

مدلسازی و شبیه‌سازی فرایند خشک کردن آلومین در خشک‌کن پاششی با جریان همسو

منصور کلباسی*، محمودرضا خانلرخانی، امین احمدپور

دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

پیام‌نگار: mkalbasi2000@yahoo.com

چکیده

خشک‌کن‌های پاششی یکی از مهمترین، انواع خشک‌کن‌ها می‌باشند و کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله: صنایع غذایی، دارویی، و شیمیایی دارند. بنابراین مدل سازی و شبیه سازی این خشک‌کن‌ها می‌تواند گامی مهم در شناخت هرچه بیشتر این فرایند باشد. هدف اصلی از این تحقیق، مدل سازی خشک کردن پاششی دوغاب آبی آلومین در یک خشک‌کن همسو می‌باشد. بدین منظور مدلی جهت پیش بینی دمای محصول خروجی، مدت خشک شدن، و ارتفاع خشک‌کن ارائه شده است که نیز می‌توان، بوسیله آن عملکرد خشک‌کن را در شرایط مختلف عملیاتی پیش‌بینی کرد. در این مدلسازی، معادلات انتقال جرم، انتقال گرما و انتقال تکانه روی قطرات و جریان هوای داغ نوشته شد و سپس این معادلات توسط یک برنامه کامپیوتری بصورت همزمان حل شدند. جهت بررسی صحت مدل، نتایج بدست آمده از مدل با نتایج تجربی حاصل از خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی مقایسه، و تطبیق خوبی بین نتایج نظری و تجربی مشاهده گردید و در نهایت با استفاده از مدل، تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی به خشک‌کن، بر مشخصات نهایی محصول مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آلومین، دوغاب، خشک‌کن پاششی، مدلسازی

۱- مقدمه

پوشش‌هایی با کاربردها و مصارف مختلف از این پودر استفاده می‌کنند. این پودر علاوه بر استفاده روز افزون در صنعت سرامیک جایگاه ویژه‌ای در صنایع لوله و شیر سازی نیز پیدا کرده است و همچنین کاربرد لوله‌ها با روکش آلومین جهت جلوگیری از تبادل حرارتی و مقاوم حرارتی بالا، بسیار فراگیر شده است [۲]. در حال حاضر آلومین در صنایع ساخت رنگها، جوهر، پوشش‌های مختلف، چسب‌ها لاستیکها، صنایع دارویی، کاشی، آجرهای نسوز، لوازم

همواره معدن شناسان بدنبال ماده‌ای جامد با ساختمان کریستالی معمولی و همچنین قابلیت ترکیب کم با مواد دیگر بوده‌اند، که شاید بتوان گفت کریستال آلومین تا حدود بسیار زیادی از این نظر مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. از مهمترین کاربردهای فعلی پودر آلومین می‌توان تامین پودرهای تشکیل دهنده سرامیک را نام برد [۱]. امروزه کارخانه‌های بزرگ سرامیک سازی جهت ساخت

در این سیستم معمولاً محصول در معرض تجزیه حرارتی قرار نمی‌گیرد و به هنگام تبخیر رطوبت از روی توده قطرات، درجه حرارت محصول معمولاً پائین و در حد درجه حرارت مرطوب است. زمانیکه رطوبت محصول به مقدار موردنظر رسید، هر ذره محصول تحت تأثیر هوای سردتری قرار می‌گیرد و بنابراین دیگر افزایش دمای محصول چندان محسوس نیست [۶].

۲- مدلسازی

به‌طور کلی برای انتخاب مدل به منظور مدلسازی یک واحد باید به چندین پارامتر توجه داشت، از جمله این پارامترها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- مدل انتخاب شده باید جوابگوی دقت‌های مورد نیاز باشد.
- ۲- مدل انتخاب شده باید قابل تبدیل به آگوریتم‌های کامپیوتری و حل توسط روش‌های عددی باشد.
- ۳- سرعت حل مدل توسط کامپیوترهای شخصی و معمولی در حد قابل قبول باشد.
- ۴- پارامترهای مختلف مدل (علاوه بر پارامترها و مقادیر مربوط به تعریف صورت مسئله) تا حد ممکن توسط آگوریتم‌های داخلی مدل قابل محاسبه باشند و نیازی به تجربه‌های عملی کاربر نداشته باشند.

در مدل ارائه شده در این مقاله، استخراج مدل بر مبنای موازنه‌های حرارتی و جرمی و مومنتم و همچنین استفاده از دیدگاه‌ها و تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران [۷ و ۸] بر روی مدل‌های مختلف می‌باشد. در حقیقت مدل ارائه شده خود شامل سه مدل متفاوت برای سه نوع جریان همسو، ناهمسو، و مختلط است. این مدل‌ها در بسیاری از معادلات پایه با هم مشترک می‌باشند اما آگوریتم حل این مدل‌ها با هم متفاوت می‌باشند. برای تبدیل یک پدیده فیزیکی یا شیمیایی به یک مدل ریاضی در ابتدا نیاز به یک سری فرضیات ساده‌کننده است، در این مدلسازی نیز فرضیاتی در نظر گرفته شده که به قرار زیر می‌باشند: [۷ و ۱۰]

- ۱- قطرات حاصل از پاشش دارای قطر متوسط یکسان و هموزن می‌باشند.
- ۲- از هرگونه خرد شدن، بهم پیوستن، اثر همسایگی، تجمع و یا تغییر شکل ذرات صرف‌نظر می‌شود.

آشپزخانه، قطعات الکترونیکی، لوازم تزئینی، لوازم داندانپزشکی و پلاستیک‌ها کاربرد وسیعی دارد [۳]. خشک کردن مواد به وسیله پاشش خوراک به داخل برج، که به طور مختصر خشک کردن پاششی نامیده می‌شود از نقطه نظر تعریف عبارتست از: تغییر شکل خوراک از حالت سیالیت به حالت جامد و خشک شده با استفاده از پاشش خوراک به داخل هوای گرم در درون یک برج. عمل پاشش به وسیله یک پاشنده (اتومایزر) صورت می‌گیرد که در آن مایع خوراک به تعداد زیادی از قطرات ریز شکسته می‌شود. و در نتیجه این عمل سطح بزرگی نسبت به حجم مایع به وجود می‌آید که همین امر موجب تسریع انتقال جرم و حرارت می‌شود و به دلیل بالا بودن نرخ تبخیر رطوبت، دمای سطحی قطرات همواره پایین است و می‌توان بدون متأثر شدن محصول از گاز خشک‌کننده، از گاز با دمای بالا استفاده کرد. خوراک می‌تواند به صورت محلول، سوسپانسیون، دوغاب و یا خمیری شکل و محصول خشک شده می‌تواند به صورت پودر، گرانول و یا کلوخه باشد. پیشرفتهای انجام شده در این زمینه موجب شده است که این روش بتواند در سطح بسیار بالایی با دیگر روش‌های خشک کردن رقابت کند. [۴] به طور کلی مراحل کلی که خوراک در یک واحد خشک‌کن پاششی طی می‌کند تا به محصول موردنظر تبدیل شود چهار مرحله است که عبارتند از:

- ۱- مرحله پاشش و تبدیل خوراک به قطرات
- ۲- مرحله تماس قطرات با هوا یا گاز خشک‌کننده (اختلاط و جریان)
- ۳- مرحله خشک شدن قطرات (تبخیر رطوبت)
- ۴- مرحله بازیافت محصول

هر کدام از مراحل فوق با توجه به نحوه طراحی و شرایط عملیاتی خشک کن صورت می‌گیرد که در کنار خواص فیزیکی و شیمیایی خوراک، خصوصیات محصول خشک شده را تعیین می‌کنند [۵]. بیشترین کاربرد جریان همسو در خشک کردن مواد حساس به دما می‌باشد. در این حالت، داغترین هوا با مرطوب‌ترین قطره برخورد می‌کنند و سرعت خشک‌شدن نیز بالا می‌رود، دمای هوای داغ، سریع افت می‌کند و در خروجی دمای هوا به قدری پائین است که صدمه‌ای به محصول وارد نمی‌شود. سرعت زیاد تبخیر رطوبت از قطره در این روش، موجب تخلخل در محصول خشک و طبعاً سطح تماس زیاد محصول خواهد گردید. تبخیر سریع قطرات رطوبت باعث سرد شدن هوای گرم خشک‌کننده و کوتاهی زمان تبخیر می‌گردد.

۳- قطرات، کروی می‌باشند.

۴- گردآیدان رطوبتی و دمایی در جهت شعاعی درون محفظه وجود ندارد.

۵- انتقال جرم و حرارت بین قطره و هوا به صورت جابجایی اجباری است.

۶- از اثر حرکت قطرات بر روی سرعت هوای داغ صرفه‌نظر می‌شود.

۷- مدل مربوط به حالت پایا می‌باشد (در هر مرحله زمانی و در یک سطح مقطع از برج کلیه خواص فیزیکی هوا و قطره ثابت است).

۸- از اتلاف حرارتی از طریق بدنه خشک‌کن صرفه‌نظر می‌شود.

که در رابطه فوق W_D نرخ تبخیر قطره با زمان، K_g ضریب انتقال جرم، A_p سطح انتقال، Y_{eq} رطوبت تعادلی گاز در دمای سطح قطره بر حسب کیلوگرم رطوبت بر کیلوگرم گاز خشک، و y_g رطوبت گاز خشک کننده در هر لحظه زمانی می‌باشد.

۲-۳ موازنه انرژی قطره [۷]

مقدار حرارت منتقله از هوای داغ به قطره = مقدار انرژی لازم برای بالابردن دمای قطره + مقدار انرژی لازم برای تبخیر در دمای قطره

$$m_s [C_{ps} + x C_{pl}] \frac{dT_p}{dt} = -\Delta H \frac{dm_p}{dt} + h \cdot A_p (T_g - T_p) \quad (2)$$

که در آن، ΔH گرمای نهان تبخیر، h ضریب انتقال گرمای جابجایی، T_g دمای گاز و T_p دمای قطره است. اگر معادله (۲) را با توجه به دمای مرجع بنویسیم خواهیم داشت:

$$m_s \frac{d}{dt} [(C_{ps} + x C_{pl})(T_p - T_{ref})] = h \cdot A_p \cdot (T_g - T_p) - [\Delta H_{ref} + C_{pv}(T_p - T_{ref})] W_D \quad (3)$$

با توجه به اینکه C_p با گرمای ویژه یک قطره مرطوب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$C_p = \frac{C_{ps} + x C_{pl}}{1 + x} \quad (4)$$

و از آنجایی که M_s یا میزان جامد در هر قطره در کل فرایند ثابت و برابر است با:

$$M_s = \frac{\rho_p \cdot V_p}{1 + x} \quad (5)$$

نهایتاً چنین خواهیم داشت:

۲-۱ موازنه جرم (رطوبت) و انرژی بر روی قطرات

قطره‌ای که در بستر خشک‌کن از پاشنده خارج شود در اثر جذب گرما رطوبت خود را از دست می‌دهد و با گذشت زمان جرم قطره تغییر می‌کند که مقدار تغییرات جرمی آن متناسب با خشک‌شدن قطره می‌باشد. فرایند خشک شدن قطرات را می‌توان به دو مرحله خشک شدن با شدت ثابت و خشک شدن با شدت نزولی تقسیم کرد. از آنجا که شرایط هر مرحله در این دو مرحله کاملاً با یکدیگر متفاوت است معادلات هر مرحله بطور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱-۱ مرحله اول خشک شدن

در طول مرحله اول، تبخیر آب بصورت سطحی انجام می‌گیرد و نفوذ رطوبت از داخل قطره به سطح، شرایط اشباع را در سطح قطره حفظ می‌کند و طی این مرحله تبخیر با شدت ثابتی صورت می‌گیرد. با صرف نظر از انتقال حرارت از طریق تابش، موازنه‌های جرم و انرژی را برای قطره‌ای به قطر R_p و دمای T_p (دمای قطره در این مرحله برای کل قطره ثابت در نظر گرفته می‌شود) می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

۲-۲ موازنه جرم (رطوبت) [۷]

مقدار رطوبت جابجا شده از قطره = شدت تجمع رطوبت در قطره

$$W_D = \frac{dm_p}{dt} = -k_g \cdot A_p \cdot (y_{eq} - y_g) \quad (1)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{\left\{ \frac{D_v P_T}{RT_{ave}} \ln \frac{P_T - P_{Vi}}{P_T - P_{Vo}} \right\}}{\left\{ \frac{1}{4\pi \alpha_m} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_i} \right) \right\}} \quad (9)$$

در صورتیکه داریم:

D_v = ضریب نفوذ بخار در هوای محیط خشک کن

α_m = کسر فضای خالی ($V_L / V_L + V_s$)

