مدلسازی ديفرانسيلی خشک کردن مواد دوغابي و شبيه سازی عملکرد خشک کن افشانه ای

محمد مهدی منتظر رحمتی*[۱] و سيد حسين قافله باشی[۲]

[۱]استاد دانشکده مهندسی شيمی- پرديس دانشکده هاي فنی- دانشگاه تهران

[۲]دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شيمی- پرديس دانشکده هاي فنی- دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۴/۵/۸ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۳/۱۳ ، تاريخ تصويب ۸۶/۱/۲۵)

چکيده

کنترل خشک کن افشانه ای که اغلب در مرحله پاياني توليد محصول بکار مي رود، جهت توليد محصول با کيفيت استاندارد بسيار مهم و ضروری است. بدين منظور پيش بيني چگونگي تغيير پارامترهای کيفي محصول با تغييرات شرايط محيطی و عملياتي پيشنياز طراحی يک سيستم کنترلي مناسب است. با استفاده از مدلسازی فرايند های انتقال جرم وانتقال حرارت و مکانيسم خشک شدن ذرات پاشيده شده کار شبيه سازی سيستم خشک کن افشانه ای انجام شده است. معادلات مدل در دو بخش ماکروسکپي و ميکروسکپي ارايه شده است. در مبحث انتقال مومنتم تنها از نتايج تحقيقات گذشته استفاده شده است. مجموعه معادلات مدلسازی به کمک روشهای عددی حل شده و برنامه شبيه سازی نيز با استفاده از نرم افزار Visual C++ 6.0 نوشته شده است. نتايج حاصل از مدل با داده هاي تجربي تطابق خوبي را نشان مي دهد.

واژه های کليدی: دوغاب - خشک کن افشانه ای - مدلسازی ديفرانسيلی - پودر - ذرات ريز - هوای داغ - قطره پاشيده شده - افشانک

مقدمه

خشک کن افشانه ای يکی از مرسومترين واحدهای عملياتی است که معمولا در پايان خط توليد يک محصول بکار می رود. اين واحد عملياتي، در صنايع مختلف از محصول دوغابی شکل ذرات جامد پودری تقريبا يکدست و هم اندازه (۱۰ تا ۵۰۰ ميکرون) با درصد رطوبت ۵ تا۱۲% بدست مي دهد. ويژگيهای ممتاز اين نوع خشک کن باعث شده که کاربرد آن در صنايع غذايی، دارويي، شوينده، کاتاليزور های صنعتی و ... که محصولات بصورت پودر می باشند به سرعت فراگير شده و خشک کن افشانه ای بعنوان يک واحد کليدی و تعيين کننده در فرايند توليد مورد توجه مهندسان شيمی قرار گيرد. از اين رو مدلسازي فرايند و انطباق مدل با واقعيتهای يک سيستم موجود منجر به شبيه سازی خشک کن افشانه ای خواهد شد که نتايج آن برای استفاده در سيستم های کنترلی يا طراحی اوليه و نهايي يک دستاورد مهم و ضروری بنظر مي رسد.

در کارهای گذشته اکثرا مدلسازی خشک کن پاششي از نوع همسو[۱] انجام شده است [۱۰]،[۴] و [۲]. در آنها جريان ذرات پاشيده شده فقط در يک جهت بوده است، اما در مدل مورد بررسي حاضر، چون سيستم از نوع Counter-current است، همانگونه که در ادامه توضيح داده ميشود، ذرات پاشيده شده در دو جهت مخالف جريان خواهند داشت.

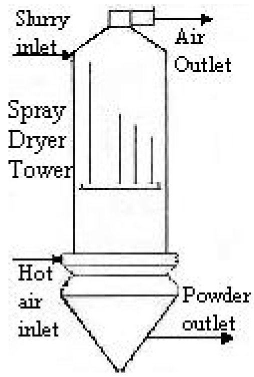
دراين مقاله پس از آشنايي با اين واحد عملياتی يک مدل رياضی براي توضيح عملکرد اين سيستم ارائه می شود. در صورت نزديکي نتايج حاصل از اين تحقيق با داده های عملياتی خشک کن افشانه ای که در مقياس صنعتی جهت توليد پودر های شوينده بکار مي رود، نشان مي دهد که مي توان از اين مدل در طراحی و شبيه سازی سيستم های مشابه استفاده کرد.

معرفی خشک کن افشانه ای

خشک کن افشانه ای مورد مطالعه، که در شکل (۱) به صورت شماتيک نشان داده شده است، يک برج خشک کن افشانه ای صنعتی، فعال در واحد توليد پودر شوينده است. ابعاد اين خشک کن به گونه ايست که بدرستی مي توان

* نويسنده مسئول : تلفن : ۰۲۱ – ۶۱۱۱۳۲۱۷ ، فاکس : ۰۲۱ – ۶۶۹۵۷۷۸۴ ، Email:mrahmati@ut.ac.ir

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 ۰/۵m و ظرفیت عملی آن ۱۸ ton/hr دوغاب در ورودی و ۱۲ ton/hr پودر خروجی در پایین برج است.



شکل ۱ : نمای شماتیک خشک کن افشانه ای.

برج بصورت موازی و ناهمسو کار می کند و هوای ورودی ازپایین برج با دمای ۳۱۰ °C- ۲۸۵°C و سرعت جریان حجمي ۱۲۰۰۰۰ m^3/hr وارد برج شده و از بالای برج با دمای ۱۱۰°C- ۹۰°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 است که با رطوبت ۴۰ % وارد افشانکها شده و بداخل برج پاشیده می شود و پس از خشک شدن بصورت دانه های پودری با رطوبت ۹-۷% جمع آوری می شود.

در جریان هوای خروجی از بالای برج مقداری ذرات پودربصورت دانه های ریز خارج می شود که برای جداسازی آنها از ۱۶ سیکلون استفاده می شود.

مدلسازی

مهمترین مشکل خشک کن افشانه ای تعداد زیاد پارامترهای عملیاتی سیستم است. با تغییر یکی از شرایط محیطی یا عملیاتی، تعداد زیادی از پارامتر های سیستم بطور وابسته تغییر خواهدکرد.

مفروضات مدلسازی

۱- ذرات موازی دیواره های خشک کن حرکت می کنند[۲].

