

## مدلسازی دیفرانسیلی مکانیسم خشک کردن مواد دوغابی و شبیه سازی عملکرد خشک کن افشانه ای

محمد مهدی منتظر رحمتی

دانشیار گروه مهندسی شیمی- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

سید حسین قافله باشی

فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی شیمی- دانشکده فنی-

دانشگاه تهران

### چکیده

کنترل خشک کن افشانه ای که اغلب در مرحله پایانی تولید محصول بکار می رود، جهت تولید محصول با کیفیت استاندارد بسیار مهم و ضروری است. بدین منظور پیش بینی چگونگی تغییر پارامترهای کیفی محصول با تغییرات شرایط محیطی و عملیاتی پیشنهاد طراحی یک سیستم کنترلی مناسب است. با استفاده از مدلسازی فرایند های انتقال جرم و انتقال حرارت و مکانیسم خشک شدن ذرات پاشیده شده کار شبیه سازی سیستم خشک کن پاششی انجام شده است. معادلات مدل در دو بخش ماکروسکپی و میکروسکپی ارایه می شود. در مبحث انتقال مومنت تنها از نتایج تحقیقات گذشته استفاده شده است. مجموعه معادلات مدلسازی به کمک روشهای عددی حل شده و برنامه شبیه سازی نیز با استفاده از نرم افزار Visual C++ 6.0 برنامه نویسی شده است. نتایج حاصل از مدل با داده های تجربی تطابق خوبی را نشان می دهد.

### واژه های کلیدی:

دوغاب، خشک کن افشانه ای، مدلسازی دیفرانسیلی، پودر، ذرات ریز، هوای داغ، قطره پاشیده شده، افشانک

### 1- مقدمه

فراگیر شده و خشک کن افشانه ای بعنوان یک واحد کلیدی و تعیین کننده در فرایند تولید مورد توجه مهندسان شیمی قرار گیرد. از این رو مدلسازی فرایند و انطباق مدل با واقعیت های سیستم منجر به شبیه سازی خشک کن افشانه ای خواهد شد که نتایج آن جهت استفاده در سیستم های کنترلی یا طراحی اولیه و نهایی یک دستاورد مهم و ضروری بنظر می رسد. در کارهای گذشته اکثرا مدلسازی خشک کن پاششی از نوع همسو (Cocurrent) انجام شده است [2],[4],[10].

خشک کن افشانه ای یکی از معمولترین واحدهای عملیاتی است که معمولا در پایان خط تولید یک محصول بکار می رود. این واحد عملیاتی، در صنایع مختلف از محصول دوغابی شکل ذرات جامد پودری تقریبا یکدست و هم اندازه (۱۰-۵۰۰ میکرون) با درصد رطوبت ۵-۱۲٪ بدست می آید. ویژگیهای ممتاز این نوع خشک کن باعث شده که دامنه کاربرد آن در صنایع غذایی، دارویی، شوینده، کاتالیزور های صنعتی و ... که محصولات بصورت پودر می باشند به سرعت

شکل 1- نمای شماتیک خشک کن پاششی

از پایین برج با دمای  $285^{\circ}\text{C}$  و  $310$  و سرعت جریان حجمی  $m^3/hr$  وارد برج شده و از بالای برج با دمای  $110^{\circ}\text{C}$  -  $90^{\circ}\text{C}$  خارج می شود. ۱۵ اتمایزر از نوع افشانکهای تحت فشار در دو طبقه در قسمت بالای برج تعبیه شده است. ماده خشک شونده خمیر شوینده بشکل دوغاب بوده که با رطوبت ۴۰٪ وارد افشانکها شده و بداخل برج پاشیده می شود و پس از خشک شدن بصورت دانه های پودری با رطوبت ۷-۹٪ جمع آوری می شود. در جریان هوای خروجی از بالای برج مقداری ذرات پودر بصورت دانه های ریز خارج می شود که جهت جداسازی آنها از ۱۶ سیکلون استفاده می شود.

### 3- مدلسازی

مهمترین مشکل خشک کن افشانه ای تعداد زیاد پارامترهای عملیاتی سیستم است. با تغییر یکی از شرایط محیطی یا عملیاتی، تعداد زیادی از پارامترهای سیستم بطور پیوسته تغییر خواهد کرد.

### 3-1 مفروضات مدلسازی

1- ذرات موازی دیواره های خشک کن حرکت می کنند. [2] 2- قطر ذره پاشیده شده کروی شکل طی زمان خشک کردن تغییرات ناچیزی دارد که عملاً می توان آن را با قطر پودر پایین برج برابر دانست چرا که بیشینه تغییرات قطر از دهانه افشانک تا انتهای برج فقط چیزی در حدود 12٪ است.

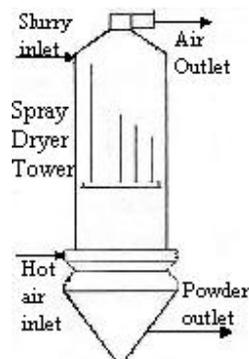
در آنها جریان ذرات پاشش شده فقط در یک جهت بوده است، اما در مدل مورد بررسی ما چون سیستم از نوع Counter current است همانطور که در ادامه توضیح داده میشود ذرات اسپری شده در دو جهت مخالف جریان خواهند داشت.

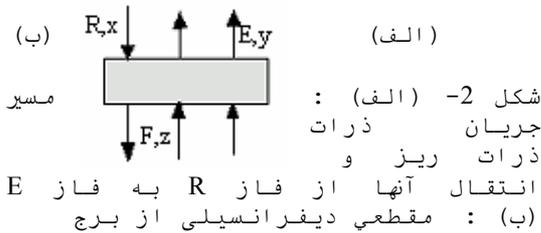
در این مقاله پس از آشنایی با این واحد عملیاتی یک مدل ریاضی برای توضیح عملکرد این سیستم ارائه می شود. نزدیکی نتایج حاصل از این تحقیق با داده های

عملیاتی خشک کن افشانه ای که در مقیاس صنعتی جهت تولید پودر های شوینده بکار می رود، نشان می دهد که می توان از این مدل در طراحی و شبیه سازی سیستم های مشابه استفاده کرد.

### 2- معرفی خشک کن افشانه ای

خشک کن افشانه ای مورد مطالعه، یک برج خشک کن افشانه ای صنعتی، فعال در واحد تولید پودر شوینده است. ابعاد این خشک کن به گونه ایست که بدرستی می توان آن را " برج خشک کن افشانه ای" نامید. ارتفاع این برج ۳۸ متر، ارتفاع فعال برج ۳۰ متر و قطر داخلی آن ۷ متر است. ضخامت جداره بتنی آن ۵m / ۰ است و ظرفیت عملی آن 18 ton/hr دوغاب در ورودی و 12 ton/hr پودر خروجی در پایین برج است. برج بصورت موازی و ناهمسو کار می کند و هوای ورودی





7- فرض دیگری که در نوشتن معادلات مدل از آن استفاده شده این است که برج با محیط اطراف تبادل گرمایی نداشته و به اصطلاح بصورت آدیاباتیک کار می کند.

