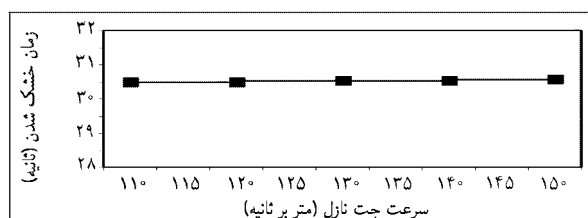
شکل ۱۶ تأثیر دبی خوراک ورودی بر زمان خشک‌شدن را نشان می‌دهد. با افزایش دبی خوراک زمان خشک‌شدن افزایش می‌یابد. زیرا در این شرایط با افزایش میزان انتقال جرم و حرارت، از یک سو رطوبت هوا افزایش و از سوی دیگر دمای



شکل ۱۶. اثر دبی خوراک.



شکل ۱۷. اثر قطر ذرات ورودی.



شکل ۱۸. اثر سرعت ذرات ورودی.

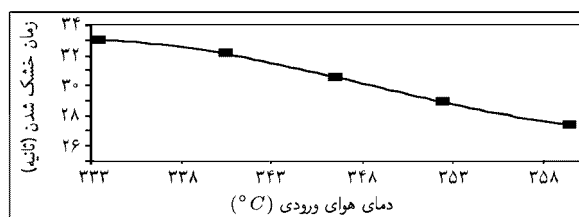
هوا کاهش می‌یابد. این دو عامل سبب کاهش سرعت خشک‌شدن و افزایش زمان مورد نیاز می‌شوند.

شکل ۱۷ تأثیر قطر ذرات ورودی بر زمان خشک‌شدن را نشان می‌دهد. واضح است که هرچه تعداد قطرات حاصل از اتمی‌کردن خوراک بیشتر باشد، قطرات کوچک‌تری حاصل می‌شود. با توجه به نسبت حجم کل به سطح قطرات، می‌توان گفت که هر قدر قطر ذرات کوچک‌تر باشد سطح کل حاصل بیشتر خواهد بود؛ یعنی سطح مؤثر انتقال حرارت و انتقال جرم افزایش می‌یابد و در نتیجه شدت انتقال جرم و حرارت نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش قطر ذرات، زمان خشک‌شدن افزایش خواهد یافت. از این‌رو در صورتی که بخواهیم تأثیر اندازه‌ی ذرات را در شبه‌سازی مورد توجه قرار دهیم، می‌توان با توجه به توزیع اندازه‌ی ذرات، کل ذرات را به چند دسته تقسیم، و هر مرحله از محاسبات مدل را به‌ازای هر دسته حل کرده و در نتیجه پارامترهای مختلف را به دست آورد.

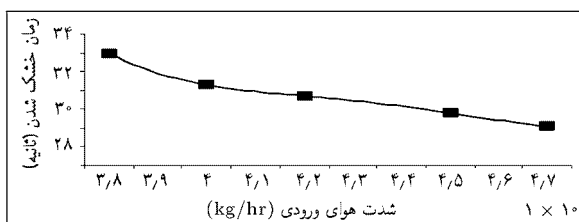
شکل ۱۸ تأثیر سرعت ذرات ورودی به اتم‌ساز را بر زمان خشک‌شدن نشان می‌دهد. چنان که در شکل ۷ دیده می‌شود، بلافاصله بعد از خروج قطرات از نازل سرعت آنها کاهش می‌یابد و به سرعت حد می‌رسد. بنابراین تغییر در سرعت جت نازل تأثیر محسوسی بر زمان خشک‌شدن ندارد.

## ۶. نتیجه‌گیری

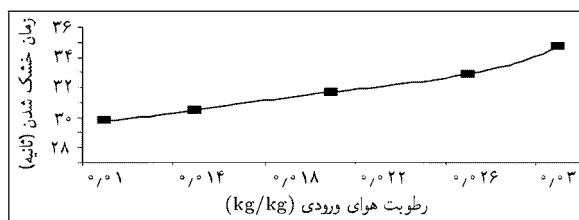
برای بررسی هم‌زمان پدیده‌های انتقال گشتاور، جرم و حرارت طی خشک‌شدن پاششی یک مدل ریاضی ارائه و صحت آن اثبات شد. از مدل پیشنهادی می‌توان برای پیش‌بینی روند تغییرات طی خشک‌شدن پاششی استفاده کرد. برای به دست آوردن



شکل ۱۳. اثر دمای گاز ورودی.



شکل ۱۴. اثر دبی گاز ورودی.



شکل ۱۵. اثر رطوبت گاز ورودی.