T_{ave} = دمای میانگین $\left(\frac{1}{2} (T_o + T_i) \right)$

P_{Vi}, P_{Vo} = فشار بخار اشباع در بیرون پوسته و داخل

۲-۴-۱ انتقال جرم (رطوبت) به هوای محیط خشک کن

$$\begin{aligned} \frac{dm_p}{dt} &= K_m \cdot 4\pi R_o^2 (C_{Vo} - C_{Vi}) \quad \text{یا} \\ \frac{dmp}{dt} &= k_g \cdot 4\pi R_o^2 (y_{eq} - y_g) \end{aligned} \quad (10)$$

با ترکیب دو معادله (۹) و (۱۰) چنین خواهیم داشت:

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{1}{\left[\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_i} \right]} \frac{4\pi \alpha_m D_v P_T}{RT_{ave}} \ln \left[\frac{P_T - P_{Vi}}{P_T - \frac{RT_o}{km4\pi R_o^2 M_w} \frac{dm_p}{dt} - \frac{P_{Vo} T_o}{T_{\infty}}} \right] \quad (11)$$

همچنین خواهیم داشت: [۹]

$D_c = \alpha^m D_v$ ضریب نفوذ بخار در محیط متخلخل

۲-۵ معادله محاسبه شعاع کره مرطوب

با فرض اینکه نسبت مقدار جامد به مایع در کل قطره یکسان می‌باشد چنین خواهیم داشت:

$$\frac{m_{li}}{m_{lo}} = \frac{d_i^3}{d_o^3} \Rightarrow \frac{di}{d_o} = \frac{m_{li}^{\frac{1}{3}}}{m_{lo}^{\frac{1}{3}}} = \frac{m_l^{\frac{1}{3}}}{m_{lo}^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_p}{dt} &= \frac{\frac{6h \cdot (T_g - T_p) - 6[W_D(\Delta H_{ref} + C_{pv}(T_p - T_{ref}))]}{\pi d_p^2}}{d_p \rho_p C_p} \\ &\quad - (T_p - T_{ref}) \cdot \frac{C_{pL}}{C_p(1+x)} \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

تغییرات قطر قطره:

$$\frac{dRp}{dt} = \frac{1}{4\pi \rho_L R_p^2} \frac{dmp}{dt} \quad (7)$$

$$m_p = m_s + m_L \quad (8)$$

شروع این مرحله پس از رسیدن رطوبت قطره، به رطوبت بحرانی آغاز می‌شود. می‌توان میزان رطوبت نهایی را از طریق تجربی، و انجام آزمایشاتی بدست آورد. در طول این مرحله میزان نفوذ رطوبت از داخل قطره به سطح آن قادر نبوده است که شرایط اشباع را حفظ کند. از این رو یک لایه خشک در سطح قطره تشکیل می‌شود و با افزایش ضخامت آن نفوذ رطوبت از داخل به سطح قطره مشکل‌تر شده، شدت تبخیر افت می‌کند و شدت خشک شدن با یک روند نزولی پیش می‌رود. میزان انتقال جرم و گرما از قطره تابعی از دما، رطوبت و اندازه قطره، دما و رطوبت هوا و سرعت نسبی بین هوا و قطره می‌باشد. در این قسمت برای نوشتن معادلات جرم و انرژی، ابتدا بخار از میان یک محیط متخلخل خشک نفوذ می‌کند (فرض شده که پوسته وجود آمده یک محیط متخلخل است و از قوانین آن پیروی می‌کند). [۹] و سپس با نفوذ در هوا از قطره خارج می‌گردد. در طول این دوره میزان R_o ثابت است ولی میزان R_i با طول تبخیر و گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند. با توجه به فرضیات بالا معادلات انتقال جرم و انرژی برای قطره بصورت زیر نوشته خواهد شد.

۲-۴ معادلات انتقال جرم

نفوذ در پوسته کروی (با فرض اینکه یک محیط متخلخل است) [۱۱]

از این رو، خواهیم داشت:

$$\frac{dR_i}{dt} = \frac{0.333 R_o}{m_{L_o}^{\frac{1}{3}} m_L^{\frac{1}{3}}} \frac{dm_L}{dt} \quad (13)$$

m_L = جرم رطوبت (حلال) در داخل قطره دوغاب

m_{L_o} = مقدار رطوبت اولیه قطره در زمان آغاز مرحله دوم

مقدار $(C_{PL} m_L + m_{SK} C_{PS})$ میزان ظرفیت حرارتی هسته مرطوب را نشان می‌دهد (تشکیل شده از سوسپانسیون رطوبت (آب) و ذرات جامد) اگر فرض کنیم تبخیر میزان نسبت تخلخل قطره را تغییر نمی‌دهد می‌توان m_{sk} را از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$m_{sk} = \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^3 m_s \quad (17)$$

۲-۸ موازنه جرم و انرژی گاز خشک‌کننده

۲-۸-۱ موازنه جرم گاز خشک‌کننده

با محاسبه میزان نرخ تبخیر رطوبت از قطره و با داشتن شدت جریان گاز خشک‌کننده می‌توان به راحتی میزان افزایش رطوبت گاز خشک‌کننده را محاسبه کرد.

۲-۸-۲ موازنه انرژی گاز خشک‌کننده

همانگونه که قبلاً اشاره شد تبادل جرم و گرما بین هوا و قطره اتفاق می‌افتد. این تبادل موجب تغییرات در دما و رطوبت قطره و دما و رطوبت هوای داغ خشک‌کن می‌شود. در بخش پیشین، تغییرات دما و رطوبت قطره و همچنین تغییرات رطوبت گاز خشک‌کننده مورد بررسی قرار گرفت و معادلات حاکم بر آنها به دست آمد. حال در این بخش برای تعیین تغییرات دمای گاز خشک‌کننده رابطه موازنه انرژی بین هوا و قطره را می‌نویسیم. برای به دست آوردن چگونگی تغییرات دمای گاز، یک ارتفاع کوچک از خشک‌کن پاششی را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است که در حالت پایا تعداد قطرات در هر مقطع از ارتفاع با توجه به فاصله آن از اتومایزر مقدار ثابتی است. حال با توجه به اینکه تغییرات مقدار آنتالپی حجم گاز به دلیل ورود حلال تبخیر شده از سطح قطرات و انتقال گرمای ناشی از شیب حرارتی موجود بین سطح قطرات و دمای حجم گاز می‌باشد، بنابراین آنتالپی گاز خشک‌کننده با توجه به رابطه زیر و دمای مرجع قابل محاسبه است:

$$H_{g, \text{ref}} = C_{Pg} (T_g + 273) + [\Delta H_{ref} + C_{PV} (T_g - T_{ref})] y_g \quad (\text{Kj} / \text{Kg}) \quad (18)$$