این فرض با وجود ضخامت  $m$  0/5 دیواره برج محتمل بنظر می رسد، هرچند هر فرضی غیر از این فقط تعدادی عدد ثابت را به معادلات مدل اضافه می کند و دشواری را باعث نمی شود.

8- رژیم جریان هوای داغ درون محفظه خشک کن جریان قالبی ( Plug flow ) است؛ یکی از پارامترهای موثر درمدلسازی عملکرد یک خشک کن افشانه ای پیش بینی رفتار جریان سیال در داخل محفظه خشک کن است که علیرغم پیچیدگی های آن می توان به این مهم دست یافت. طی چند دهه اخیر تحقیقات زیادی در این مورد انجام شده است. [5]

طبق آزمایش های انجام شده مقادیر سرعت در موضع ورودی هوای داغ (پایین برج) در قالب یک پروفایل تقریباً سهموی رفتار می کند و می توان یک توزیع سرعت متقارن را حول محور مرکزی متصور شد. سرعت در این ناحیه از  $0/75 \text{ m/sec}$  در نزدیکی جداره برج، تا حدود  $2 \text{ m/sec}$  در محور مرکزی متغیر است. بتدریج که

3- ذرات پاشیده شده بهم نمی پیوندند و کلوخه نمی شوند؛ یعنی اینکه می توانیم جریان پودر را بصورت مجموعه ای از دانه های کروی با قطر مشخص  $d_p$  در نظر گرفت. [12]

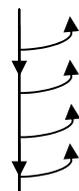
4- خواص فیزیکی از جمله چگالی پودر تابع ارتفاع برج بوده و در هر مقطع مقدار خاص خود را دارد.

5- در داخل ذرات تغییر دما وجود ندارد ولی رطوبت در راستای شعاع ذرات کروی متغیر است.

6- جریان داخل برج سه فازی است به گونه ای که در ابتدا جریان هوای داغ که بسمت بالا می رود (E) و ذرات پاشیده شده که بسمت پایین حرکت می کنند (R) در دو جهت مخالف حرکت می کنند، بتدریج که از افشانکها به سمت پایین برج حرکت می کنیم جریان سومی بنام جریان ذرات ریز (F) برقرار می شود که علت آن تغییر ساختار مورفولوژی ذرات پودر جریان فاز R بر اثر نفوذ رطوبت بهنگام تبخیر است. [9]

همچنین تبخیر آب از ذرات پاشیده شده باعث می شود چگالی این ذرات در طول برج روند نزولی داشته باشد. کسری از ذرات چگالی ای کمتر از حداقل چگالی شناوری در ارتفاع  $Z=L$  (که در آن سرعت هوا مقدار معینی دارد) خواهند داشت، وبنابراین پدیده انتقال ذرات

از فاز R (پایین رونده) به فاز F (بالا رونده) انجام خواهد شد و مسیر واقعی جریان قطرات پاشیده بشکل زیر خواهد بود.



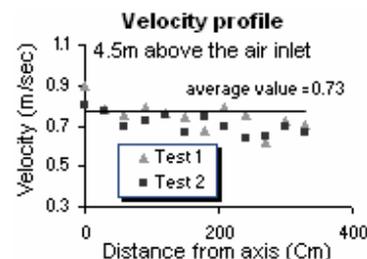
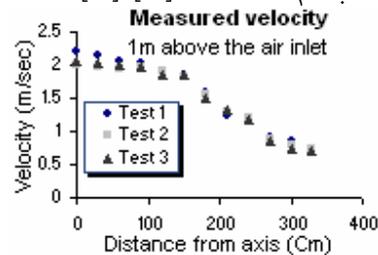
کردن برای جریان دوغاب پاشیده شده و جریان هوای داغ مدل شود. شرایط حاکم بر سیستم اینگونه اقتضا می کند که سه جریان متفاوت را در سه فاز جدا در نظر بگیریم:

۱- جریان هوای داغ که از پایین به بالا می رود ۲- جریان دوغاب پاشیده شده که از بالای برج به سمت پایین می آید  
 3 - جریان ذرات پودر همراه هوای داغ که به سمت بالا می رود (به این جریان ، جریان ذرات ریز می گوییم)  
 از آنجائیکه سیستم خشک کن افشانه ای یک سیستم دیفرانسیلی است می توان المانی از برج را مانند شکل (2-ب) تصور کرد و معادلات موازنه جرم و انرژی را برای مقطع dl نوشت. مطابق فرض انجام شده در قسمت (1-3) پدیده انتقال ذرات از فاز R به فاز F در طول برج اتفاق می افتد. تابع FTR یا (Fine Transfer Rate) تابعی است که بیانگر سرعت انتقال ذرات از فاز R به فاز F در واحد حجم برج است. FTR کیلوگرم ذرات منتقل شده را در واحد زمان در واحد حجم خشک کن محاسبه می کند و تابعی است از مکان (هر موضع از برج)، سرعت جریان پاشش در بالای برج ، سرعت جریان هوای ورودی از پایین برج و اندازه ذرات پاشیده شده که، روابط این تابعیت در قسمت (ج-3-3) توضیح داده می شود. حال به مرحله ای رسیده ایم که می توان با توجه به شکل ۴ معادلات مدلسازی را نوشت.

1- موازنه جرم برای هوای خشک :

بسمت بالای برج حرکت می کنیم شکل پروفایل سرعت بشکل پروفایل قالبی تغییر می کند. به فاصله 3 m از مقطع ورودی هوا تنها 20% اختلاف در مقدار سرعت نزدیک به جداره با سرعت محور مرکزی وجود دارد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است از فاصله 4/5 متری با تقریب خوبی سرعت در همه نواحی یکسان است و می توان جریان داخل برج را پلاگ فرض کرد.