۲- قطر ذره پاشیده شده کروی شکل طی زمان خشک کردن تغییرات ناچیزی دارد که عملا 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 ۱۲% است.

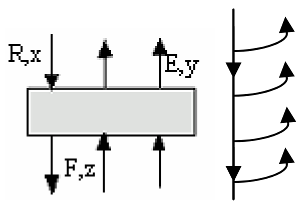
۳- ذرات پاشیده شده بهم نمی پیوندند و کلوخه نمی شوند؛ یعنی اینکه می توان جریان پودر را بصورت مجموعه ای از دانه های کروی با قطر مشخص d_P در نظر گرفت[۱۲].

۴- خواص فیزیکی از جمله چگالي پودر تابع ارتفاع برج است و در هر مقطع مقدار خاص خود را دارد.

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

۶- 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 مي كنند، بتدريج كه از افشانکها به سمت پایین برج حرکت می کنیم جریان سومی بنام جریان ذرات ریز(F)، چنان که در شکل (۲) نشان داده شده، برقرار می شود که علت آن تغییر ساختار مورفولوژی ذرات پودر جریان فاز R بر اثر نفوذ رطوبت بهنگام تبخیر است[۹].

همچنین تبخیر آب از ذرات پاشیده شده باعث می شود چگالي این ذرات در طول برج روند نزولی داشته باشد. کسری از ذرات دارای چگالي کمتر از حداقل چگالي شناوری در ارتفاع Z=L (که در آن سرعت هوا مقدار معینی دارد) خواهند بود. بنابراین 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.



(ب) (الف)

شکل ۲- (الف) : مسیر جریان ذرات ریز و انتقال آنها از فاز R به فاز E (ب) : مقطعي ديفرانسيلي از برج .

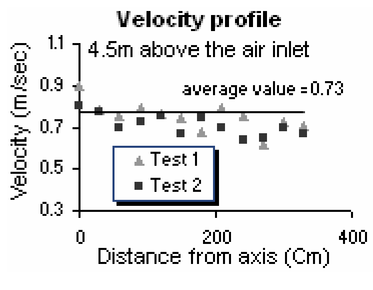
۷- فرض دیگری که در نوشتن معادلات مدل از آن استفاده شده، این است که برج با محیط اطراف تبادل

گرمایي نداشته باشد وبه اصطلاح بصورت آدیاباتیک کار کند. این فرض با وجود ضخامت m ۰/۵ دیواره برج محتمل بنظر می رسد، هرچند هر فرضی غیر از این فقط تعدادی عدد ثابت را به معادلات مدل اضافه می کند و باعث دشوارتر شدن مدل نمي شود.

۸- رژیم جریان هوای داغ درون محفظه خشک کن جریان قالبي[۲] است؛ یکی از پارامترهای موثر درمدلسـازی عملکرد یک خشک کن افشانه ای پیش بینی رفتار جریان سیال در داخل محفظه خشک کن است که علیرغم پیچـیدگي های آن می توان به این مهم دست یافت. طی چند دهه اخیر تحقیـقات زیادی در این مورد انجام شده است[۵].

طبق آزمایش های انجام شده مقادیر سرعت در موضع ورودی هوای داغ (پایین برج) به صورت یک پروفایل تقریبا سهموی رفتار می کند و می توان یک توزیع سرعت متقارن را حول محور مرکزی متصور شد. سرعت در این ناحیه از $۰/۷۵ \ m/_{\sec}$ در نزدیکی جداره برج، تا حدود $۲ \ m/_{\sec}$ در محور مرکزی متغیر است. بتدریج که بسمت بالای برج حرکت می کنیم شکل پروفایل سرعت بشکل پروفایل قالبي تغییر می کند. به فاصله m ۳ از مقطع ورودی هوا تنها ۲۰% اختلاف در مقدار سرعت نزدیک به جداره با سرعت محور مرکزی وجود دارد.

آنچه که از نتایـج مطالعات دینامیک سیال برای خشک کنهای بلند در مقیاس صنعتی جهت انجام مدلسازی مفید بوده و بکار می رود این است که جریان داخل بـرج را می توان با تقریب خوبی مطابق با الگوی رژیم جریان قالبي فرض کرد و مدلسازی فرایند را بر این اساس انجام داد [۶]، [۲].



شکل ۳ : پروفایل سرعت در دو مقطع برج.

همانگونه که در شکل (۳) برای خشک کن مورد بررسی نشان داده شده است، از فاصله ۴/۵ متری باتقریب خوبی سرعت در همه نواحی یکـــسان است و مـــی توان جریان داخل برج را قالبی فرض کرد.

مدلسازی ماکروسکپی

منظور از شرایط ماکروسکپی حالتی است که عملیات خشـک کردن برای جریان دوغاب پاشـیده 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 پاشـیده شده که از بالای برج به سمت پایین می آید .

۳ - جریان ذرات پودر همراه هوای داغ که بسمت بالا می رود (این جریان ، جریان ذرات ریز نامیده می شود).

از آنجاکه سیستم خشک کن افشانه ای یک سیستم دیفرانسیلی است می توان المانی از برج را مانند شـکل (۲- ب) تصورکرد و معادلات موازنه جرم و انرژی را برای مقطع dl نوشت.

مطابق فرض انجام شده در قسمت(۱-۳) پدیده انتقال ذرات از فاز R به فاز F در طول برج اتفاق می افتد. تابع FTR[۳] تابعی است که بیانگر سرعت انتقال ذرات از فاز R به فاز F در واحد حجم برج است. FTR جرم 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 (۳-۳- ج) توضیح داده مي شود. حال به مرحله ای رسیده ایم که می توان با توجه به شکل (۴) معادلات مدلسازی را نوشت.