۲-۶ معادله بدست آوردن دمای بیرونی قطره (T_o) و $[10]$

گرما ابتدا از طریق هوای محیط از طریق جابجایی به قطره منتقل می‌شود و پس از آن از طریق هدایت از لایه متخلخل می‌گذرد. با فرض اینکه قطره در حالت پایدار است چنین خواهیم داشت:

$$T_o = T_\infty - \frac{1}{\frac{h_c 4\pi R_o^2}{1} + \frac{R_o - R_i}{4\pi R_o R_i k_{ps}}} (T_\infty - T_i) \quad (14)$$

مقدار ضریب انتقال گرمای هدایتی در پوسته متخلخل (k_{ps}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]

$$k_{ps} = k_a \left(\frac{k_s}{k_a} \right)^{0.280 - 0.757 \text{Log} \zeta - 0.057 \text{Log} (Ks / Ka)} \quad (15)$$

که در رابطه (۱۴)، (ϵ_e) ، میزان تخلخل و k_{ps} ضریب انتقال گرمای هدایتی جامد و، K_a ضریب انتقال گرمای هوا (یا گاز خشک‌کننده) است.

۲-۷ معادله محاسبه دمای سطح داخلی پوسته متخلخل (T_i)

$$\frac{T_o - T_i}{\frac{1}{h_c \pi R_o^2} + \frac{R_o - R_i}{4\pi R_o R_i k_{ps}}} = -\Delta H - \frac{dm_L}{dt} + (C_{PL} m_L + m_{SK} C_{PS}) \frac{dT_i}{dt} \quad (16)$$

$$C_{Pg, wet} = \frac{(C_{Pg} + y_g \cdot C_{PV})}{(1 + y_g)} \quad (24)$$

نهایتاً رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{dT_g}{dt} = - \left[\frac{\Delta H_{ref} + C_{PV}(T_g - T_{ref})}{C_{Pg, wet} \cdot (1 + y_g)} \right] \frac{dy_g}{dt} + \frac{\Delta H_{ref} + C_{PV}(T_g - T_{ref}) \cdot w_D}{w_g \cdot C_{Pg, wet} \cdot (1 + y_g)} - \frac{h \cdot \pi d_p^2 \cdot (T_g - T_p)}{w_g \cdot C_{Pg, wet} \cdot (1 + y_g)} \quad (25)$$

۳- شبیه سازی

از آنجا که خشک کن پاششی مورد استفاده که بررسی‌های تجربی روی آن انجام شده است از نوع جریان همسو می‌باشد، لذا این نوع جریان در خشک کردن پاششی آلومین شبیه‌سازی گردید و نتایج شبیه‌سازی حالت همسو با نتایج حاصل از آزمایش با خشک‌کن پاششی موجود در آزمایشگاه مقایسه شده است. برای حالت همسو یک برنامه کامپیوتری نوشته شده که قادر است معادلات مدل مذکور را به صورت پشت سرهم حل کند و پروفایل‌های رطوبت، دما و سرعت و همچنین مدت اقامت، ارتفاع برج خشک‌کن، دمای هوای خروجی و دمای آلومین خروجی از خشک‌کن را ارائه نماید. آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا شرایط محیط خشک‌کن را تا حد امکان در یک مقدار رطوبت و دمای ثابت حفظ کرده ماده مورد آزمایش (دوغاب آلومین) را بعد از توزین، در زمان $t = 0$ در محیط خشک‌کن دستگاه آون قرار می‌دهیم. سپس بعد از هر فاصله زمانی ماده در حال خشک شدن را وزن کرده و مقدار آن را در مقابل زمان سپری شده ثبت می‌کنیم. توزین، تا زمانی ادامه می‌یابد که در چند فاصله زمانی آخر تغییرات در وزن نمونه مشاهده نشود. حال دمای محیط خشک‌کن را تا دمای $120^\circ C$ بالا برده، بعد از گذشت یک ساعت یا بیشتر، ماده خشک عاری از رطوبت را توزین و مقدار وزن خشک ماده (m_s) را به دست می‌آوریم. با توجه به تعریف مقدار X :

$$X = (\text{وزن ماده خشک}) / (\text{وزن ماده خشک} - \text{وزن ماده مرطوب})$$

و با داشتن t در مقابل هر X می‌توان مقدار $W = \frac{m_s}{A} \frac{\Delta X}{\Delta t}$ را محاسبه کرد.

همچنین آنتالپی بخار انتقال داده شده به حجم گاز از سطح یک قطره با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H_{بخار} = [\Delta H_{ref} + C_{PV}(T_p - T_{ref})] \cdot w_D \quad (19)$$

و میزان انتقال گرما از سطح قطرات به حجم گاز و یا بالعکس نیز با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q = h \cdot \pi d_p^2 \cdot (T_g - T_p) \quad (20)$$

بنابراین برای تغییرات آنتالپی حجم گاز در طول کوچک dx چنین خواهیم داشت:

$$w_g \frac{d(H_g)}{dt} = \sum_{i=0}^i N_i \cdot H_i - \sum_{i=0}^i N_i \cdot q \quad (21)$$

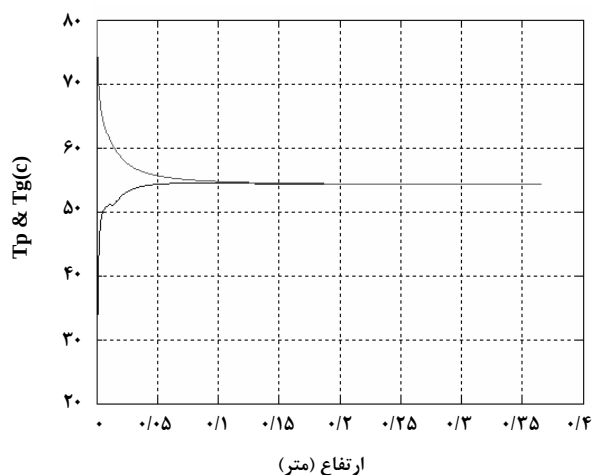
و برای یک قطره می‌توان تغییرات انرژی گاز خشک‌کننده را در هر لحظه با توجه به تغییرات انرژی محسوس و نرخ تبخیر قطره از رابطه زیر محاسبه کرد: [۱۳]

$$w_g \frac{d(H_g)}{dt} = (\Delta H_{ref} + C_{PV}(T_p - T_{ref})) w_D - h \cdot \pi d_p^2 (T_p - T_g) \quad (22)$$