آنچه که از نتایج مطالعات دینامیک سیال برای خشک کنهای بلند در مقیاس صنعتی جهت انجام مدلسازی مفید بوده و بکار می رود این است که جریان داخل برج را می توان با تقریب خوبی مطابق با الگوی رژیم جریان قالبی (plug flow) فرض کرد و مدلسازی فرایند را بر این اساس انجام داد. [6] [2]



شکل ۳- پروفایل سرعت در دو مقطع برج

### 3-2) مدلسازی ماکروسکپی

منظور از شرایط ماکروسکپی حالتی است که عملیات خشک

$$(7) \quad \frac{d}{dl}(E.C_{Pa}(T_a - T_0)) = h.S.a.(1 - \phi)(T_a - T_S)$$

8- بیان انرژی برای کل المان:

$$F.C_{Ps}(T_a - T_0)|_{l+dl} - F.C_{Ps}(T_a - T_0)|_l + R.C_{Ps}(T_S - T_0)|_l - R.C_{Ps}(T_S - T_0)|_{l+dl} + E.C_{Pa}(T_a - T_0)|_{l+dl} - E.C_{Pa}(T_a - T_0)|_l = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dl}(F.C_{Ps}(T_a - T_0)) - \frac{d}{dl}(R.C_{Ps}(T_S - T_0)) + \frac{d}{dl}(E.C_{Pa}(T_a - T_0)) = 0$$

(8)

معادلات مدل بدست آمده را باید در قالب یک دستگاه معادلات دیفرانسیل 8 تایی و البته با روشهای عددی حل کرد. در این دستگاه معادلات هدف، مشخص کردن پارامتر سیستم بعنوان مجهولات معادلات دیفرانسیل است. با استفاده از روش رانج-کوتای مرتبه چهار و نیز شرایط مرزی  $x, F, E, R$  موجود، پارامترهای  $z, T_a, y$  که مجهولات دستگاه  $T_S$  و  $T_a$  و  $z, y$  معادلات دیفرانسیل اند در تمامی مقاطع برج مشخص خواهند شد. شرایط مرزی را مقادیر پارامترهای هشتگانه در بالای برج در

نظر گرفته می شود و از حل معادلات فوق تابعیت هرکدام از این پارامترها بر حسب ارتفاع برج بدست می آید. تنها مساله موجود در حل این دستگاه معادلات مقادیر چهار کمیت  $N_A$  و  $N'_A$  و  $FTR$  و  $h$  است که خود تابعی از شرایط سیستم می باشند.

### 3-3) مدلسازی میکروسکپی

منظور از مدلسازی میکروسکپی مدل کردن پدیده های انتقال جرم، انتقال گرما و

$$E(1 - y)|_{l+dl} - E(1 - y)|_l = 0 \quad \Rightarrow \frac{d}{dl}(E(1 - y)) = 0 \quad (1)$$

2- موازنه جرم برای پودر در فاز R:

$$R(1 - x)|_l - R(1 - x)|_{l+dl} - FTR.dl.(1 - x) = 0$$

$$\frac{d}{dl}(R(1 - x)) = -FTR(1 - x) \quad (2)$$

3- موازنه جرم برای پودر در فاز F:

$$F(1 - z)|_{l+dl} - F(1 - z)|_l + FTR.dl.(1 - x) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dl}(F(1 - x)) = -FTR(1 - x) \quad (3)$$

4- موازنه جرم برای رطوبت همراه پودر در فاز R: [8]

$$R.x|_l - R.x|_{l+dl} - FTR.dl.x - N_A.S.dl.(1 - \phi).a.M = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dl}(R.x) = -(FTR.x + N_A.S.(1 - \phi).a.M)$$

5- موازنه جرم برای رطوبت همراه پودر در فاز:

$$F.z|_{l+dl} - F.z|_l + FTR.dl.x - N'_A.S.dl.(1 - \phi').a'.M = 0$$

$$\frac{d}{dl}(F.z) + FTR.x - N'_A.S.(1 - \phi').a'.M \quad (5)$$

6- موازنه جرم برای رطوبت همراه هوا:

$$E.y|_{l+dl} - E.y|_l + N_A.S.dl.(1 - \phi).a.M + N'_A.S.dl.(1 - \phi').a'.M = 0 \quad \Rightarrow \frac{d}{dl}(E.y) = -S.M.(N_A.(1 - \phi).a + N'_A.(1 - \phi').a')$$

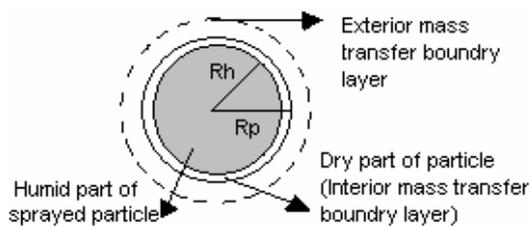
7- بیان انرژی: برای پدیده انتقال گرما

$$E.C_{Pa}(T_a - T_0)|_{l+dl} - (E - [(N_A.(1 - \phi).a + N'_A.(1 - \phi').a')S.dl.M])C_{Pa}(T_a - T_0)|_l = h.S.dl.(1 - \phi).a.(T_a - T_S) \quad \Rightarrow$$

چون

$$E \gg [(N_A.(1 - \phi).a + N'_A.(1 - \phi').a')S.dl.M]$$

پدیده انتقال جرم از طریق نفوذ رطوبت از داخل مجاری موجود در ساختمان ذره پودر اتفاق می افتد. [10] برای دستیابی به مقادیر شار در فاز R و F موازنه جرم برای جزء A (آب) روی یک ذره پاشیده شده درون لایه انتقال جرم داخلی نوشته می شود:



شکل 4- نمای دیفرانسیلی از ذره پاشیده شده

$$N_A \cdot A_r|_r - N_A \cdot A_r|_{r+dr} = 0$$

$$\frac{d}{dr}(4\pi r^2 \cdot N_A) = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dr}(r^2 N_A) = 0 \quad (9) \Rightarrow$$

$$r^2 \cdot N_A = K_1 \quad (10)$$

با توجه به اینکه مکانیسم انتقال جرم از طریق پدیده نفوذ می باشد:

$$N_A = -C \cdot D_e \cdot \frac{dx_A}{dr} \quad (11) \quad \Rightarrow$$

$$-C \cdot D_e \cdot \frac{dx_A}{dr} = \frac{K_1}{r^2} \quad (12)$$

این معادله دیفرانسیل را می توان با در نظر گرفتن دو شرط مرزی حل کرد.

شرط مرزی اول:  $r = R_p$  @  $Y$

شرط مرزی و  $x_A =$

دوم:  $r = R_h$  @  $x_A = x_A^*$

پدیده شناور شدن و انتقال ذرات جامد از فاز R به فاز F است. آنچه که با این سه پدیده در ارتباط است کمیتهای  $N'_A$ ،  $N_A$ ،  $FTR$  و  $h$  می باشند که درحل معادلات مدلسازی فرایند مورد نیاز اند.  $N'_A$  و  $N_A$  تاحد زیادی مشابه بوده و می توان مدلسازی  $N'_A$  را انجام داد و با اعمال تغییراتی  $N'_A$  را هم مدل کرد.  $h$  یا ضریب انتقال حرارت تابعی از سرعت و شرایط فیزیکی سیال و ذره پودر است که می توان آنرا نیز بصورت یک رابطه همبستگی (correlation) ارائه کرد. از آنجاییکه ذرات بسیار کوچک بوده و مقدار رطوبت سطحی در برابر رطوبت قطره پاشیده شده بسیار ناچیز است و دمای کمینه برج نزدیک به دمای جوش آب می باشد می توان سینتیک خشک شدن را فقط تحت تاثیر نفوذ رطوبت از درون جسم در نظر گرفت. [1] این مساله با نتایج بدست آمده برای سینتیک خشک شدن نیز اثبات می شود.

