

مدل سازی انتقال حرارت در خشک کن پاششی به منظور انتخاب عایق مناسب جهت سقف مخزن

امید رضا روستاپور^۱ و حمید رضا گازر^۲

1- استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی - مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی
فارس، roustapour@farsagres.ir

2- استادیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، hgazor@yahoo.com

چکیده

عایق کاری مخزن خشک کن پاششی به منظور کاهش تلفات حرارتی و در راستای افزایش راندمان ضروری است. طراحی و انتخاب عایق مناسب بر اساس نرخ انتقال حرارت از سطح مورد نظر صورت می پذیرد. از روش های دستیابی به نرخ انتقال حرارت مدل سازی عددی جریان در خشک کن پاششی است. در این راستا جریان در یک خشک کن پاششی نیمه صنعتی از نوع بلند با استفاده از حجم محدود و تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت تقارن محوری مدل سازی گردیده است. برای شبیه سازی ابتدا هندسه و شبکه میدان های فیزیکی توسط نرم افزار Gambit تولید و سپس نسبت به حل معادلات بقا شامل جرم، مومنتوم و انرژی توسط نرم افزار Fluent اقدام می شود. آشفتگی جریان با استفاده از مدل k-ε تعریف شده است. تمامی نواحی مربوط به جداره مخزن از جمله سقف به صورت انتقال حرارت جابجایی تعریف می شود. جهت انتخاب عایق در سقف بر اساس درصد کاهش اتلاف حرارت، نسبتی از رسانندگی گرمایی به ضخامت عایق (K/L) به دست می آید. این نسبت جهت انتخاب ضخامت و یا تعیین جنس عایق کافی خواهد بود. دما در هسته مرکزی جریان بیشتر از بقیه نواحی خشک کن بوده و با دور شدن از هسته مرکزی در امتداد شعاعی، دما کاهش می یابد. الگوی تغییرات دما در خشک کن نشان گر این است که در زیر ناحیه ورودی هوا در خشک کن بیشترین گرادیان دمایی وجود دارد، به طوریکه در هسته مرکزی و در زیر حلقه های ورود، دمای هوا حداکثر مقدار خود را دارا است. در محاسبه ضرایب جابجایی مشخص شد که سطح افقی گرم پایینی که در قسمت سقف واقع شده است بیشترین ضریب جابجایی را دارد.

کلمات کلیدی: خشک کن پاششی، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، الگوی توزیع دما، رسانش گرمایی، عایق کاری

مقدمه

انجام عملیات فرآوری مناسب بر روی محصولات به منظور کاهش درصد فساد و افزایش عمر مفید آن از اهمیت زیادی برخوردار است. از عملیات فرآوری مهم، خشک کردن محصولات توسط خشک کن پاششی برای افزایش عمر مفید آنها می باشد. اساس کار خشک کن پاششی، تماس قطرات مایع با جریان هوای گرم داخل خشک کن است. این خشک کن برای تولید پودر مواد مختلف در قسمت های مختلف صنعت، از قبیل صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی و پلیمری استفاده به سزایی دارد.

از محاسن خشک کن پاششی استفاده از دمای اولیه بالا جهت خشک کردن و کوتاه بودن زمان تبخیر می باشد. در لحظه تماس قطرات با هوای گرم ورودی، تبخیر آب آزاد صورت گرفته و دمای سطح قطرات برابر با دمای حباب تر می باشد، لذا تنش حرارتی به ذرات اعمال نشده و دمای آنها افزایش آنچنانی نخواهد یافت و در نتیجه مشکل سوختن ذرات در لحظه برخورد با هوای گرم ورودی مرتفع خواهد شد [پهلوان زاده، 1377].