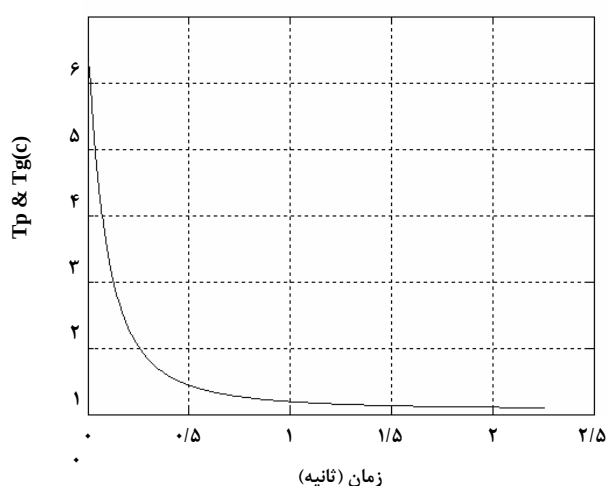
با مشتق‌گیری از رابطه (۱۸) بر حسب زمان چنین خواهیم داشت:

$$\frac{dH_g}{dt} = C_{Pg} \frac{dT_g}{dt} + [\Delta H_{ref} + C_{PV}(T_g - T_{ref})] \frac{dy_g}{dt} + y_g \left[C_{PV} \cdot \frac{dT_g}{dt} \right] \quad (23)$$

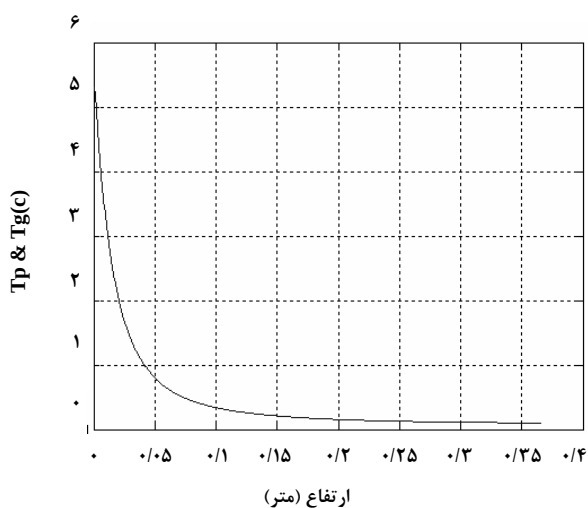
با جایگذاری از رابطه به دست آمده و با توجه به اینکه گرمای ویژه گاز مرطوب برابر است با:



نمودار ۲- تغییرات دمای گاز و قطره در مقابل ارتفاع

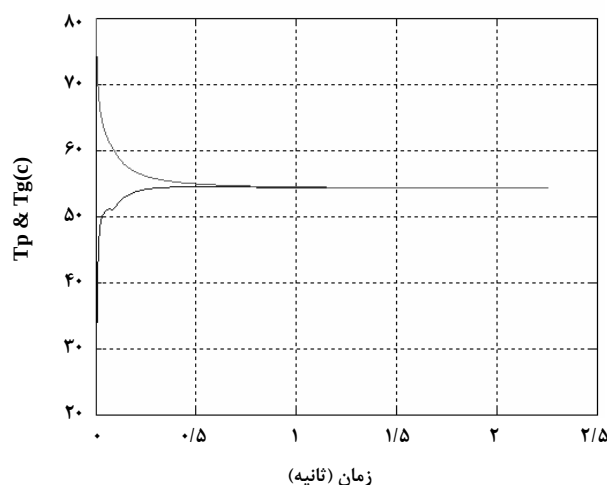


شکل ۳- تغییرات رطوبت ذره بر حسب زمان

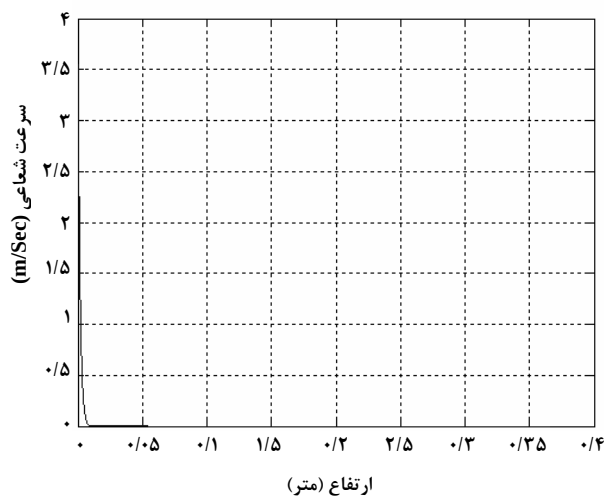


شکل ۴- تغییرات رطوبت ذره در مقابل ارتفاع

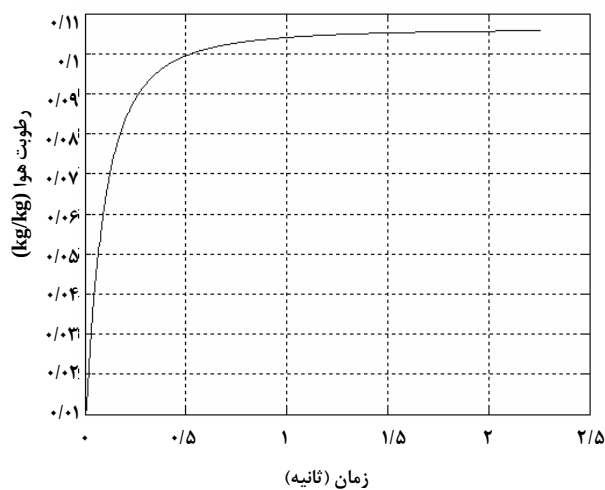
از جمله پارامترهای مهم در صحت آزمایش‌ها شرایط ثابت محیط (دما و رطوبت) و فاصله زمانی توزین است. علاوه بر آنها، نکته قابل توجه این است که اولاً ضخامت ماده خشک شونده خیلی زیاد نباشد که نفوذ مطرح شود و چندان کم نیز نباشد که در حین خشک شدن قسمتی از سطح خشک شده و قسمت دیگر هنوز مرطوب بماند که این مسأله باعث تغییر سطح خشک شونده می‌شود. معمولاً بعد از ارائه مدل پیش‌بینی رفتار یک فرایند لازم است که صحت مدل، خطای مدل و علل خطا مشخص شوند. همان‌طور که مشخص است برای بررسی صحت شبیه‌سازی انجام شده لازم است تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یک سری داده‌های تجربی تطبیق داده شود. برای این منظور اطلاعات به دست آمده از خشک‌کن پاششی با روش تجربی با داده‌های بدست آمده از نرم‌افزار طراحی شده تطبیق داده می‌شود. در جدول‌های (۱) و (۲) نتایج انجام آزمایشات مربوطه در دمای ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس آورده شده است. نرم‌افزار طراحی شده پس از دریافت ورودی‌های مورد نیاز، و با توجه به فاصله زمانی انتخاب شده شروع به حل معادلات می‌کند و در نهایت پروفیل‌های، دمای قطره و هوا، سرعت قطره، رطوبت هوا و قطره را در مقابل زمان و ارتفاع خشک‌کن در اختیار کار برقرار می‌دهد تا کاربر بتواند تجزیه و تحلیل‌های لازم را در مورد اطلاعات به دست آمده انجام دهد. این نرم‌افزار همچنین به کاربر امکان می‌دهد که در صورت نیاز پارامترهای کنترلی مربوطه را تغییر دهد تا به شرایط دلخواه برسد و یا در جهت حداقل‌رسانی به کار رود. نتایج حاصل از اجرای برنامه شبیه ساز کامپیوتری در دمای ۶۵ درجه سلسیوس توسط شکل‌های (۱) تا (۱۲) نشان داده شده است.



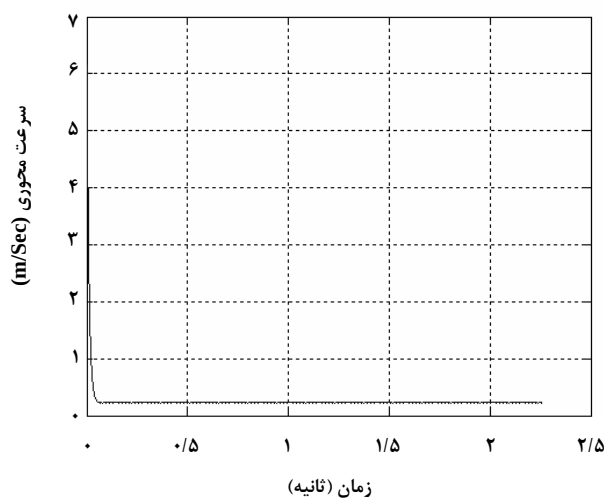
شکل ۱- تغییرات دمای گاز و قطره در مقابل زمان



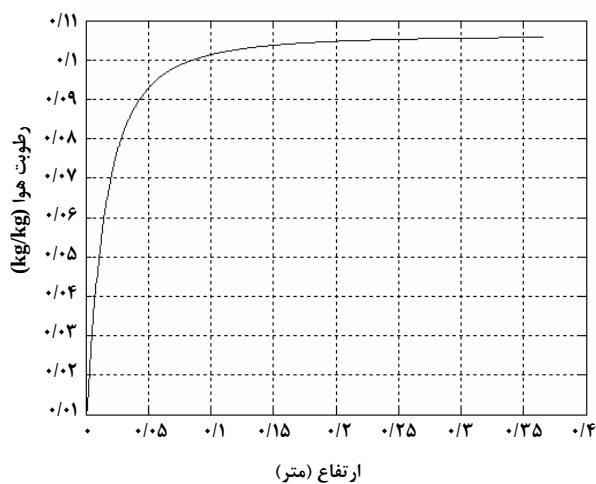
شکل ۸- تغییرات سرعت شعاعی ذره در مقابل ارتفاع



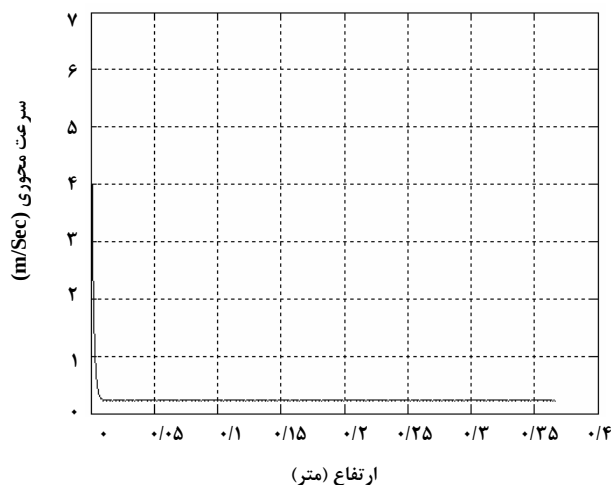
شکل ۵- تغییرات رطوبت هوا در مقابل زمان



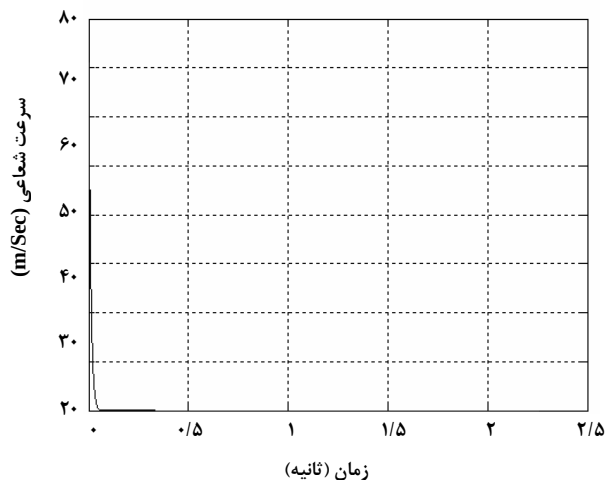
شکل ۹- تغییرات سرعت محوری ذره در مقابل زمان