۱- موازنه جرم برای هوای خشک

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

(۱)

۲- موازنه جرم برای پودر در فاز R :

$$R(1-x)\big|_{l} - R(1-x)\big|_{l+dl} - FTR\ .dl\ .(1-x) = 0$$
$$\Rightarrow$$
$$\frac{d}{dl}(R(1-x)) = -FTR\ \ (1-x)$$

(۲)

۳- موازنه جرم برای پودر در فازF

$$F(1-z)\big|_{l+dl} - F(1-z)\big|_{l} + FTR\,.dl\,.(1-x) = 0$$
$$\Rightarrow \quad \frac{d}{dl}(F(1-x)) = -FTR\,(1-x)$$
(۳)

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

$$R.x\big|_{l} - R.x\big|_{l+dl} - FTR.dl.x - N_A.S.dl.(1-\phi).a.M = 0$$
$$\Rightarrow$$
$$\frac{d}{dl}(R.x) = -(FTR.x + N_A.S.(1-\phi).a.M)$$
(۴)

۵- موازنه جرم برای رطوبت همراه پودر در فاز F

$$F.z\big|_{l+dl} - F.z\big|_{l} + FTR.dl.x - N'_A.S.dl.(1-\phi').a'.M = 0$$
$$\Rightarrow$$
$$\frac{d}{dl}(F.z) = FTR.x - N'_A.S.(1-\phi').a'.M$$
(۵)

۶- موازنه جرم برای رطوبت همراه هوا

$$E.y\big|_{l+dl} - E.y\big|_{l} + N_A.S.dl(1-\phi).a.M +$$
$$N'_A.S.dl.(1-\phi').a'.M = 0 \qquad \Rightarrow$$
$$\frac{d}{dl}(E.y) = -S.M.(N_A.(1-\phi).a + N'_A.(1-\phi').a')$$
(۶)

۷- بیلان انرژی برای پدیده انتقال گرما

$$E.C_{Pa}(T_a - T_0)\big|_{l+dl} -$$
$$(E - [(N_A.(1-\phi)a + N'_A.(1-\phi')a'].S.dl.M).C_{Pa}(T_a - T_0)\big|_{l}$$
$$= h.S.dl\,(1-\phi).a\,(T_a - T_S)$$
چون
$$E >> [(N_A.(1-\phi).a + N'_A.(1-\phi').a'].S.dl.M$$
$$\Rightarrow$$
$$\frac{d}{dl}(E.C_{Pa}(T_a - T_0)) = h.S.a.(1-\phi)(T_a - T_S)$$
(۷)

۸- بیلان اترژی برای کل المان

$$F.C_{Ps}(T_a - T_0)\big|_{l+dl} - F.C_{Ps}(T_a - T_0)\big|_{l} + R.C_{Ps}(T_S - T_0)\big|_{l} -$$
$$R.C_{Ps}(T_S - T_0)\big|_{l+dl} + E.C_{Pa}(T_a - T_0)\big|_{l+dl} - E.C_{Pa}(T_a - T_0)\big|_{l} = 0$$
$$\Rightarrow \quad \frac{d}{dl}(F.C_{Ps}(T_a - T_0)) - \frac{d}{dl}(R.C_{Ps}(T_S - T_0)) +$$
$$\frac{d}{dl}(E.C_{Pa}(T_a - T_0)) = 0$$
(۸)

معادلات مدل بدست آمده را باید در قالب یک دستگاه معادلات دیفرانسیل ۸تایي و البته با روشهای عددی حل کرد. در این دستگاه معادلات، هدف مشخص کردن ۸ پارامتر سیستم بعنوان مجهولات معادلات دیفرانسیل است. با استفاده از روش رانج-کوتای مرتبه چهار و نیز شرایط مرزی موجود، پارامترهای R، E، F، x، y، z، T_a و T_S که مجهولات دستگاه معادلات دیفرانسیل اند در تمامی مقاطع برج مشخص خواهند شد. شرایط مرزی مقادیر پارامتر های هشتگانه در بالای برج در نظر گرفته مي شود و ازحل معادلات فوق تابعیت هر یک از این پارامتر ها بر حسب ارتفاع برج بدست می آید. تنها مساله موجود در حل این دستگاه معادلات مقادیر چهار کمیت N'_A، N_A، FTR وh است که خود تابعی از شرایط سیستم می باشند.

مدلسازی میکروسکپی

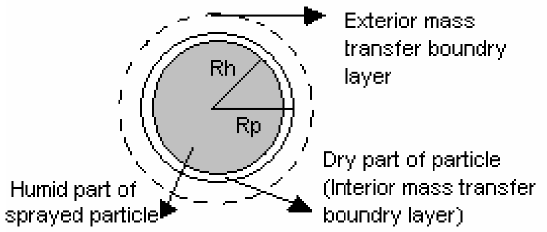
منظور از مدلسازی میکروسکپی مدل کردن پدیده های انتقال جرم ، انتقال گرما و پدیده شناور شدن و انتقال ذرات جامد از فاز R به فازF است. آنچه که با این سه پدیده در ارتباط است کمیتهای N'_A، N_A، FTR و h می باشند که درحل معادلات مدلسازی فرایند مورد نیاز اند. N'_A وN_A تاحد زیادی مشابه بوده و می توان مدلسازی N_A را انجام داد و با اعمال تغییراتی N'_A را هم مدل کرد. h یا ضریب انقال حرارت تابعی از سرعت و شرایط فیزیکی سیال و ذره پودر است که مي توان آنرا نیز بصورت یک رابطه همبستگي[4] ارایه کرد. از آنجاکه 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 مي شود.

شار مولی انتقال رطوبت از پودر N_A

در معادلات مربوط به مدلسازی فرایند که در قسمت قبل ارایه شد منظور از N_A مقدار شار مولی انتقال جرم برای آب از سطح خارجی ذره پاشیده شده است($N_A = N_A\big|_{r=Rp}$). 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 باشند. از طرفی پدیده انتقال جرم از طریق نفوذ رطوبت از داخل مجـاری موجود

در ساختمان ذره پودر اتفاق می افتد [۱۰].

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 مي شود :



شکل۴ : نمای دیفرانسیلی از ذره پاشیده شده.

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

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

(۹)

$$\Rightarrow \quad r^2.N_A = K_1$$

(۱۰)

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

$$N_A = -C.D_e.\frac{dx_A}{dr} \qquad \Rightarrow$$

(۱۱)

$$-C.D_e.\frac{dx_A}{dr} = \frac{K_1}{r^2}$$

(۱۲)

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

شرط مرزی اول : $x_A = Y \quad @ \quad r = R_P$ و

شرط مرزی دوم : $x_A = x_A^* \quad @ \quad r = R_h$

شرط مرزی اول این نکته را یادآوری مي کند که در انتهای مسیر نفوذ، رطوبت همان رطوبت هوای اطراف است و می توان x_A را مساوی با Y/K (نسبت کسر مولی رطوبت هوا به ثابت تعادل) فرض کرد. در مورد شرط مرزی دوم منظور این است که هوای موجود در ابتدای مسیر نفوذ در دمای T_S از بخار آب اشباع شده است.