### 3-3 الف) شار مولی انتقال

#### رطوبت از پودر $N_A$

در معادلات مربوط به مدلسازی فرایند که در قسمت قبل ارائه شد منظور از  $N_A$  مقدار شار مولی انتقال جرم برای آب از سطح خارجی ذره پاشیده شده است ( $N_A = N_A|_{r=R_p}$ ). فرض کلی که باید در تمام این بخش از مدلسازی در نظر داشت این است که تمام ذرات پاشیده شده دارای یک قطر مشخصه که معادل قطر متوسط ذرات پاشش شده است می باشد. از طرفی

رابطه (15) مقدار  $N_A$  بصورت تابعی از  $x$  شود.  
از تعریف کسر جرمی رطوبت داریم:

$$x = \frac{m_{hp}}{m_{hp} + m_{dp}}$$

$$m_{dp} = \frac{(1-x)}{x} m_{hp} \quad (16-الف) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow$$

$$m_{dp} = \frac{(1-x)}{x} (4/3 \pi \cdot R_h^3 \cdot \phi_p \cdot \rho_w) \quad (16-ب)$$

که از این رابطه می توان  $R_h$  را - بشرط اینکه  $m_{dp}$  داشته باشیم - برحسب درصد رطوبت قطره بدست آورد.  

$$R_h = \sqrt[3]{m_{dp} \frac{x}{(1-x)} \times \frac{3}{4\pi\phi_p\rho_w}} \quad (17)$$

$$m_{dp} = m_{p0} \times (1 - x_0)$$

که در آن، جرم قطره پاشیده شده قبل از آغاز انتقال جرم و حرارت در تماس هوا (یعنی بلافاصله پس از خارج شدن از نازل اتمایزر) با  $m_{p0}$  نشان داده شده است و مقدار  $x_0$  "رطوبت دوغاب اولیه" همان رطوبت فاز  $R$  در مقطع  $L=0$  (بالای برج) است.  

$$\rho_s \cdot 4/3 \pi \cdot R_p^3 = m_{p0} \quad (18)$$

مقدار چگالی دوغاب پاشیده شده ( $\rho_s$ ) و رطوبت آن ( $x_0$ ) جزو شرایط مرزی معلوم در ابتدای برج است، در نتیجه  $m_{dp}$  فقط وابسته به  $R_p$  است.  
 $R_p$  با استفاده از رابطه تجربی مربوط به افشانه‌های تحت فشار که در قسمت (4) ارائه شده است با معلوم بودن فشار پاشش

شرط مرزی اول این نکته را یادآوری می کند که در انتهای مسیر نفوذ، رطوبت همان رطوبت هوای اطراف

است و می توان  $x_A$  را مساوی با  $Y$  (کسر مولی رطوبت هوا) فرض کرد. در مورد شرط مرزی دوم منظور این است هوای موجود در ابتدای مسیر نفوذ در دمای  $T_S$  از بخار آب اشباع شده است.

$$C \cdot D_e \cdot x_A = \frac{K_1}{r} + K_2$$

$$K_1 = \frac{C \cdot D_e \cdot R_h \cdot R_p}{(R_h - R_p)} (Y - x_A^*) \quad (13)$$

$\Rightarrow$  با جایگذاری این مقدار در رابطه (10) داریم:

$$N_A = \frac{C \cdot D_e \cdot R_h \cdot R_p}{(R_p - R_h) r^2} (x_A^* - Y) = f(r) \quad (14)$$

از این رابطه تابعیت چگونگی  $N_A$  نسبت به  $r$  مشخص شده است. حال می توان  $N_A = N_A|_{r=R_p}$  که هدف اصلی این بخش بود را محاسبه کرد:

$$N_A|_{r=R_p} = \frac{C \cdot D_e \cdot R_h}{(R_p - R_h) \cdot R_p} (x_A^* - Y) \quad (15)$$

پارامترهای  $x_A^*$  و  $C$  در هر مقطع از برج با داشتن  $T_S$  معلوم خواهد شد، تنها پارامترهای مجهول باقیمانده  $D_e$  و  $R_h$  است که در ادامه بررسی می شود.

### تخمین شعاع مرطوب ذره $R_h$ :

$R_h$  شعاعی از قطره پاشیده شده است که در ابتدای مسیر نفوذ است. در این قسمت هدف ارائه تابعیت  $R_h$  برحسب  $x$  است تا با جایگذاری آن در

یا بطور تقریبی  $D_e = 0.13D_{AB}$  است که a در رابطه (19) شامل ضریب تصحیح 0/13 نیز خواهد بود. [13]

### 3-3-ب) شار مولی انتقال رطوبت از ذرات ریز $N'_A$

در مورد انتقال جرم از ذرات ریز روش مدلسازی دقیقا مشابه کار انجام شده برای ذرات پودر است با این تفاوت که در روابط ارائه شده قسمت (3-3-الف) بجای  $x_A$  از  $z_A$  و بجای  $x$  از  $z$  و بجای  $x_A^*$  از  $z_A^*$  و بجای  $R_p$  از  $R'_p$  استفاده می شود که منظور از  $z_A^*$  کسر جرمی هوای اشباع در دمای  $T_a$  است.

### 3-3-ج) تابع انتقال ذرات ذرات ریز FTR

پدیده انتقال ذرات از فاز R به فاز F هنگامی اتفاق می افتد که سرعت ذرات به سرعت حدی (terminal velocity) برسد، زیرا در این حالت ذره پاشیده شده در هوای گرم بحالت معلق در می آید و اگر به اندازه dl بسمت پایین حرکت کند نیروی بازدارنده (retarding force) بیش از نیروی گرانشی آن شده، ذره بسمت بالا حرکت کرده و به فاز F منتقل می شود. اگر یک ذره در مقطعی از برج به سرعت حدی رسیده باشد، داریم:

$$(21)$$

$$u_t = u_{Powder} - u_{air}$$

که در آن  $u_t$  از رابطه زیر بدست می آید.

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p \cdot (\rho_p - \rho)g}{3C_d \cdot \rho}} \quad (22)$$

البته با این فرض که فاصله ذرات از یکدیگر و جداره خشک

اتمایزر مقدار معلومی خواهد داشت.