انتخاب عایق مناسب و کاهش تلفات حرارتی در خشک کن با عت افزایش راندمان خواهد گردید. سقف خشک کن پاششی سطح وسیعی برای اتلاف حرارت می باشد لذا انتخاب عایق مناسب به منظور کاهش تلفات حرارتی از ضروریات طراحی خشک کن است. با شبیه سازی دینامیک سیال جریان³ (CFD) در مخزن خشک کن پاششی شار حرارتی عبوری از سقف خشک کن محاسبه شده و بر این اساس می توان عایق مناسب را انتخاب نمود. خشک کردن مواد غذایی به طرق مختلف از جمله خشک کردن مواد غذایی مایع به کمک خشک کن پاششی، تحت تاثیر الگوی جریان سیال در محیط خشک کن می باشد. الگوهای جریان با حل عددی (CFD) معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان که بقاء جرم و مومنت را تشریح کرده و تحت عنوان معادلات ناویر- استوکس می باشد، قابل پیش بینی است. هندسه پیچیده بسیاری از تجهیزات خشک کن، حل تحلیلی این معادلات را غیرممکن ساخته اما حل عددی آنها امکان پذیر است. روابط اضافی جهت محاسبه اثرات آشفستگی بر لزجت موثر هوا، به روش عددی حل می گردند [صنیعی نژاد، 1383].

اوکلای و باها از مدل CFD برای شبیه سازی فرآیند خشک کردن استفاده نمودند آنها، ورودی هوای خشک کن پاششی را با استفاده از مدل دیفرانسیلی تنش رینولد (RSM) شبیه سازی کرده و اثرات آشفستگی را تحت جریان پیچشی قوی بررسی کردند. این محققان تشکیل گردابه های مرکزی و تغییرات تدریجی آنها⁴ را توسط مدل CFD مورد مطالعه قرار دادند. پیش بینی موفقیت آمیز در بررسی شکست و از بین رفتن گردابه های مرکزی، یک مرحله مهم در تعیین تاثیر تغییرات تدریجی آنها بر رسوب ذرات بر دیواره و گرم و خشک شدن بیش از حد ذرات می باشد [Oakley and Bahu, 1991].

لنگریش و فلچر نسبت به مدلسازی دینامیک سیال الگوی پیچیده جریان در خشک کن های پاششی کوتاه⁵ اقدام نمودند. در این تحقیق بعضی از کاربردهای صنعتی از قبیل پیش بینی رسوب ذرات بر دیواره و استفاده از نتایج در طراحی بهینه خشک کن شرح داده شده است [Langrish and Fletcher, 2001]. هوانگ و همکاران الگوی جریان هوا، دما، سرعت و پروفیل رطوبت در خشک کن های پاششی با پیکر بندی متفاوت مخزن بررسی نمودند. آنها با استفاده از مدل هندسی دو بعدی و مدل توربولانس standard k-ε و با کمک

³ Computational Fluid Dynamic

⁴ Precessing vortex core (PVC)

5- Short- form spray dryers

نرم افزار Fluent مطلوبترین هندسه ی مخزن را وابسته به ویژگی های خوراک، نوع پاشنده و اندازه ی توزیع قطرات تشخیص دادند. [Huang et al., 2003b]

مدلسازی خشک کن پاششی در مقیاس صنعتی با یک مدل سینتیک جدید برای حل حساسیت حرارتی با هندسه ی سه بعدی و استفاده از نرم افزار Fluent و مدل آشفتگی standard k-ε توسط هوانگ و مجومدار انجام شد. توافق خوبی بین این مدلسازی و داده های آزمایشی وجود داشت. ضم نا طراحی مجدد کارائی خشک کن پاششی به وسیله ی آنالیز تاثیر تغییر پارامترهای عملیاتی در فرایند خشک کردن پیش بینی شد [Huang, & Mujumdar, 2007].