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

$$\Rightarrow \quad K_1 = \frac{C.D_e.R_h.R_P}{(R_h - R_P)}(Y - x_A^*)$$

(۱۳)

با جایگذاری این مقدار در رابطه(۱۰) داریم :

$$N_A = \frac{C.D_e.R_h.R_P}{(R_P - R_h)r^2}(x_A^* - Y) = f(r)$$

(۱۴)

از این رابطه چگـونگي تابعیـت N_A از r مشـخص شـده است. حال می توان $N_A = N_A\big|_{r=Rp}$ که هـدف اصـلی این بخش بود را محاسبه کرد :

$$N_A\big|_{r=Rp} = \frac{C.D_e.R_h}{(R_P - R_h).R_P}(x_A^* - Y)$$

(۱۵)

پارامتر های 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 و K است که در ادامه بررسي مي شود.

تخمین شعاع مرطوب ذره R_h

منظور از R_h شعاعی از قطره پاشیده شده است که در ابتدای مسیر نفوذ قرار دارد. در این قسمت هدف ارائه تابعیت R_h برحسب x است تا با جاگذاری آن در رابطه (۱۵) مقدار N_A بصورت تابعي از x بیان شود.

از تعریف کسر جرمي رطوبت داریم:

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

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

(۱۶- الف)

$$m_{dp} = \frac{(1-x)}{x}(4/3\,\pi.R_h^{\,3}.\phi_P.\rho_W)$$

(۱۶- ب)

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

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

$$m_{dp} = m_{P0} \times (۱ - x_0)$$

(۱۷)

که در آن، جرم قطره پاشیده شده پیش ازآغاز انتقال جرم و حرارت در تماس با هوا (یعني بلافاصله پس از خارج شدن از افشانک اتمایزر) با m_{P0} نشان داده شده است و مقدارx_0 "رطوبت دوغاب اولیه" همان رطوبت فازR در مقطع $L = 0$ (بالای برج) است.

$$\rho_S.4/3\,\pi.R_P^3 = m_{P0}$$

(۱۸)

مقدار چگالي دوغاب پاشیده شده(ρ_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 افشانکهای تحت فشار که در قسمت (۴) ارائه شده است با معلوم بودن فشار پاشش اتمایزر مقدار معلومی خواهد داشت.

تخمین ضریب نفوذ D_e

ضریب نفوذ موثرآب 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 منظور رابطه ای بشکل:

$$D_{AB} = a.T_S^b$$

(۱۹)

در نظر گرفته و از آن در معادلات مدلسازی استفاده خواهد شد. در نفوذ گازها Knudsen مقدار ۰/۵ را برای b توصیه می کند[۱۳]. روش بدست آوردن a و b در قسمت(۵) ارائه شده است اما تذکر دو نکته در مورد ضریب نفوذ ضروری است :

۱- ضریب تصحیح ε_p برای دستیابی به مقدار واقعی سطح انتقال جرم در D_{AB} ضرب می شودکه مقدار عددی این ضریب معمولا بین ۰/۳۵-۰/۴۵ است[۱۳].

۲- مسیر نفوذ رطوبت در داخل ذره احتمالا مسیرمستقیمی نخواهد بود و چون معادلات مدل میکروسکپی در راستای مسیر مستقیم شعاع نوشته شده، لازم است که یک ضریب دیگر برای تصحیح این فرض در D_{AB} ضرب شود. این ضریب با τ نشان داده مي شود که به معنی tortuosity یا پیچ مسیراست و مقدار تقریبی آن حدود ۳/۰ می باشد.

در نهایت ضریبی که بعنوان ضریب نفوذ موثر در معـادلات مدلسازی از آن استفاده می شود عبارت است از

$$D_e = \frac{D_{AB}.\varepsilon_p}{\tau}$$

(۲۰)

یا بطور تقریبی $D_e = 0.13 D_{AB}$ است که a در رابطه (۱۹) شامل ضریب تصحیح ۰/۱۳ نیز می باشد[۱۳].

در مورد ثابت تعادل K بین x_A و Y می توان با استفاده از داده های تجربی مو جود سیستم به روش محاسبات معکوس[۵] مقدار K را تخمین زد. روش انجام محاسبات معکوس برای سایر پارامتر های مجهول نظیر Nu و D_e نیز مورد استفاده قرار می گیرد.

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 (۳-۳- الف) به جای x_A از z_A و به جای x از z و به جای x_A^* از z_A^* وبه جای R_P از $R_P^{'}$ استفاده می شود که منظور از z_A^* کسر جرمی هوای اشباع در دمای T_a است.

تابع انتقال ذرات ریز FTR

پدیده انتقال ذرات از فاز R به فاز F هنگامي اتفاق می افتد که سرعت ذرات به سرعت حدی[۶] 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[۷] 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:

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

(۲۱)

که در آن u_t از رابطه زیر بدست مي آید

$$u_t = \sqrt{\frac{4 d_P.(\rho_P - \rho) g}{3 C_d.\rho}}$$

(۲۲)

البته با این فرض که فاصله ذرات از یکدیگر و جداره خشک کن بیش از۱۰ برابر قطر ذرات باشد تا بتوان از تاثیر آنها بر هم چشم پوشی کرد [۱۱]. روش کار بدین صورت است که ابتدا u_{air} و u_{Powder} را بدست آورده سپس با قرار دادن $u_t = u_{Powdre} - u_{air}$، چون سایر پارامتر ها معلوم است، می توان قطر ذره ای را که معلق شده بدست آورد. در رابطه (۲۲)، ρ، C_d و g معلوم اند و تنها ρ_P نیاز به محاسبه دارد. با توجه به این فرض کلی که قطر ذره پاشیده شده در طی عملیات خشک کردن تقریبا ثابت است، حجم ذره مقداری ثابت خواهد بود، یعنی m_{dp} مشخص است و تغییر نمی کند، در نتیجه طبق رابطه (۱۶-الف) فقط m_{hp} تابع رطوبت ذره و متغیر است بنابراین ρ_P تابع رطوبت ذره ونتیجتا تابع ارتفاع برج خواهد بود.