### تخمین ضریب نفوذ $D_e$ :

ضریب نفوذ موثر آب در داخل ذره، تابع ضریب نفوذ بخار آب در توده هواست که با دما تغییر می کند. ابتدا تابعیت این کمیت نسبت به دما مورد بررسی قرار می گیرد، بدین جهت رابطه ای بشکل (19)  $D_{AB} = a.T_S^b$  در نظر گرفته و از آن در معادلات مدلسازی استفاده خواهد شد. در نفوذ گازها Knudsen مقدار 0/5 را برای b توصیه می کند. [13] روش بدست آوردن a و b در قسمت (5) آورده شده است اما تذکر دو نکته در مورد ضریب نفوذ ضروری است:

- 1- ضریب تصحیح  $\epsilon_p$  برای دستیابی به مقدار واقعی سطح انتقال جرم در  $D_{AB}$  ضرب می شود که مقدار عددی این ضریب معمولا بین 0/35-0/45 است. [13]
- 2- نکته دوم اینست که مسیر نفوذ رطوبت در داخل ذره احتمالا مسیروستقیمی نخواهد بود و چون معادلات

مدل میکروسکپی در راستای مسیر مستقیم شعاع نوشته شد، لازم است که یک ضریب دیگر جهت تصحیح این فرض در  $D_{AB}$  ضرب شود. این ضریب با  $\tau$  نشان داده می شود که مقدار تقریبی آن بعنوان نمونه 3/0 است.

در نهایت ضریبی که بعنوان ضریب نفوذ موثر در معادلات مدلسازی از آن استفاده می شود عبارتست

$$D_e = \frac{D_{AB} \cdot \epsilon_p}{\tau} \quad (20)$$

شده معلوم باشد، در مقطع  $l=L$  از برج  $d_{fine}$  مشخص است، اگر در مش بندی جریان پاشیده شده اندازه مش مساوی با  $d_{fine}$  وجود داشت، FTR معادل حاصلضرب سرعت جریان پودر در درصد فراوانی آن اندازه مش خواهد بود. اما جهت ساده سازی مدل سیستم می توان فرض کرد عمده توزیع اندازه ذرات اسپری شده در قالب مش های 20 و 60 و 80 و 100 طبقه بندی شده و از سایر اندازه مش ها صرفنظر کرد. در نتیجه مقدار FTR توسط برنامه کامپیوتری، اینگونه محاسبه می شود:

$$l=L \xrightarrow{\text{from eq (21), (22)}} d_{fine} = f(l)$$

Mesh  $(d_{20}, d_{60}, d_{80}, d_{100})$   
 $\xrightarrow{\text{if } d_{fine}=d_i}$  FTR= R .  $P_i$   
 otherwise: FTR= 0 (23)  
 که  $P_i$  درصد فراوانی مش با قطر  $d_i$  است.

$P_i$  تابعی از فشار پاشش نازلهاست که روابط مربوط به این تابعیت در شکل (5) آمده است. فرض مهم روابط بالا این است که تابعیت FTR به گونه ایست که در مقاطع خاصی از برج مقدار غیر صفر دارد و در اکثر مقاطع مقدار آن صفر است بدین معنی که انتقال ذرات از فاز R به فاز F در برخی نقاط خاص از سیستم اتفاق می افتد.

#### 4- رابطه عملکرد اتمایزر (افشانک تحت فشار)

در مدلسازی ماکروسکپی پارامترهای  $a$  و  $a'$  و در بخش مدل

کن بیش از 10 برابر قطر ذرات باشد تا بتوان از

تاثیر آنها بر هم چشم پوشی کرد. [11] روش کار بدین صورت است که ابتدا  $u_{air}$  و  $u_{powder}$  را بدست آورده سپس با قرار دادن  $u_t = u_{powder} - u_{air}$  چون سایر پارامترها معلوم است، می توان قطر ذره ای را که معلق شده یافت. در رابطه (22)،  $\rho$ ،  $C_d$  و  $g$  معلوم اند و تنها  $\rho_p$  نیاز به محاسبه دارد. با توجه به این فرض کلی که قطر ذره پاشیده شده در طی عملیات خشک کردن تقریباً ثابت است بنابراین حجم ذره مقداری ثابت خواهد بود،  $m_{dp}$  مشخص است و تغییر نمی کند در نتیجه طبق رابطه (16-الف) فقط  $m_{hp}$  تابع رطوبت ذره و متغیر است بنابراین  $\rho_p$  تابع رطوبت ذره و نتیجتاً تابع ارتفاع برج خواهد بود.

(23)

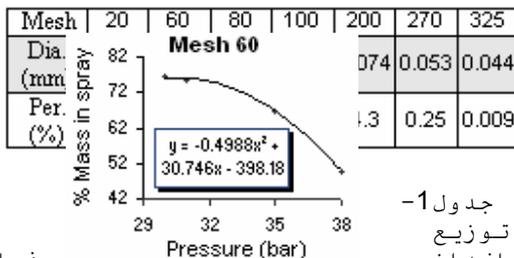
$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{m_{dp} + m_{hp}}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^3}$$

در برنامه کامپیوتری شبیه سازی، در هر مقطع از برج  $u_{powder}$  را از رابطه  $\frac{R \times \rho_p}{A_i}$  و  $u_{air}$  را از رابطه  $\frac{E \times \rho}{A_i}$  بدست آورده و از معادله (21)  $u_t$  محاسبه می شود. در معادله (22) با جایگذاری  $u_t$  و سایر پارامترها  $d_p$  بدست می آید که معادل قطر ذره ایست که در آن مقطع از برج قابلیت انتقال از فاز R به فاز F را دارد و آنرا با  $d_{fine}$  نشان می دهیم. نهایتاً اگر توزیع اندازه ذرات پاشیده

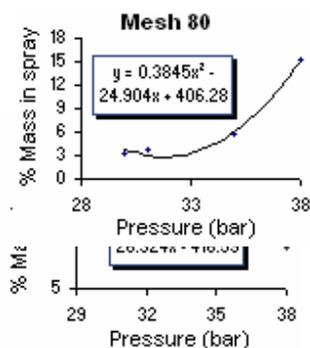
نامنظم و درهم می شود. کار آزمایشگاهی انجام شده توسط تیری هافنر ارتباط بین پارامترها را اینطور نشان می دهد (24)

$$D_p = f \cdot d_o^{0.5} \cdot \sigma^{0.25} \cdot \eta^{0.25} \cdot \frac{\rho^{0.125}}{P^{0.375}} \quad [14]$$

اما برای یک سیستم مشخص می توان این تابعیت را برای فشار پاشش بررسی کرد چون سایر پارامترها ثابت اند. نکته ای که بیش از همه اهمیت دارد این است که ذرات خروجی از یک اتمایزر همگی یک اندازه و یک قطر ندارند بلکه می توان برای جریان پاشیده تولیدی توزیع دانه بندی ذرات را مطرح کرد. بعنوان مثال هنگامی که فشار پاشش 35 bar باشد توزیع اندازه ذرات در جدول (1) ارایه شده است. نمودار شکل (5) تابعیت درصد فراوانی چهار اندازه مش را بر حسب فشار پاشش برای سیستم مورد بررسی ارایه می کند.