شکل ۶- تغییرات رطوبت هوا در مقابل ارتفاع



شکل ۱۰- تغییرات سرعت محوری ذره در مقابل ارتفاع



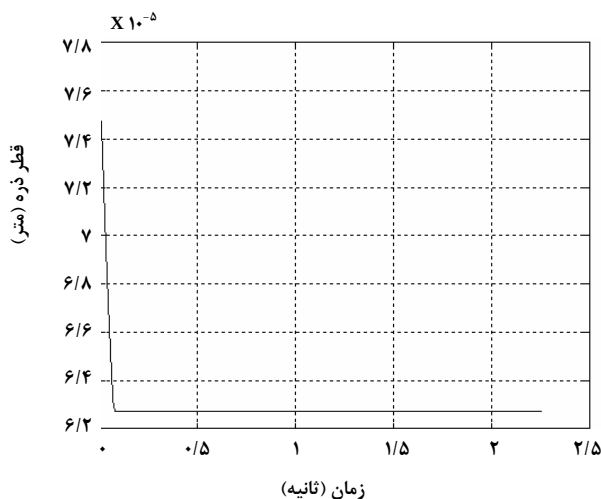
شکل ۷- تغییرات سرعت شعاعی ذره در مقابل زمان

۲- در آغاز شبیه‌سازی یا شروع تبخیر قطرات، به دلیل پائین بودن دمای قطرات (20°C) گرمای انتقال یافته از هوای گرم به قطرات، صرف افزایش دمای آنها می‌گردد، به همین دلیل در این زمان بسیار کوتاه، تغییر محسوسی در میزان رطوبت نسبی قطرات ایجاد نمی‌گردد. به همین دلیل در منحنیهای رطوبت نسبی قطرات مختلف در $0/1$ ثانیه اول شبیه‌سازی، یک خط کوچک مستقیم مشاهده می‌گردد که نشان از عدم تغییر رطوبت در قطره و در نتیجه عدم تغییر در قطر و چگالی قطرات دارد.

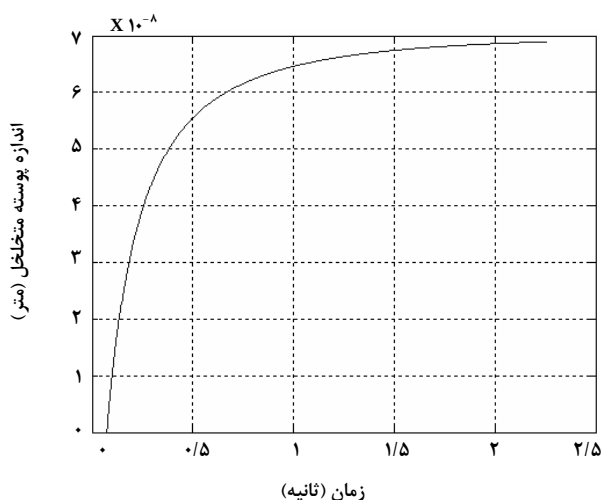
۳- افزایش اولیه شدیدی در منحنی‌های دمای قطرات مشاهده می‌شود که علت این امر همان وجود شیب حرارتی زیاد بین جریان گاز و سطح قطرات و همچنین بالا بودن ضریب انتقال گرمای کلی می‌باشد، اما در ادامه با کاسته شدن از مقدار شیب حرارتی موجود و ادامه یافتن تبخیر سطحی قطرات، دمای قطرات روند کاهش را خواهد داشت تا جایی که آنقدر این تبخیر سطحی ادامه پیدا می‌کند که رطوبت قطرات به مقدار رطوبت بحرانی خود نزدیک می‌شوند و انتقال گرمای همرفتی بین گاز و قطرات، کنترل کننده دمای قطرات خواهد بود.

۴- در این شبیه‌سازی به دلیل به دست آوردن منحنی خشک شدن قطرات و رطوبت بحرانی آنها، تبخیر قطرات در دو مرحله صورت پذیرفته است. در مرحله اول نرخ تبخیر با زمان ثابت بوده و شاهد کاهش یکنواختی در رطوبت نسبی قطرات خواهیم بود که این امر در منحنی‌های به دست آمده برای رطوبت نسبی قطرات در شکلهای مربوطه بخوبی مشاهده می‌گردد. پس از رسیدن رطوبت قطرات به رطوبت بحرانی، نرخ تبخیر قطرات با زمان کاهش پیدا خواهد کرد. زیرا از این مرحله به بعد پوسته جامدی بر سطح قطرات تشکیل می‌شود که با گذشت زمان ضخیم‌تر شده و نرخ تبخیر و رطوبت از قطرات به میزان نفوذ رطوبت از میان این پوسته جامد به سطح خارجی قطرات وابسته می‌گردد.

۵- مشاهده می‌شود که دمای هوای خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌ها در آزمایش ۱ حدود $54/27$ درجه سلسیوس است در حالی که در آزمایش این مقدار، $49/3$ درجه سلسیوس می‌باشد که حدوداً 5°C بیش از مقدار واقعی است و این اختلاف حدود 10% خطا را به همراه دارد و در آزمایش دوم نیز حدود خطا به همین میزان است که این خطا می‌تواند به این علت باشد که ما از اتلاف



شکل ۱۱- تغییرات قطر ذره در مقابل زمان



شکل ۱۲- تغییرات اندازه پوسته متخلخل با زمان

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در بررسی نمودارهای ترسیم شده می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- ۱- با ملاحظه چگونگی تغییرات دما و رطوبت گاز در طول محفظه خشک‌کن خواهیم دید که روند تغییرات به همان شکلی است که انتظار می‌رفت، یعنی تغییرات رطوبتی جریان گاز و یا همان هوا افزایش می‌یابد که به دلیل تبخیر شدن رطوبت قطرات و وارد شدن این رطوبت به جریان گاز، این روند افزایشی ملاحظه می‌گردد، همچنین روند تغییرات دمای گاز کاهش است، که این موضوع نیز به دلیل تأمین انرژی مورد نیاز برای تبخیر رطوبت قطرات از جریان گاز می‌باشد.

تفاوت به دلیل آن است که بازدهی عملیات خشک کردن، صددرصد فرض شده است، در حالی که در عمل به علت وجود بازدهی کوچکتر، طول بزرگتری مورد نیاز است. نتایج آزمایش‌ها برای دو دمای ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس در جدول‌های (۱) و (۲) جمع‌آوری شده است.