$$\rho_P = \frac{m_P}{V_P} = \frac{m_{dp} + m_{hp}}{\frac{4}{3}\pi (\frac{d_P}{2})^3}$$

(۲۳)

در برنامه كامپيوتری شبيه سازی ، در هر مقطع از برج u_{Powder} از رابطه $\frac{R \times \rho_P}{A_t}$ و u_{air} از رابطه $\frac{E \times \rho}{A_t}$ بدست می آيد و u_t از معادله (۲۱) محاسبه مي شود. در معادله (۲۲) با جايگذاری u_t وساير پارامترها d_P بدست مي آيد كه معادل قطر ذره اي است كه در آن مقطع از برج قابليت انتقال از فاز R به فاز F را دارد و آنرا با d_{fine} نشان مي دهيم. نهايتا اگر توزيع اندازه ذرات پاشيده شده معلوم باشد، در مقطع l=L از برج d_{fine} مشخص است، اگر در مش بندی جريان پاشيده شده اندازه مش مساوی با d_{fine} وجود داشت، FTR معادل حاصلضرب سرعت جريان پودر در درصد فراوانی آن اندازه مش خواهد بود.

اما به منظور ساده سازی مدل سيستم، با توجه بـه انـدازه ذرات پودر در محصول، مـي تـوان فـرض كـرد كـه عمـده توزيع اندازه ذرات اسپری شده در قالب مش های ۲۰، ۶۰ ، ۸۰ و ۱۰۰ طبقه بندی شـده و از سـاير انـدازه مـش هـا صـرف نظـر كـرد. در نتيجـه مقـدار FTR توسـط برنامـه كامپيوتری، اينگونه محاسبه مي شود :

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

$$\text{Mesh}\ \ (d_{20}, d_{60}, d_{80}, d_{100}) \xrightarrow{if\ \ d_{fine}=d_i}$$

$$\text{FTR} = \text{R} \,.\, P_i ,\ \text{otherwise: FTR} = 0$$

(۲۴)

كه P_i درصد فراوانی مش با قطر d_i است.

P_i تابعی از فشار پاشش نازلهاست كه روابط مربوط به اين تابعيت در شكل (۵) ارائه شده است. فرض مهم روابط بالا اين است كه تابعيت FTR به گونه ايست كه در مقاطع خاصی از برج مقدار غير صفر دارد و در اكثر مقاطع مقدار آن صفر است بدين معنی كه انتقال ذرات از فاز R به فاز F در برخي نقاط خاص از سيستم اتفاق می افتد.

رابطه عملكرد اتمايزر (افشانک تحت فشار)

در مدلسازی ماكروسكپی پارامترهای a و a' و در بخش مدل ميكروسكپی R_P و R'_P پارامتر هايي هستند كه بطور مستقيم وغير مستقيم در ارتباط با اندازه ذرات پاشيده شده اند. در مورد N_A و N'_A به قطر متوسط ذرات نياز است در حاليكه برای تابع FTR توزيع اندازه ذرات برای هر اندازه مش مهم است. از اينرو جهت حل معادلات مدلسازی و انجام كار شبيه سازی سيستم بايد بتوان قطر ذرات پاشيده شده را بر اساس شرايط عملياتی تخمين زد؛ در اين قسمت ارتباط اندازه ذرات پاشيده شده با شرايط عملياتی مشخص مي شود.

اتمايزر بكار رفته در اين سيستم از نوع افشانكهای تحت فشار می باشد كه در فشارهای بالا جريان پاشيده مخروطی‌شكل ايجاد می كنند و به آنها اصطلاحا conical spray sheet می گويند.

اين افشانكها برای سيالهای با ويسـكوزيته بسـيار بـالا (در حـدود ۲۰۰۰۰ cp) بسـيار مناسـب اسـت[۱۶]. زاويـه پاشـش، سـرعت جريـان پاشـش، قطـر دهانـه افشـانک، ويسكوزيته سيال، چگالي سيال، كشش سـطحی سـيال و فشار پاشش ۷ پارامتر مهم عملياتی افشانكها هستند. برای برج مورد بررسی كه قطر داخلی آن تقريبـا ۷ متـر اسـت، تعداد افشانكها در طبقه اول ۷ افشانک می باشد. چيـدمان افشـانكها بـه گونـه ايسـت كـه جريـان پاشـيده بـا زاويـه پاشش°۷۰ تا فاصله ۱/۵متری روی يالهـای يـک مخـروط مشخص حركت كرده و به ديواره بـرج نمـی رسـد؛ از ايـن ارتفاع به بعد تحت تاثير جريان هوای داغ و نيز پراكنـدگی ذرات، الگوی جريان پاشيده شده نامنظم و درهم می شود. كار آزمايشگاهی انجام شده توسط تيری هافنر ارتباط بين پارامترها را اينطور نشان مي دهد[۱۴]:

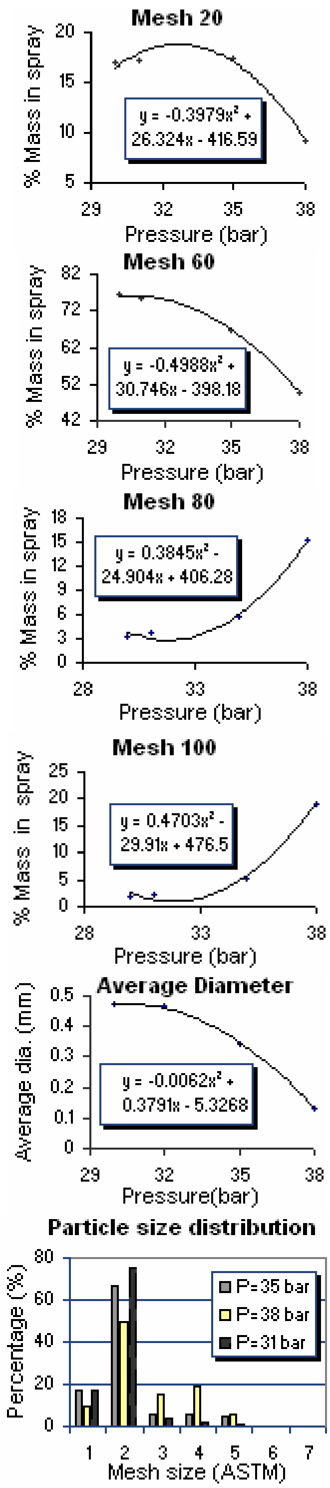
$$D_{50} = f\, d^{0.2}\, Vp^{-0.9}\, \eta^{\,0.1} \rho^{-0.5}$$