ذرات  
شده  
bar



جدول 1-  
توزیع  
اندازه  
پاشیده  
در فشار  
35

میکروسکپی  $R_p$  و  $R'_p$  پارامترهایی هستند که بطور مستقیم و غیر مستقیم در ارتباط با اندازه ذرات پاشیده شده اند. در مورد نیاز است در حالیکه برای تابع FTR توزیع اندازه ذرات برای هر اندازه مش مهم است. از اینرو جهت حل معادلات مدل سازی و انجام کار شبیه سازی باید بتوان قطر ذرات پاشیده شده را بر اساس شرایط عملیاتی تخمین زد؛ در این قسمت ارتباط اندازه ذرات پاشیده شده با شرایط عملیاتی مشخص می شود. اتمایزر بکار رفته در این سیستم از نوع افشانکهای تحت فشار می باشد که در فشارهای بالا جریان پاشیده مخروطی شکل ایجاد می کنند و به آنها اصطلاحاً conical spray sheet می گویند.

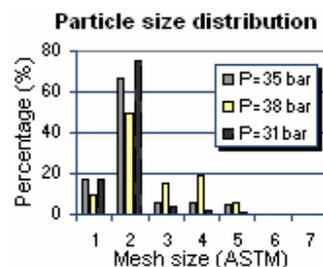
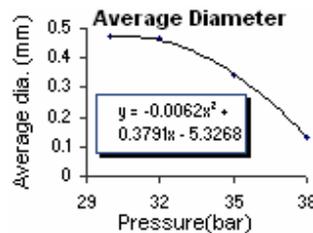
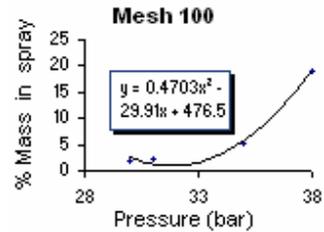
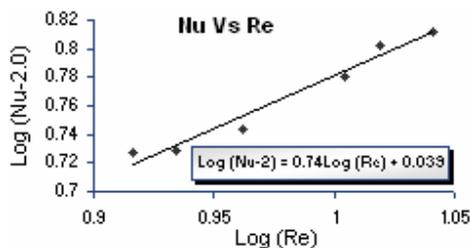
این افشانکها برای سیالهای با ویسکوزیته بسیار بالا (در حدود 20000 cp) بسیار مناسب است. [16] زاویه پاشش، سرعت جریان پاشش، قطر دهانه افشانک، ویسکوزیته سیال، چگالی سیال، کشش سطحی سیال و فشار پاشش 7 پارامتر مهم عملیاتی افشانکها هستند. برای برج مورد بررسی که قطر داخلی آن تقریباً 7 متر

بوده، تعداد افشانکها در طبقه اول 7 افشانک می باشد. چیدمان افشانکها طوریست که با زاویه پاشش  $70^\circ$  تا فاصله 1/5 متری جریان پاشیده روی یالهای یک مخروط مشخص حرکت کرده و به دیواره برج نمی رسد؛ از این ارتفاع به بعد تحت تاثیر جریان هوای داغ و نیز پراکندگی ذرات، الگوی جریان پاشیده شده

2- تابع ضریب انتقال گرما که آن را بصورت  $Nu = 2.0 + c.Re^d$  (25) نشان می دهیم دو پارامتر مجهول  $d$  و  $c$  دارد. [2]

تجهیزات ابزار دقیق و کنترلی نصب شده بر روی مقطع خروجی و ورودی خشک کن، تعداد زیادی از داده های تجربی سیستم را در برگه های ثبت اطلاعات واحد خشک کن پاششی ثبت می کند که می تواند جهت تعیین پارامتر های مجهول معادلات به روش محاسبه معکوس (Back Calculation) بکار می رود. قبل از تعیین وضعیت این مجهولات امکان حل مستقیم معادلات و شبیه سازی سیستم وجود ندارد، بنابراین ابتدا با در نظر گرفتن 18 سری داده های تجربی موجود مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  طوری تعیین می شود که با در نظر گرفتن شرایط مرزی مشخص، خروجی های محاسبه شده توسط معادلات مدل کمترین انحراف را نسبت به مقادیر تجربی داشته باشد. تعداد زیاد داده های تجربی ضریب اطمینان خوبی را برای مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  تامین می کند. 5 سری از داده های تجربی بدست آمده

از واحد صنعتی در جدول (2) ارائه شده است. تغییرات عدد ناسلت با رینولدز در شکل (6) ارائه شده است.



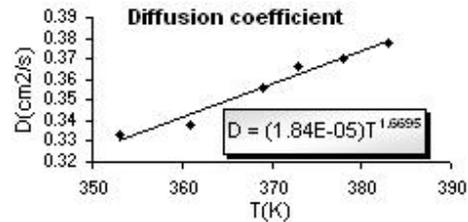
شکل 5- نتایج بدست آمده از مدلسازی تجربی توزیع اندازه ذرات بر حسب فشار پاشش

### 5- تحلیل معادلات مدل:

دستگاه معادلات دیفرانسیل هشتگانه با در نظر گرفتن هشت شرط مرزی قابل حل است. هشت شرط مرزی همان مقادیر هشت پارامتر مجهول در مقطع  $l=0$  (بالای برج) است. حل عددی به روش رانج- کوتای مرتبه چهار امکان دستیابی به مقادیر هر یک از مجهولات را در هر مقطع از برج فراهم می سازد. برای حل مجموعه معادلات مدلسازی در ابتدا چند نکته حایز اهمیت است:

1- تابعیت ضریب نفوذ  $D_{AB}$  و مقادیر مجهول  $a$  و  $b$  در رابطه (19)

شود. در رابطه اخیر اگر  $T$  برحسب  $K$  جایگزین شود ضریب نفوذ برحسب  $cm^2/sec$  بدست می آید.



شکل 6- مقادیر بدست آمده برای  $Nu$  و  $D_{AB}$  از تطابق معادلات مدل با دادهای تجربی

روابط بدست آمده برای ضرایب انتقال گرما و نفوذ با نتایج ارایه شده توسط استرومیلو [12] و مارولیس [3] مطابقت خوبی رانشان می دهد. در نهایت با مشخص شدن تابعیت ضریب نفوذ و ضریب انتقال گرما می توان مرحله شبیه سازی را انجام داد.