زمان پرواز (ماندگاری) قطرات در خشک کن پاششی، بطور معنی دار تحت تاثیر جریان هوای ورودی به خشک کن، دبی تغذیه و نوع پاشش می باشد توزیع ذرات با تغییر دما تغییر محسوسی پیدا نمی کند. در واقع تاثیر دما بر توزیع ذرات و زمان ماندگاری آن ها معنی دار نیست [Roustapour et al., 2009]

کنترل نشست پودر در خشک کن پاششی به روش CFD و آزمایشگاهی توسط وو و همکاران بررسی شد. این کار با دستکاری تناوبی انرژی سطح دیواره انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که دیواره با انرژی پایین تر نشست شیشه ای ذرات را کاهش می دهد. آنها حالت بهینه عملیات برای داشتن دیواره با چسبندگی کمتر را ارزیابی نمودند. دمای عملیات فاکتور مسلط در این مورد خواهد بود [Woo et al., 2009]

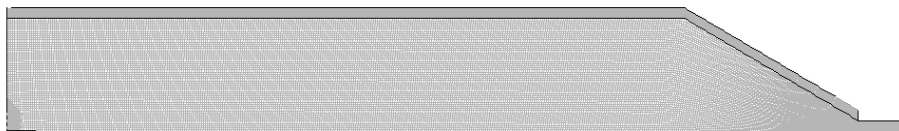
سیاری و همکاران جریان در خشک کن پاششی نیمه صنعتی (پیلوت) بلند با نازل فشاری دو سیال را به روش DFC مدل سازی کردند. برای راستی آزمایشی نتایج حاصل از شبیه سازی سرعت جریان، در آزمایشگاه در ارتفاع های مختلف خشک کن و در فواصل مختلف شعاعی از محور مرکزی تغییرات سرعت توسط سرعت سنج سیم داغ اندازه گیری شد. تغییرات دما نیز توسط ترانسدمترهای نصب شده در خشک کن قرائت گردید. نتایج خروجی حاصل از مدلسازی سه بعدی نازل دو سیال در محل ورود به خشک کن که به صورت متقارن محوری شبیه سازی شد استفاده گردید. مدل الگوی جریان هوا نشانگر وجود یک هسته مرکزی پر سرعت بوده که به سمت پایین محفظه خشک کن گسترش یافته است. دما در اطراف هسته مرکزی بیشتر بوده که بیشترین نرخ تبخیر در این ناحیه صورت می پذیرد. تغییرات دما با داده های آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی داشت [Sayyari et al., 2010]

مواد و روشها

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تکنیک استفاده از محاسبات عددی برای استخراج اطلاعات مربوط به جریان، خواص سیالات و سایر پدیده های همراه جریان، مثل انتقال حرارت، انتقال جرم و واکنش های شیمیایی در سیستم های مختلف می باشد. قابلیت های زیادی را می توان برای استفاده از CFD بر شمرد. از جمله: استفاده از شبیه سازی جهت طراحی و ساخت تجهیزات به جای روش سنتی ساخت و تست با توجه به حفظ اشل واقعی فرایندها است. در این روش همچنین شبیه سازی پدیده هایی که امکان آزمایش آنها اصلا مقدور نمی باشد می تواند انجام شود.

در این تحقیق جریان سیال درون خشک کن پاششی با نازل دو سیال با استفاده از تکنیک CFD و با استفاده از نرم افزار Fluent به صورت تقارن چند محوری مدل سازی شده است. مخزن خشک کن دو جداره بوده و هوای سرد در طی خشک کردن در آن جریان می یابد. جریان هوای سرد در کاهش دمای جداره و کاهش مشکل چسبندگی ذرات پودر به جداره مؤثر خواهد بود. جهت شبیه سازی جریان آشفتته از مدل k-ε استفاده گردید. هدف از این مدل سازی به دست آوردن الگوی جریان هوا و بررسی انتقال حرارت می باشد، که با دستیابی به پارامترهای فوق

می توان نسبت به انتخاب عایق مناسب در سقف خشک کن و بهینه سازی اقدام نمود . ابتدا هندسه و شبکه بندی میدانهای فیزیکی توسط نرم افزار Gambit تولید گردید. سپس به حل معادلات بقا، شامل جرم، مومنتوم و انرژی توسط نرم افزار Fluent اقدام شد. این شرایط برای شبکه های مختلف حل و استقلال از شبکه نیز انجام شد. با توجه به هندسه خشک کن و جداره هوا خنک، جهت تولید شبکه از سلول های چهارضلعی استفاده شده است . ساخت این قسمت و شبکه بندی آن پس از بررسی استقلال از مش خشک کن انجام پذیرفت و مخزن خشک کن با 24702 سلول در نظر گرفته شد. در ادامه با شبکه بندی جداره هوا خنک، تعداد نهایی سلول های شبکه 29540 عدد در نظر گرفته شد. شکل 1 شبکه نهایی مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل 1: هندسه و شبکه تولید شده برای خشک کن و جداره خنک کننده (تعداد سلول های تولید شده 29540 عدد)