حرارتی در برج صرف‌نظر کرده‌ایم، ولی در عمل به دلیل وجود اتلاف حرارتی، دمای هوای خروجی پائین‌تر خواهد بود. ارتفاع برج از شبیه‌سازی حدوداً ۳۷/۷Cm به دست آمده است، در حالی که ارتفاع خشک‌کن پاششی آزمایشگاه ۴۰Cm است که این، اختلاف خطای ۶/۲٪ را به همراه دارد که می‌توان گفت این

$$m_s = 12.4 * 10^{-3} (kg), A = 9.498 * 10^{-3} (m^2)$$

جدول ۱- نتایج انجام آزمایش در دمای ۶۵ درجه سلسیوس

T (ثانیه)	X (کیلوگرم آب/کیلوگرم جامد خشک)	W*10E-4 (کیلوگرم بر مجذور ثانیه)
۰/۰۰	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰
۱۸۰۰	۹/۱۴۳	۳/۱۷۱
۳۰۰۰	۷/۴۶۰	۳/۴۰
۴۲۰۰	۵/۸۷۶	۳/۲۰
۵۴۰۰	۴/۳۴۵	۳/۰۹
۶۶۰۰	۲/۹۰۰	۲/۹۲
۸۴۰۰	۱/۵۴۶	۱/۸۲
۹۶۰۰	۰/۸۷۵	۱/۳۵
۱۰۸۰۰	۰/۵۹۸	۰/۵۶
۱۲۰۰۰	۰/۴۳۵	۰/۳۳
۱۳۲۰۰	۰/۳۴۵	۰/۱۸
۱۵۰۰۰	۰/۲۷۵	۰/۰۹
۱۶۲۰۰	۰/۲۳۴	۰/۰۸

$$m_s = 17.39 * 10^{-3} (kg), A = 9.765 * 10^{-3} (m^2)$$

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها در دمای ۷۵ درجه سلسیوس

T (ثانیه)	X (کیلوگرم آب/کیلوگرم جامد خشک)	W*10E-4 (کیلوگرم بر مجذور ثانیه)
۰/۰۰	۰/۳۲۱	-
۳۶۰۰	۵/۶۸۱	۳/۱۶۴۱
۷۲۰۰	۵/۰۴۹	۳/۱۲۴
۱۰۸۰۰	۴/۴۱۱	۳/۱۵۴۲
۱۴۴۰۰	۳/۷۷۵	۳/۱۴۴۳
۱۸۰۰۰	۳/۱۴	۳/۱۳۹۴
۲۱۶۰۰	۲/۵۷	۲/۸۱۸۰
۲۵۲۰۰	۲/۱۳	۲/۱۷۵۳
۲۸۸۰۰	۱/۷۹۹	۱/۶۳۶۴
۳۲۴۰۰	۱/۵	۱/۴۷۸۲
۳۶۰۰۰	۱/۲۷	۱/۱۴۲۰
۳۹۶۰۰	۱/۰۶۷	۰/۹۹۸۶
۴۳۲۰۰	۰/۸۹۶	۰/۸۴۵۴
۴۶۸۰۰	۰/۷۶۵	۰/۶۴۷۶
۵۰۴۰۰	۰/۶۷۸	۰/۴۳۰۱

فهرست نشانه ها

سرعت، سرعت نسبی قطره و هوا	U, U_{pf}		
رطوبت جسم جامد بر مبنای جامد خشک	X	سطح مقطع	A
کسر فضای خالی (Void fraction)	α	غلظت جرمی	c_v
تخلخل	ε	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت	C_p
گرمای نهان تبخیر آب	$\lambda, \Delta H_{lv}$	ضریب دراگ (کشش)	C_D
چگالی	ρ	ضریب نفوذ بخار در پوسته متخلخل	D_C
		ضریب نفوذ بخار آب در هوا	D_v
		قطر قطره	d_p
		شتاب جاذبه زمین	g
		ضریب انتقال گرمای جابجایی	h_c
		ضریب جرمی انتقال جرم	k_m
		ضریب انتقال گرمای هدایتی هوا	k_a
		ضریب انتقال گرمای هدایتی پوسته	k_{ps}
		ضریب انتقال جرم (بر مبنای رطوبت)	k_g
		جرم	m
		جرم جسم جامد در کره مرطوب	m_{sk}
		جرم مولکولی	M
		فشار	P
		فشار بخار	P_v
		شعاع قطره	R_p
		شعاع داخلی و خارجی پوسته متخلخل	R_i, R_o
		سطح قطرات	S
		زمان	t
		دما	T
		دمای میانگین	T_{ave}
		حجم مایع داخل قطره	V_l
		حجم جامد داخل قطره	V_s

مراجع

- [1] Robert H. Perry, Cecil H & Others, "Chemical Engineer's Handbook", 4th Ed, McGraw-Hill Pub, (1963).
- [2] <http://en.wikipedia.org>
- [3] <http://www.Alumina-Jajarm.ir>
- [4] Masters.K, "Spray Drying Handbook", 5th Ed, Longman Scientific & Technical, England Pub, (1991).
- [5] Donald E., Etal, "Spray Drying Apparatus And Method Of Use", U.S. Patent, No20030037, Feb 27, (2003)
- [6] Satoshi Tanaka, Zenji Kato, Nozomu Uchida and Keizo Uematsu, "Direct Observation of Aggregates and Agglomerates in Alumina Granules", *J. Powder Technology Vol.129*, PP.153-155, January (2003).
- [7] H.Liang, K.Shinohara, H.Minoshima, K.Matsushima, "Analysis of Constant Rate Period of Spray Drying of Slurry", *J. Chem. Eng. Sci.*, Vol. 56, PP. 2205-2213, (2001).
- [8] Siebold, A., Walliser, A., Nardin, M., Oppliger, M., & Schultz, J, "Capillary Rise for Thermodynamic Characterization of Solid Particle Surface". *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.186, (2001).
- [9] M.Kadja, G.Bergeles, "Analysis of Constant Rate Period of Spray Drying of Slurry", *J.Chem.Eng.Sci*, Vol.56, PP.829-844, (2003).
- [10] P.K.Wang, H.R. Pruppacher, "Acceleration to Terminal Velocity of Cloud and Raindrops", *J. Appl. Meteorol.*, Vol.16, PP.275-280, (1977).
- [11] S. Whitaker, "Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: a Theory of Drying", J.P.Hartnet, T.F. Irvine Jr. (Eds.), *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, Academic Press, New York, PP. 119-203, (1977).
- [12] R. Krupitczka, "Analysis of Thermal Conductivity in Granular Materials", *J. Int. Chem. Eng.*, Vol. 7, PP.122-144, (1967).
- [13] Negiz.A, Erics, Lagergren And Cinar, "Mathematical Models Of Co Current Spray Drying", *J.Industrial & Eng.Chem.Research*, Vol. 34, No. 10, PP 3289-3202, (1997).