با توجه به رابطه بدست آمده در شکل (8) رابطه  $Nu$  با  $Re$  طبق رابطه (31) بصورت

$$Nu = 2 + 1.09 Re^{0.74}$$

و رابطه  $D_{AB}$  با  $T$  بصورت

$$D_{AB} = 1.84 \times 10^{-5} T^{1.67}$$

Tower location	Test	Temp. (°C)		Humidity (mass %)			Flow rate (ton/hr)		
		air	slurry/powder	Air	Fine	Slurry/powder	air	slurry/powder	fine
Top	1	93	78	6.59	6.2	40	112.700	18.000	475
Down	1	297	110	1.15	-	8.5	106.500	12.540	-
Top	2	90	79	6.5	6.5	40	116.257	18.000	520
Down	2	295	108	1.21	-	8.1	110.000	12.480	-
Top	3	101	78	6.66	6	40	114.300	18.000	490
Down	3	306	114	1.15	-	7.1	108.000	12.500	-
Top	4	92	75	6.13	6.2	40	118.230	18.000	540
Down	4	290	104	1.2	-	8.3	112.000	11.225	-
Top	5	82	72	6.24	6.9	40	115.100	18.000	500
Down	5	272	98	0.99	-	9.3	109.000	11.390	-

جدول 2- داده های تجربی بدست آمده از سیستم خشک کن پاششی صنعتی

برنامه شبیه سازی این امکان را فراهم می کند که علاوه بر تخمین مقادیر پارامترها در خروجی، مقادیر تمامی هشت پارامتر را در هر مقطعی از برج بتوان محاسبه کرد.

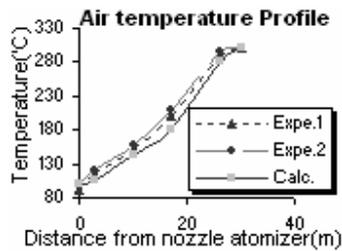
#### 6-1) مقایسه پارامترها در مقاطع مختلف از برج

محدودیتهای واحد صنعتی موجود فقط اندازه گیری سرعت جریان و دمای هوا را در مقاطع خاصی از برج امکان پذیر می کند بنابراین مقایسه تغییرات این دو پارامتر در طول برج با نتایج

#### 6- ارایه و مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های تجربی از واحد صنعتی

پس از اینکه تابعیت ضریب انتقال گرما و نفوذ رطوبت از شرایط عملیاتی مشخص شد، همه چیز مهیاست تا با در نظر گرفتن 8 شرط مرزی بعنوان ورودی بتوان مقادیر 8 پارامتر عملیاتی را محاسبه کرد؛ شرایط مرزی می تواند مربوط به بالا یا پایین برج باشد و از این نظر محدودیت خاصی وجود ندارد.

شبهه سازی، در شکل (7) ارایه شده است.



شرایط مرزی مربوط به این دو سری از نتایج بدست آمده یکسان بوده و عبارتست از :

$$m_{air}|_{Down} = 127250 \text{ Kg/hr}$$

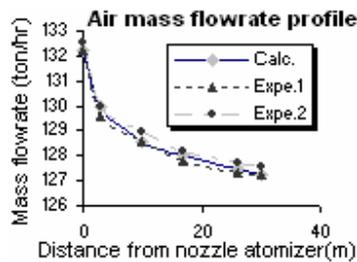
$$m_{slurry} = 18000 \text{ kg/hr}$$

$$T_a|_{down} = 300 \text{ }^\circ\text{C} \text{ و } Z|_{Down} = 0$$

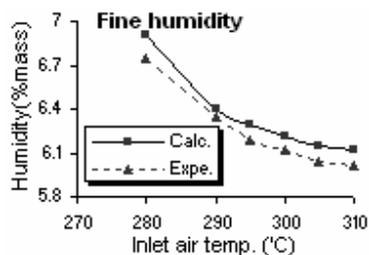
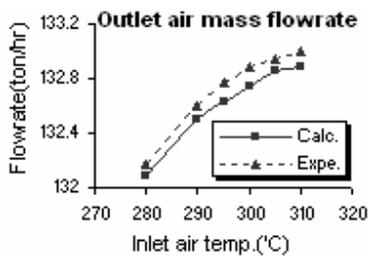
$$T_{Slurry} = 79 \text{ }^\circ\text{C} \text{ و}$$

$$y|_{Down} = 0.011 \text{ و } x|_{top} = 0.4$$

$$F|_{Down} = 0$$

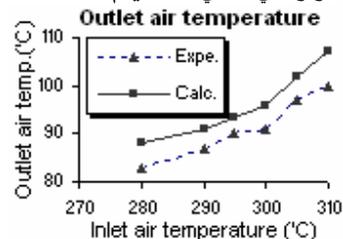


شکل 7- تغییرات دما و سرعت جریان هوا در طول برج



6-2) مقایسه نتایج در خروجی از برج

در این روش هفت شرط مرزی را ثابت نگهداشته و تغییرات پارامترهای عملیاتی را نسبت به تغییرات یکی از شرایط مرزی (مثلا دمای هوا ورودی در پایین برج) بررسی می کنیم.



نتایج بدست آمده نشان می دهد خطای بیشینه محاسبات در مقایسه با داده های تجربی در حدود 10% است. لذا به نظر می رسد که مدل تقریبی ارائه شده برای مکانیسم انتقال ذرات پودر به فاز فاین می تواند با دقت قابل قبولی در شبیه سازی سیستم های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. البته در صورت نیاز می توان از بسط همین روش برای اندازه مش ها متنوع تر تخمین دقیقتری را برای FTR ارائه کرد. همچنین نتیجه مهم دیگر اینکه مجهولات مفروض در معادلات مدل سازی (مانند تابعیت  $NU$  و  $D_{AB}$ ) نمی تواند مانع کارایی مدل شده و با در دست داشتن تعداد مورد نیاز از اطلاعات تجربی سیستم می توان تمامی این پارامترها را معین کرده و از مدل تهیه شده استفاده کرد.

#### تشکر و قدردانی

در پایان از تلاشها و مساعدت مدیریت واحد تحقیق و توسعه و مهندس رضازاده سرپرست واحد تولید پودر شوینده شرکت شیمیایی بهداد سپاسگزاری می شود.