نوع مسئله و روش حل آن در نرم افزار Fluent قابل تعریف می باشد . این مسئله در شرایط پایا⁶ و به روش تفکیکی⁷ معادلات آن حل می گردند. با استفاده از این روش، معادلات حاکم از یکدیگر تفکیک شده و به ترتیب حل می شوند. از آنجایی که این معادلات خطی نیستند لذا بایستی چندین تکرار⁸ در حلقه فرآیند حل، برای رسیدن به همگرایی صورت گیرد. در این روش مقادیر جدید خواص سیال بر اساس حل مورد نظر جایگزین می شود. سپس معادلات اندازه حرکت حل شده تا مقادیر سریعاً تجدید شوند. از مقادیر سرعت به دست آمده برای حل معادلات پیوستگی استفاده می شود. تجدید حل تا همگرا شدن مسئله با دقت 10^{-14} ادامه خواهد یافت . حل معادلات گسسته به روش ضمنی⁹ صورت می گیرد. در روش ضمنی برای متغیر مورد نظر، مقدار مجهول در هر سلول با استفاده از یک رابطه که شامل مقادیر مجهول و معلوم سلول های مجاور است محاس به می گردد . پس مقادیر مجهول در بیش از یک معادله در سیستم وجود دارد و این معادلات باید به طور هم زمان حل شده تا مقادیر مجهول به دست آیند. در این روش همگرایی، در صورت محقق شدن، سریع تر اتفاق خواهد افتاد [سلطانی و رحیمی اصل، 1378].

برای حل جریان خواص فیزیکی سهال در نرم افزار قابل تعریف است. این خواص شامل جرم حجمی، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی می باشد که مطابق با شرایط دمایی هوای ورودی (136°C) تعریف شد. بعد از معین نمودن روش مسئله، مدل آشفتگی، خواص فیزیکی سیال و شرایط مرزی، مسئله آماده برای حل معادلات اندازه حرکت، انرژی و پیوستگی سیال می باشد.