(۲۵)

كه درآن D_{50} قطر متوسط، d قطر توربين، Vp سـرعت محيطی، η گرانروی مايع، و ρ چگالي مايع است. اما برای يک سيستم مشخص می توان اين تابعيـت را بـرای فشـار پاشش بررسی كرد زيرا ساير پارامترها ثابت انـد. نكتـه ای كه بيش از همه اهميت دارد اين است كه ذرات خروجی از يک اتمايزر همگی يک اندازه و يک قطر ندارنـد بلكـه مـی توان برای جريان پاشيده توليدی توزيع دانه بندی ذرات را مطرح كرد. بعنوان مثال هنگامي كه فشار پاشش ۳۵ bar باشد توزيع اندازه ذرات در جـدول (۱) ارائـه شـده اسـت. نمودار شكل (۵) تابعيت درصد فراوانی چهار اندازه مش را بر حسب فشار پاشش بـرای سيسـتم مـورد بررسـی ارائـه می كند.

جدول۱: توزیع اندازه ذرات پاشیده شده در فشار ۳۵ bar.

Mesh	20	60	80	100	200	270	325
Dia. (mm)	0.84	0.25	0.177	0.149	0.074	0.053	0.044
Per. (%)	17.36	66.92	5.72	5.4	4.3	0.25	0.009



شکل۵ : نتایج بدست آمده از مدلسازی تجربي توزیع اندازه ذرات بر حسب فشار پاشش.

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 مي سازد.. برای حل مجموعه معادلات مدلسازی در ابتدا ذکر دو نکته حایز اهمیت است:

۱- تابعیت ضریب نفوذ D_{AB} از دما و لزوم تعیین مقادیر مجهول a و b در رابطه (۱۹)،

۲- تابعیت ضریب انتقال گرما (در قالب عدد ناسلت) از عدد رینولدز که آن را بصورت:

$$Nu = 2.0 + c.\mathrm{Re}^{d} \quad (۲۶)$$

نشان می دهیم و حاوی دو پارامتر مجهول c و d است [۲].

تجهیزات ابزار دقیق و کنترلي نصب شده بر روی مقاطع خروجي و ورودی خشک کن، تعداد زیادی از داده های تجربي سیستم را در برگه های ثبت اطلاعات واحد خشک کن افشانه ای ثبت مي کنند که مي توان از آنها برای تعیین پارامتر های مجهول معادلات به روش محاسبه معکوس استفاده کرد.

پیش از تعیین وضعیت این مجهولات امکان حل مستقیم معادلات و شبیه سازی سیستم وجود ندارد، بنابراین ابتدا با در نظر گرفتن ۱۸ سری داده های تجربی موجود مقادیر a، b ، c و d به گونه ای 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 باشند. تعداد زیاد داده های تجربی ضریب اطمینان خوبی را برای مقادیر a ، b ، c و d تامین می کند. ۵ سری از داده های تجربی بدست آمده از واحد صنعتی در جدول (۲) ارائه شده است. چگونگی تغییرات عدد ناسلت با رینولدز در شکل (۶) ارایه شده است.

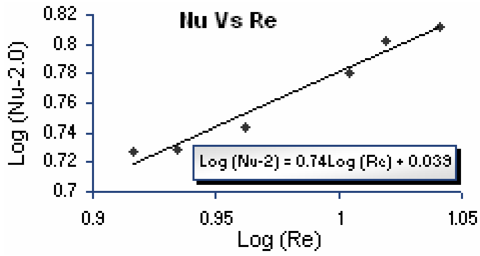
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۶)، نحوه ارتباط Nu با Re طبق رابطه (۲۵) بصورت:

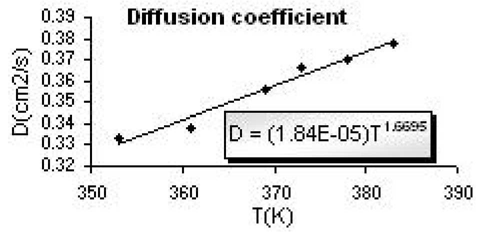
$$Nu = 2 + 1.09\,\mathrm{Re}^{0.74}$$

و رابطه D_{AB} با T بصورت:

$$D_{AB} = 1.84\times10^{-5}\,T^{1.67}$$

ارائه مي شود. در رابطه اخير اگر T برحسب K جايگزين شود ضريب نفوذ برحسب $cm^2/\sec$ بدست مي آيد.
روابط بدست آمده برای ضرایب انتقال گرما و نفوذ با نتایج ارایه شده توسط استروميلو [۱۲] و مارولیس[۳] 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.





شکل ۶ : مقادیر بدست آمده برای Nu و D_{AB} از تطابق نتایج معادلات مدل با دادهای تجربی.

ارائه و مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های تجربی واحد صنعتي

پس از اینکه تابعیت ضریب انتقال گرما و نفوذ رطوبت از شرایط عملیاتی مشخص شد، همه چیز مهیاست تا با در نظر گرفتن ۸ شرط مرزی بعنوان ورودی بتوان مقادیر ۸ پارامتر عملیاتي را محاسبه کرد؛ شرایط مرزی مي تواند مربوط به بالا یا پایین برج باشد و ازاین نظر محدودیت خاصي وجود ندارد. برنامه شبیه سازی این امکان را فراهم مي کند که علاوه بر تخمین مقادیر پارامتر ها در خروجی، مقادیر تمامي هشت پارامتر را در هر مقطعي از برج بتوان محاسبه کرد.