#### فهرست علائم

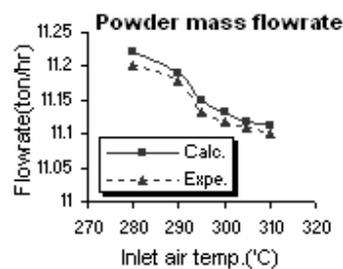
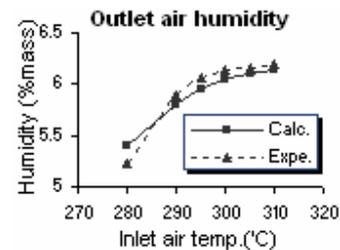
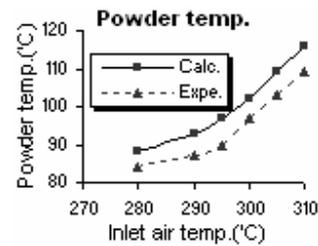
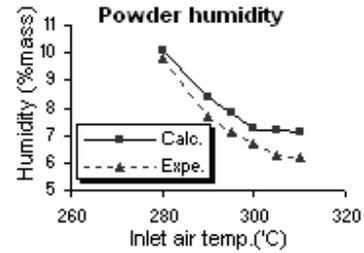
E : سرعت جریان جرمی هوا  
[Kg/hr]

R : سرعت جریان جرمی پودر در فاز پایین رونده  
[kg/hr]

F : سرعت جریان جرمی ذرات ذرات ریز  
[kg/hr]

y : کسر جرمی رطوبت در هوا

Y : کسر مولی رطوبت در هوا



شکل 8- مقایسه تغییرات هفت پارامتر سیستم با تغییر یک پارامتر عملیاتی (دمای هوای داغ ورودی) از دو روش دادهای تجربی و نتایج محاسبات مدل سازی

#### بحث و نتیجه گیری

$d_{fine}$  : حداقل قطر قطره پاشیده  
 برای رفتن از فاز R به فاز F  
 در هر مقطع از برج [m]  
 $u_t$  : سرعت حدی ته نشینی [m/s]  
 $u_{air}$  : سرعت ظاهری هوا [m/s]  
 $u_{powder}$  : سرعت ظاهری پودر [m/s]  
 $g$  : شتاب ثقل [ $m^2/s$ ]  
 $C$  : غلظت متوسط رطوبت در ذره  
 پاشیده شده [ $mol/m^3$ ]  
 $D_{AB}$  : ضریب نفوذ رطوبت در  
 توده هوا [ $m^2/s$ ]  
 $D_e$  : ضریب نفوذ موثر رطوبت در  
 ذره پاشیده شده [ $m^2/s$ ]  
 $C_d$  : ضریب کشش  
  
 $m_{hp}$  : جرم قسمت مرطوب ذره [kg]  
 $m_{dp}$  : جرم قسمت خشک ذره [kg]  
 $m_{p0}$  : جرم قطره پاشیده شده قبل  
 از آغاز انتقال جرم و حرارت در  
 تماس با هوا  
 $x_A$  : کسر مولی رطوبت در هر  
 شعاع از درون ذره پاشیده شده  
 $d_i$  : قطرهای مختلف (مش بندی)  
 موجود در ذرات پاشیده شده  
 [m]  
 Nu : عدد ناسلت  
 Re : عدد رینولدز  
 FTR : تابع سرعت انتقال ذرات  
 ریز در واحد طول برج [kg/m.hr]

$x$  : کسر جرمی رطوبت در پودر  
 $z$  : کسر جرمی پودر در ذرات  
 ذرات ریز  
 $N_A$  : شار انتقال رطوبت از  
 ذرات پودر به هوا [ $mol/m^2.hr$ ]  
 $N'_A$  : شار انتقال جرم از ذرات  
 ذرات ریز به هوا [ $mol/m^2.hr$ ]  
 $S$  : سطح مقطع برج خشک کن [ $m^2$ ]  
 $a$  : سطح موجود به ازای واحد  
 حجم ذرات پودر [ $m^2/m^3$ ]  
 $a'$  : سطح موجود به ازای واحد  
 حجم ذرات ذرات ریز [ $m^2/m^3$ ]  
 $\phi$  : تخلخل بستر برای ذرات پودر  
 $\phi'$  : تخلخل بستر برای ذرات ذرات  
 ریز  
 $\phi_p$  : تخلخل ذره پاشیده شده  
 $M$  : جرم ملکولی آب  
 $\rho_w$  : چگالی آب [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho$  : چگالی هوای داغ [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_p$  : چگالی ذره پاشیده شده  
 [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_s$  : چگالی دوغاب [ $kg/m^3$ ]  
 $T_s$  : دمای فاز پودر در هر  
 مقطع از برج [°C]  
 $T_a$  : دمای هوای داخل برج در  
 هر مقطع از برج [°C]  
 $C_{ps}$  : ظرفیت گرمایی ویژه پودر  
 [J/kg.°C]  
 $C_{pa}$  : ظرفیت گرمایی ویژه هوا  
 [J/kg.°C]  
 $T_0$  : دمای مبنا [°C]  
 $h$  : ضریب انتقال گرما  $W/m^2.C$   
 $R_p$  : شعاع قطره پاشیده شده  
 [m]  
 $R_h$  : شعاعی از قطره پاشیده شده  
 که در ابتدای مسیر نفوذ است  
 (شعاع مرطوب ذره) [m]

## مراجع

1. Zbieinski, I.; Strumillo, C.; Delag, A., "Drying kinetics and particle residence time in spray drying," *Drying Technology*, 2002, **20**, 1751-1768.
2. Zbieinski, I., "Development and experimental verification of momentum-, heat- and mass-transfer model in spray drying," *The Chemical Engineering Journal*, 1995, **58**, 123-133.
3. Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B.; Marinou-Kouris, D., "Heat and mass transfer coefficient in drying: Compilation of literature data," *Drying Technology*, 2002, **20(1)**, 1-18.
4. Palencia, C.; Nava, J.; Herman, E., "Spray drying dynamics modeling with a mechanistic model," *Drying Technology*, 2002, **20(3)**, 569-586.
5. Fletcher, D.; Guo, B.; Harrie, D.; Langrish, T., "What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform," *Third international conference on CFD in the minerals and process industries*, 2003.
6. Fletcher, D.; Langrish, T., "Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying," *Chemical Engineering and Processing*, 2001, **40**, 345-354.
7. Oakley, D. E., "Produce uniform particle by spray drying," *Chemical Engineering Progress*, 1997, 48-55.
8. Liang, H.; Shinohara, K.; Minoshima, H.; Matsushima, K., "Analysis of constant-rate period of spray drying of slurry," *Chemical Engineering Science*, 2001, **56**, 2205-2213.
9. Mohammad, F., "A new approach to modeling of single droplet drying," *Chemical Engineering Science*, 2003, **58**, 2985-2993.
10. Kadja, M.; Bergles, G., "Modeling of slurry droplet drying," *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23**, 829-844.
11. Keishi, G.; Hiroaki, M., *Powder Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc., 2nd Edition, 1997.

12- سزلا استرامیلو ، تادیوز کودرا ، مترجم پهلوان زاده ، ح. "خشک کردن ، اصول ، کاربرد و طراحی." دانشگاه تربیت مدرس مرکز نشر آثار علمی ، (1377)

13. Fogler, H. S., *Elements of chemical reaction engineering*, Prentice-Hall Inc., 3rd Edition, 2002.
14. Kieriet, F. G., "Modeling quality in spray drying," Submitted to the Eindhoven University of Technology (Department of Chemical Engineering) for the degree of doctor of philosophy, 1997.
15. Filkova, I., "Drop size distribution of non-Newtonian slurries," *Drying'80*, 346-350.