6 Steady state
7 Segregated
8 Iterate
9 Implicit

نتایج و بحث

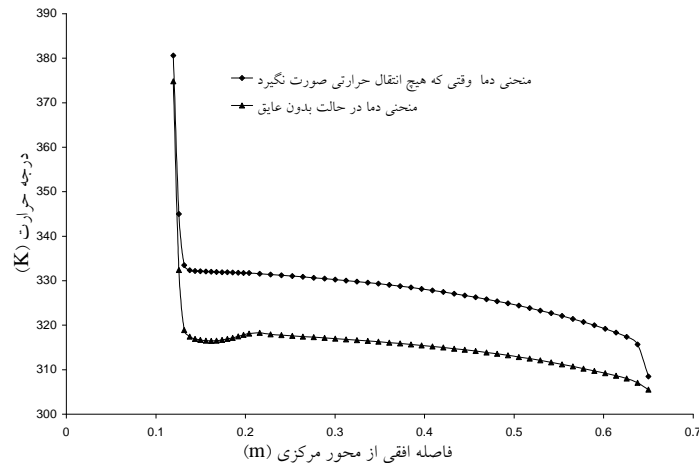
جهت عایق کاری سقف خشک کن ابتدا دانستن آهنگ انتقال حرارت از سقف به محیط، لازم است. این مقدار با منظور نمودن $8/487 \text{ W/m}^2 \cdot K$ به عنوان ضریب جابجایی محلی و گرفتن گزارش از حل صورت گرفت و در نهایت آهنگ انتقال حرارت $71/19 \text{ W}$ از سقف خشک کن به دست آمد. این مقدار $1/5$ درصد از کل آهنگ گرمای ورودی توسط هوای گرم ورودی به خشک کن می باشد. در مرحله بعد، با منظور نمودن آهنگ انتقال حرارت صفر برای سقف جریان دوباره حل گردید. این کار جهت به دست آمدن دمای داخلی دیواره پس از عایق کاری انجام شد. منحنی دما در سقف مخزن خشک کن وقتی که هیچ انتقال حرارتی صورت نگیرد و سقف کاملاً عایق باشد در شکل 2 نشان داده شده است. با داشتن مقادیر دمایی در سراسر سقف، دمای متوسط سمت داخلی دیواره با استفاده از رابطه (1)، 325 K محاسبه شد. ضخامت جداره 4 mm و مساحت سقف خشک کن $1/282 \text{ m}^2$ می باشد. با میانبایی ضریب رسانندگی گرمایی برای فولاد $AISI-304$ در دمای 325 K ، $15/1 \text{ (W/m.K)}$ است لذا دمای سمت بیرونی جداره با استفاده از رابطه (2)، $324/98 \text{ K}$ محاسبه گردید. این دما در واقع دمای سمت داخلی عایق است. دمای سمت بیرونی عایق 298 K معادل با دمای هوای محیط در نظر گرفته شد. میانگین این دو دما برابر $311/5 \text{ K}$ بوده که شرایط عایق در این دما بررسی گردید. چنانچه بنا باشد عایق مورد نظر که از 95 درصد شار عبوری ممانعت نماید شار عبوری $71/19$ به $3/56$ تقلیل خواهد یافت. به طور کلی اگر درصد مورد نظر a ($0 \leq a \leq 1$) باشد شار عبوری $71.19 \times (1-a)$ خواهد بود. بدین منظور با جایگذاری مقدار فوق در رابطه (2) نسبت رسانندگی گرمایی به ضخامت عایق (K/L) به دست می آید. با توجه به اینکه رسانش گرمایی یکی از خواص عایق است و غیر قابل تغییر لذا با تغییر ضخامت می توان به این نسبت دست یافت. شکل 3 با استفاده از رابطه (3) جهت سهولت در انتخاب عایق ترسیم گردید. چنانچه پلی استرن اکسترود شده را جهت عایق کاری در نظر بگیریم ضریب رسانش گرمایی این ماده در دمای $311/5 \text{ K}$ برابر $0/029 \text{ (W/m.K)}$ می باشد و با جایگذاری در نسبت فوق ضخامت 28 cm از این ماده جهت کاهش 95 درصدی اتلاف حرارت کافی خواهد بود.

$$\bar{T} = \frac{\sum rT}{\sum r} \quad (1)$$

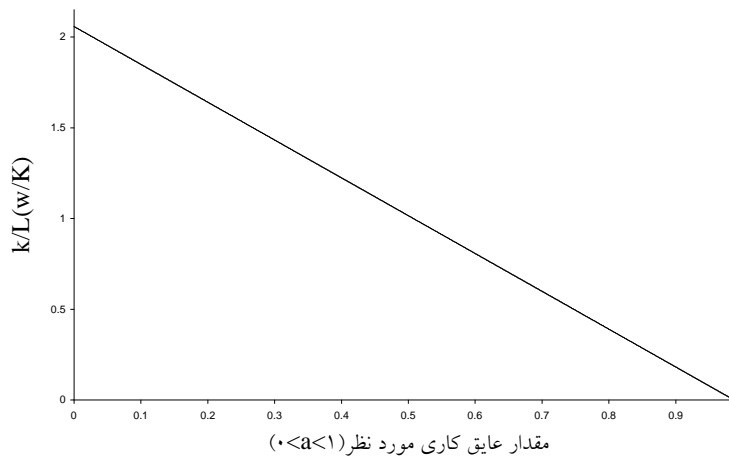
$$q = \frac{k \cdot \Delta T \cdot A}{L} \quad (2)$$

$$\frac{k}{L} = 2.058 - 2.058a \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (3)$$

در این روابط، \bar{T} = دمای متوسط، K ، T = مقدار دما در نقطه مورد نظر، K ، r = فاصله شعاعی از محور مرکزی، m ، q = آهنگ انتقال حرارت، W ، A = مساحت سقف خشک کن، m^2 ، k = رسانندگی گرمایی، $W/m.K$ ، L = ضخامت، m ، ΔT = اختلاف دما، K و a = درصد عایق کاری مورد نظر، $0 \leq a \leq 1$ می باشند.