مقایسه پارامتر ها در مقاطع مختلف از برج

با توجه به محدودیتهای واحد صنعتي موجود، اندازه گیری سرعت جریان و دمای هوا فقط در مقاطع خاصي از برج امکان پذیر است، بنابراین مقایسه تغییرات این دوپارامتر در طول برج با نتایج شبیه سازی، در شکل (۷) ارائه شده است.
شرایط مرزی مربوط به این دو سری از نتایج بدست آمده یکسان بوده و عبارتست از :

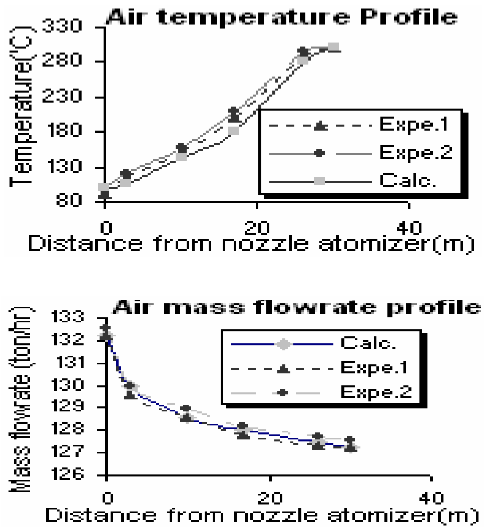
$\dot{m}_{sluury} = 18000 kg/hr$ و $\dot{m}_{air}|_{Down} = 127250 Kg/hr$

$T_{Slurry} = 79\ ^\circ C$ و $T_a|_{down} = 300\ ^\circ C$ و $Z|_{Down} = 0$

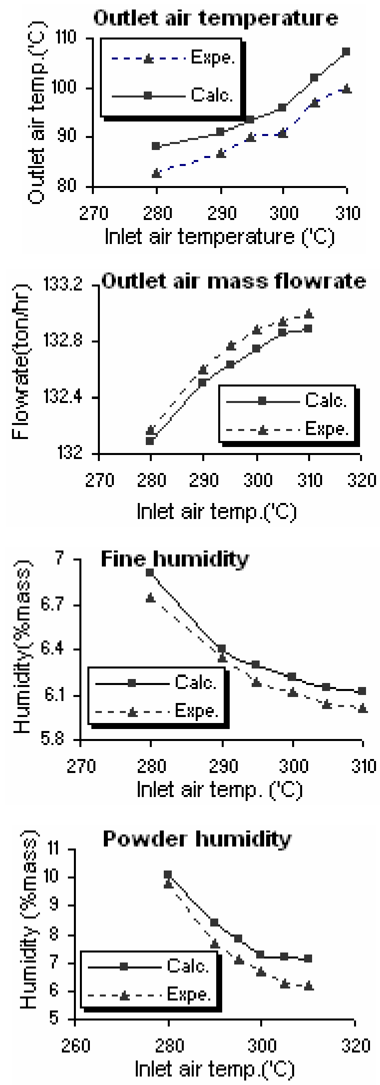
$F|_{Down} = 0$ و $y|_{Down} = 0.011$ و $x|_{top} = 0.4$

جدول۲ : داده های تجربی سیستم خشک کن افشانه ای صنعتی.

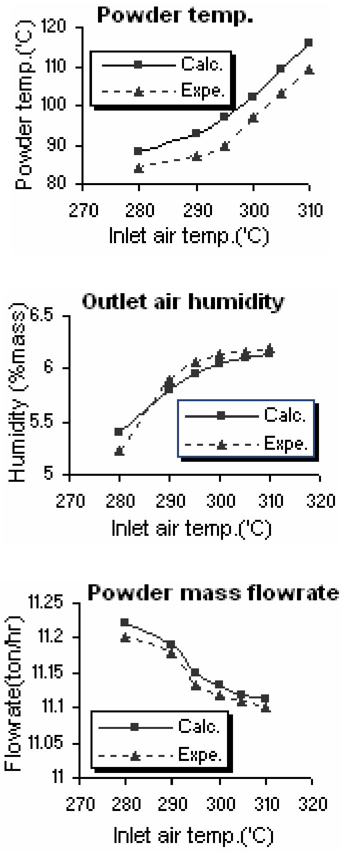
Tower location	Test	Temp. (°C)		Humidity (mass %)			Flow rate (ton/hr)		
		air	slurry/powder	Air	Fine	Slurry/powder	air	slurry/powder	fine
Top	1	93	78	6.59	6.2	40	112.700	18.000	475
Down	1	297	110	1.15	-	8.5	106.500	12.540	-
Top	2	90	79	6.5	6.5	40	116.257	18.000	520
Down	2	295	108	1.21	-	8.1	110.000	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	-



شکل ۷ : تغییرات دما و سرعت جریان هوا در طول برج.



شکل ۸ : نتایج محاسبات مدلسازی به منظوربررسی تغییرات هفت پارامتر سیستم در اثر تغییر یک پارامتر عملیاتي (دمای هوای داغ ورودی) و مقایسه با داده های تجربي.



ادامه شکل ۸ : نتایج محاسبات مدلسازی به منظوربررسی تغییرات هفت پارامتر سیستم در اثر تغییر یک پارامتر عملیاتي (دمای هوای داغ ورودی) و مقایسه با داده های تجربي.

مقایسه نتایج در خروجي از برج

در این بخش هفت شرط مرزی را ثابت نگهداشته و تغییرات پارامتر های عملیاتي را نسبت به تغییرات یکی از شرایط مرزی (مثلا دمای هوا ورودی در پایین برج) بررسي مي کنیم.

همانگونه که در نمودارهای شکل (۸) مشاهده می شود میزان تطابق نتایج محاسباتی با داده های تجربی قابل قبول و همواره کمتر از ۱۰٪ می باشد که این مطابقت را می توان موید درستی مدلسازی تلقی نمود.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان مي دهد خطای بیشینه محاسبات در مقایسه با داده های تجربی در حدود ۱۰% است. بنا براین به نظر مي رسد که مدل ارائه شده برای مکانیسم انتقال ذرات پودر به فاز ذرات ریز مي تواند با

دقت قابل قبولي در شبيه سازی سيستم های مشابه مورد استفاده قرار گيرد. البته در صورت نياز مي توان از بسط همين روش برای اندازه مش های متنوع تر تخمين دقيقتری را برای FTR ارائه کرد. همچنين نتيجه مهم ديگر اين است که مجهولات مفروض در معادلات مدلسازی (مانند تابعيت NU و D_{AB}) نمي توانند مانع کارآيي مدل شده و با دردست داشتن اطلاعات تجربی کافیاز سيستم مي توان تمامي اين پارامتر ها را معين نمود و از مدل ارائه شده استفاده کرد.