مدل ریاضی چند فرض ساده‌کننده در نظر گرفته شده از آن جمله سرعت هوا موازی با محور برج و قطر ذرات یکسان فرض شد. چنان‌که در نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود به‌علت تبخیر ناگهانی رطوبت، دمای ذرات بعد از ورود به محفظه‌ی خشک‌کن تا حدی افت می‌کند و در ادامه به‌علت تماس با هوای داغ در نواحی پایین برج دمای ذرات افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه شد که سرعت شعاعی ذرات بلافاصله بعد از خروج از نازل کاهش یافته و حرکت شعاعی ذرات متوقف می‌شود. سرعت محوری ذرات نیز با شیب بسیار تندی افت کرده و به یک مقدار ثابت (سرعت حد) می‌رسد. همچنین با ارزیابی تأثیر پارامترهای عملیاتی مشخص شد که با افزایش دبی و دمای گاز ورودی، زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن کاهش می‌یابد. و نیز ثابت شد که کوچک‌تر شدن ابعاد ذرات ورودی، موجب کاهش زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن آنها می‌شود. به‌علاوه مشخص شد که سرعت پاشش خروجی از نازل خیلی سریع افت می‌کند و تأثیر محسوس بر زمان خشک‌شدن ندارد؛ بلکه تأثیر آن بر روی اندازه‌ی ذرات خروجی از نازل ظاهر می‌شود.

بین نتایج نظری و داده‌های تجربی توافق معقولی مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر خطای ناچیزی در مقایسه با داده‌های تجربی خطا دارد. اما در کارهای پیشین میزان تطابق نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کمتر از کار حاضر بود. نتایج مدل را می‌توان با وارد کردن هیدرودینامیک واقعی هوا، اتلاف حرارتی برج و کارایی انتقال حرارت و جرم تصحیح کرد.

## فهرست علائم

$A$ : مساحت  
 $G$ : شدت جرمی گاز  
 $T$ : دما  
 $C_p$ : ظرفیت حرارتی

$g$ : شتاب ثقل  
 $t$ : زمان  
 $C_D$ : ضریب درگ  
 $K_g$ : ضریب انتقال جرم  
 $U$ : سرعت  
 $D_{AB}$ : ضریب نفوذ  
 $K_H$ : ضریب انتقال حرارت  
 $X$ : رطوبت جامد بر مبنای خشک  
 $d$ : قطر  
 $m$ : جرم  
 $Y$ : رطوبت هوا بر مبنای خشک  
 $f$ : شدت نسبی خشک شدن  
 $Q$ : دبی حجمی

**زیر نویس‌ها**  
 $C_r$ : بحرانی  
 $p$ : ذره  
 $e_q$ : تعادلی  
 $r$ : جهت شعاعی  
 $g$ : گاز  
 $s$ : جامد  
 $m$ : رطوبت  
 $t$ : جهت مماسی  
 $ms$ : جامد مرطوب  
 $x$ : جهت محوری

## منابع

- Solano, G.L., Cervantes, S., Jimenes, R. and Alvarado, G. "Optimization of brewer's yeast spray drying process", *Journal of Food Engineering*, **68**(1), pp. 9-18 (2005).
- Straatsma, J., Van Houwelingen, G., Steenberg, A.E. and De Jong, P. "Spray drying of food products: 1. Simulation model", *Journal of Food Engineering*, **42**(2), pp. 67-72 (1999).
- Reinhold, M., Horst, C. and Hoffmann, U. "Experimental and theoretical investigations of a spray dryer with simultaneous chemical reaction", *Chemical Engineering Science*, **56**(4), pp. 1657-1665 (2001).
- Nesic, S. and Vodnik, J. "Kinetics of droplet evaporation", *Chemical Engineering Science*, **46**(2), pp. 527-537 (1991).
- Zbicinski, I. "Development and experimental verification of momentum, heat and mass transfer model in Spray drying", *Chem. Eng. Journal*, **58**(2), pp. 123-133 (1995).
- Liang, H., Shinohara, K., Minoshima, H. and Matsushima, K. "Analysis of constant rate period of spray drying of slurry", *Chemical Engineering Science*, **56**(6), pp. 2205-2213 (2001).
- Truong, V., Bhandarib, R. and Howesc, T. "Optimization of cocurrent spray drying process for sugar-rich foods. Part II-Optimization of spray drying process based on glass transition concept", *Journal of Food Engineering*, **71**(1), pp. 66-72, (2005).
- Farid, M. "A new approach to modeling of single droplet drying", *Chemical Engineering Science*, **58**(13), pp. 2985-2993 (2003).
- Veli, D., Bilic, M., Tomas, S. and Planinic, M. "Simulation, calculation and possibilities of energy saving in spray drying process", *Applied Thermal Engineering*, **23**(16), pp. 2119-2131 (2003).
- Langrish, T.A.G. and Fletcher, D.F. "Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying", *Chemical Engineering and Processing*, **40**(4), pp. 345-354 (2001).
- Parti, M. and Palancz, B. "Mathematical Model for Spray drying", *Chemical Engineering Science*, **29**, pp. 355-362 (1974).
- Zbicinski, I., Grabowski, S. and Strumillo, C. "Mathematical modeling of spray drying", *Comput. Chem. Eng.*, **12**(2/3), pp. 209-214. (1988).