شکل 2: دما در سقف مخزن خشک کن در حالت بدون عایق و عایق ایده آل (بدون هیچگونه انتقال حرارت)



شکل 3: مشخصات جهت انتخاب عایق در سقف خشک کن

نتیجه گیری

مدلسازی هندسی و شبکه بندی مخزن خشک کن دو جداره با استفاده از المان های چها ضلعی صورت گرفته و پس از مستقل نمودن متغیرها از اندازه و تعداد سلول های شبکه، مدل نهایی محیط جریان با 29540 سلول در نظر گرفته شد. مطالعه انتقال حرارت در سقف مخزن خشک کن با توجه به جنس مخزن و ضخامت ورق به کار گرفته شده و همچنین سطح انتقال حرارت سقف مخزن انجام شده است. با توجه به مقدار ضریب جابجایی محلی، آهنگ انتقال حرارت از سقف خشک کن بر اساس گزارش از حل عددی جریان 71/19 W- از سقف خشک کن به دست آمد. بر اساس نتایج مدل سازی دمای سطح بیرونی جداره که در واقع دمای سمت داخلی عایق است حدود 325 K می باشد لذا به منظور کاهش 95 درصدی شار حرارتی عبوری از عایق از جنس پلی استرن اکسترود شده، ضخامت حدود 28 cm مناسب می باشد.

منابع

الف- منابع فارسی

- 1 - استرامیلو، س. و کودرا، ت. 1377. خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی. پهلوان زاده، ح. مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس.
- 2 - سلطانی، م. و رحیمی اصل، ر.ا. 1387. دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار Fluent. نشر طراح.
- 3 - صنیعی نژاد، م. 1383. مقدمه‌ای بر مفاهیم جریان های آشفته و مدلسازی آنها. از سری جزوات آموزشی دینامیک سیالات، ویرایش سوم. دانشگاه صنعتی شریف.

ب- منابع لاتین

- 4- Huang, L., Kumar K., and Mujumdar A.S. 2003. A parametric study of the gas flow patterns and drying performance of co-current spray dryer: results of a computational fluid dynamics study. *Drying Technol.* 21(6): 957-978.
- 5- Huang, L. X., and Mujumdar, A. S. 2007. Simulation of an industrial spray dryer and prediction of off-design performance. *Drying Technol.* 25: 703-714.
- 6- Langrish, T.A.G. and Fletcher, D.F. 2001. Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying. *Chem. Eng. Proc.* 40: 345-354.
- 7- Oakley, D. and Bahu, R.E. 1991. Spray/gas mixing behavior within spray dryers. *Drying*, 91: 303-313.
- 8- Roustapour, O.R., Hosseinalipour, M., Ghobadian, B., Mohaghegh, F. and Maftoon Azad, N. 2009. A proposed numerical-experimental method for drying kinetics in a spray dryer. *Journal of Food Engineering.* 90: 20-26.
- 9- Sayyari, A.R., Roustapour, O.R., Tahhavor, A.R. Afsari, A. 2010. Numerical simulation of particle trajectories and velocity in a pilot plant spray dryer with a two-fluid nozzle. In 17th International Drying Symposium (IDS 2010): 3-6 October 2010, Hotel Maritim, Magdeburg, Germany as a poster presentation.
- 10- Woo, M.W., Daud, W.R.W., Tasirin, S.M., Talib, M.Z.M. 2009. Controlling food powder deposition in spray dryers: Wall surface energy manipulation as an alternative. *Journal of Food Engineering.* 94: 192-198.