تشکر و قدرداني

در پايان از تلاشها و مساعدت مديريت واحد تحقيق و توسعه و مهندس رضازاده سرپرست واحد توليد پودر شوينده شرکت شيميايي بهداد سپاسگزاری مي شود.

فهرست علائم

E : سرعت جريان جرمی هوا [kg/hr]

R : سرعت جريان جرمی پودر در فاز پايين رونده [kg/hr]

F : سرعت جريان جرمی ذرات ذرات ريز [kg/hr]

y : کسر جرمی رطوبت در هوا

Y : کسر مولی رطوبت در هوا

x : کسر جرمی رطوبت در پودر

z : کسر جرمی پودر در ذرات ذرات ريز

N_A : شار انتقال رطوبت از ذرات پودر به هوا $[mol/m^2.hr]$

N_A' : شار انتقال جرم از ذرات ريز 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 ريز $[m^2/m^3]$

ϕ : تخلخل بستر برای ذرات پودر

ϕ' : تخلخل بستر برای ذرات ريز

ϕ_P : تخلخل ذره پاشيده شده

M : جرم ملکولی آب

ρ_W : چگالي آب $[kg/m^3]$

ρ : چگالي هوای داغ $[kg/m^3]$

ρ_P : چگالي ذره پاشيده شده $[kg/m^3]$

ρ_S : چگالي دوغاب $[kg/m^3]$

T_S : دمای فاز پودر در هر مقطع از برج [°C]

T_a : دمای هوا ی داخل برج در هر مقطع از برج [°C]

C_{Ps} : ظرفيت گرمايي ويژه پودر [J/kg.°C]

C_{Pa} : ظرفيت گرمايي ويژه هوا [J/kg.°C]

T_0 : دمای مبنا [°C]

h : ضريب انتقال گرما $W/m^2.'C$

R_P : شعاع قطره پاشيده شده [m]

R_h: شعاعی از قطره پاشيده شده که در ابتدای مسير نفوذ است (شعاع مرطوب ذره) [m]

d_{fine} : حداقل قطر قطره پاشيده برای رفتن از فاز R به فاز F در هر مقطع از برج [m]

u_t : سرعت حدی ته نشينی [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 پاشيده شده $[mol/m^3]$

D_{AB} : ضريب نفوذ رطوبت در توده هوا $[m^2/s]$

D_e : ضريب نفوذ موثر رطوبت در ذره پاشيده شده $[m^2/s]$

C_d : ضريب کشش

A_r : سطح تنقال جرم برای جزء ديفرانسيلی ذره پاشيده شده $[m^2]$

m_{hp} : جرم قسمت مرطوب ذره [kg]

m_{dp} : جرم قسمت خشک ذره [kg]

m_{P0} :جرم قطره پاشيده شده قبل ازآغاز انتقال جرم وحرارت در تماس باهوا

x_A : کسر مولی رطوبت در هر شعاع از درون ذره پاشيده شده

x_A^* : کسر مولی اشباع در هر شعاع از درون ذره پاشيده شده

K : ضريب تعادلی در فصل مشترک رطوبت داخل ذره با رطوبت هوای محيط

m_p : جرم ذر پاشيده شده [kg]

V_p : حجم ذره پاشيده شده $[m^3]$

d_i : قطرهای مختلف(مش بندی) موجود در ذرات پاشیده شده [m]

P_i : درصد فراوانی هریک از اندازه مش ها

D_{50}: قطر متوسط [mm]

d: قطر توربین {mm]

Vp: سرعت محیطی [cm/s]

η: گرانروی مایع داخل افشانکهای پاشش [gr/cm.s]

ρ: چگالی مایع داخل افشانک [gr/cm^3]

Nu : عدد ناسلت

Re : عدد رینولدز

FTR : تابع سرعت انتقال ذرات ریز در واحد طول برج [kg/m.hr]

مراجع

1 - Zbieinski, I., Strumillo, C. and Delag, A. (2002). "Drying kinetics and particle residence time in spray drying." *Drying Technology,* Vol. 20, PP.1751-1768.

2 - Zbieinski, I. (1995). "Development and experimental verification of momentum- , heat- and mass-transfer model in spray drying." *The Chemical Engineering Journal,* Vol. 58, PP.123-133.

3 - Krokida, M. K., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D. (2002). "Heat and mass transfer coefficient in drying: Compilation of literature data." *Drying Technology,* Vol. 20, No.1, PP.1-18.

4 - Palencia, C., Nava, J. and Herman, E. (2002). "Spray drying dynamics modeling with a mechanistic model." *Drying Technology,* 2002, Vol. 20, No. 3, PP.569-586.

5 - Fletcher, D., Guo, B., Harrie, D. and Langrish, T. (2003). "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*.

6 - Fletcher, D. and Langrish, T. (2001). "Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying." *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 40, PP.345-354.

7 - Oakley, D. E. (1997). "Produce uniform particle by spray drying." *Chemical Engineering Progress,* PP.48-55.

8 - Liang, H., Shinohara, K., Minoshima, H. and Matsushima, K. (2001). "Analysis of constant-rate period of spray drying of slurry." *Chemical Engineering Science,* Vol. 56, PP.2205-2213.

9 - Mohammad, F. (2003). "A new approach to modeling of single droplet drying." *Chemical Engineering Science,* Vol. 58, PP.2985-2993.

10 - Kadja, M. and Bergles, G. (2003). "Modeling of slurry droplet drying." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, PP.829-844.

11 - Keishi, G. and Hiroaki, M. (1997). *Powder Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc., 2nd Edition.

12 - Strumilo, C. and Kudra, T. (1998). *Drying: Priciples, Applications and Design,* translated by H. Pahlavanzadeh, Tarbiat Modarres University Press.

13 - Fogler, H. S. (2002). *Elements of chemical reaction engineering,* Prentice-Hall Inc., 3rd Edition.

14 - Hoepffner, Th. *Spray Drying*, Report published by WEIR ENTRPIE, ZA Les Fayaux, Angerville La Campagne, BP 3206, 27032, EVREUX CEDEX, PP.1-24.

15 - Filkova, I. *Drop size distribution of non-Newtonian slurries*, Drying'80, PP.346-350.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Co-Current
2 - Plug Flow
3 - Fines Transfer Rate
4 - Correlation
5 - Back Calculation
6 - Terminal velocity
7 - Retarding Force