



شبیه‌سازی فرایند خشک‌شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

مهدی مرادی^{۱*}، علی زمردیان^۲

۱. استادیار بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز (moradih@shirazu.ac.ir)

۲. استاد سابق بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز

چکیده

جهت بررسی فرایند خشک‌شدن دانه‌های ذرت با بهره‌گیری از ذرات بی‌اثر، یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف ساخته شد و تاثیر عوامل مختلف بر فرایند خشک‌شدن به صورت نظری و عملی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها بر روی دانه‌های ذرت با محتوای رطوبت اولیه حدود ۳۰ درصد (بر مبنای تر) در سه سطح دمای هوای خشک‌کننده (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و سه سطح نرخ جریان حجمی هوای خشک‌کننده (۰/۴۷، ۰/۹۴ و ۱/۴۱ مترمکعب بر دقیقه انجام گرفت. جهت انجام مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک‌کردن از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای تئوری اویلری به کار گرفته شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که نسبت رطوبت بدست آمده از مدل‌سازی، همبستگی بسیار خوبی با نسبت رطوبت بدست آمده از آزمایش دارد به گونه‌ای که ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۹۰ و ۰/۰۱ بدست آمد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، خشک‌کردن، ذرات بی‌اثر

*نویسنده مسئول: moradih@shirazu.ac.ir



شبیه‌سازی فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

مقدمه

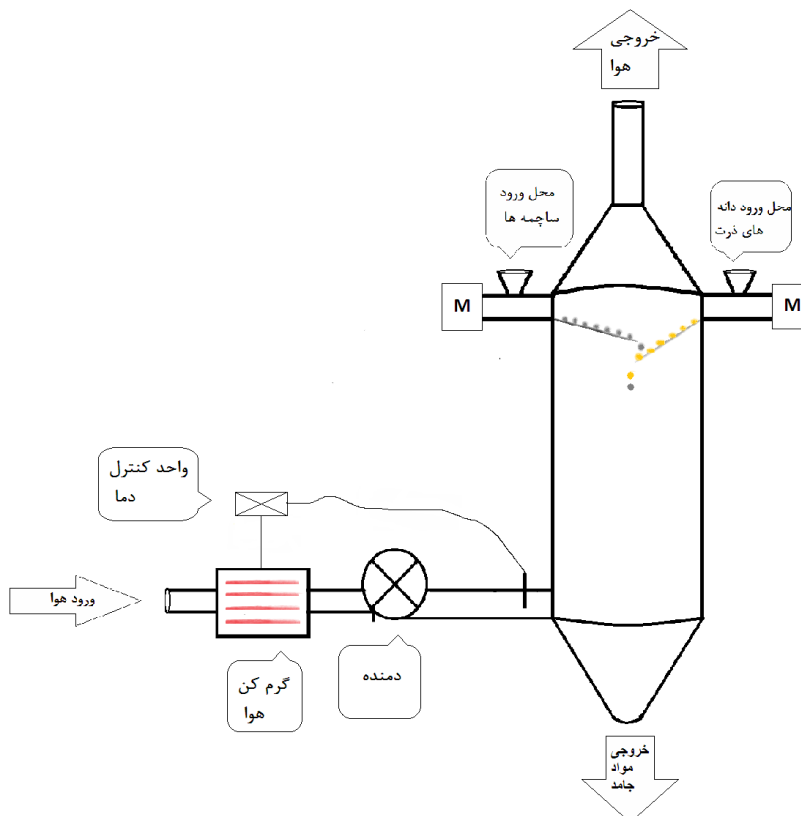
ذرت با نام علمی *Zea mays L.* از خانواده گرامینه است. این گیاه از نظر اهمیت و تولید جهانی در بین غلات پس از گندم و برنج در مکان سوم قرار دارد. رطوبت ذرت در هنگام برداشت ۳۰-۳۵٪ بر مبنای تر است. در صورتی که ذرت با همین رطوبت ذخیره شود دچار فساد خواهد شد. به همین علت رطوبت ذرت را با استفاده از فرآیند خشک کردن تا حدود ۱۳-۱۴٪ بر مبنای تر کاهش می‌دهند. این عمل در گذشته به صورت سنتی (خشک کردن در هوای آزاد و در معرض نور مستقیم خورشید) انجام می‌گرفت، ولی به دلیل بروز تغییرات نامطلوب در کیفیت محصول به لحاظ طولانی بودن زمان خشک شدن، عدم اعمال کنترل کافی در مراحل مختلف خشک شدن، احتمال حمله آفات و پرندگان، بروز تغییرات جوی، عدم وجود تشعشع کافی خورشید در بعضی مناطق جغرافیایی، غیریکنواختی در خشک شدن، آلودگی به گردوغبار و غیره محصول دچار ضایعات جبران‌ناپذیر می‌گشت. با استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی، معایب فوق تا حدود زیادی برطرف شده است [۱]. به‌طور کلی طی فرایند خشک کردن رطوبت زیادی از محصول خارج می‌شود بنابراین خشک کردن به صرف انرژی زیادی نیاز دارد. منابعی که در حال حاضر انرژی مصرفی را تأمین می‌کنند سوخت‌های فسیلی هستند که مقدار آن‌ها محدود و غیرقابل تجدید است. بنابراین حتی درصد کوچکی صرفه‌جویی در مصرف انرژی بهبود قابل توجهی را در کارایی انرژی ایجاد می‌کند. افزون بر این دیگر کیفیت نهایی محصول غذایی به شدت تحت تأثیر روش و راهکار خشک کردن قرار دارد. شبیه‌سازی فرایند خشک کردن می‌تواند به کاهش هزینه‌های آن کمک شایانی کند. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی این فرایند در کارهای پژوهشی مختلف ارائه شده است که روش دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک روش مفید برای شبیه‌سازی حرکت هوا در محفظه خشک‌کن و انتقال حرارت و جرم شناخته شده می‌باشد. اخیراً با پیشرفت سریع علم محاسبات، دینامیک سیالات محاسباتی به‌طور فزاینده‌ای به عنوان یک ابزار کارآمد جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک سیالات در علوم مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه تقریباً اکثر معادلاتی که به نوعی با سیالات سروکار دارند، به روش دینامیک سیالات محاسباتی حل می‌شوند. در این روش، معادلات حاکم بر حرکت سیالات، معادلات انتقال انرژی و انتقال جرم بر اساس بقای مومنتوم، بقای انرژی و بقای جرم به دست آورده می‌شوند. استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در مدل‌سازی فرایند خشک کردن مواد غذایی نیز چند سالی است که از طرف محققین مختلف مورد توجه قرار گرفته است. دلیل عمده این توجه این است که CFD کاملاً نظری بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است. چون روش مذکور سرعت، مومنتوم، دما و سایر پارامترهای مربوط به هوای خشک‌کننده را می‌تواند در نقاط مختلف خشک‌کننده پیش‌بینی کند و لذا قبل از هرگونه کار آزمایشگاهی با کمک پارامترهای فیزیکی محصول و دستگاه خشک‌کن می‌توان نتیجه نهایی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد [۲].

از این رو در تحقیق حاضر فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته که حاوی ذرات بی‌اثر می‌باشد، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک دستگاه خشک‌کن پیوسته جریان مخالف ساخته شد که در آن جریان هوای خشک‌کننده به صورت جابجایی اجباری توسط یک فن مکند برقرار می‌گردد. خشک‌کن نیمه‌صنعتی آزمایشگاهی ساخته شده در این طرح دارای یک مخزن استوانه‌ای بوده که در قسمت بالا دو محل ورودی جهت ورود دانه‌های ذرت و ساچمه‌ها تعبیه شده است (شکل ۱). همچنین قسمت ورود هوای گرم خشک‌کننده

در نیمه پایینی مخزن قرار داده شده است. البته هوای محیط با عبور از یک گرم کن الکتریکی ۶ کیلوواتی توسط فن دمنده الکتریکی به داخل مخزن که در آن دانه‌های ذرت در جریان (به سمت پایین) هستند، دمیده می‌شود. همه این قسمت‌ها در ادامه به تفصیل توضیح داده می‌شوند. نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا ذرت با رطوبت اولیه تقریباً ۳۰ درصد (بر مبنای تر) از ورودی دانه با نرخ مشخص تغذیه می‌شد. همچنین ذرات بی‌اثر نیز با نرخ از پیش تعیین شده‌ای از قسمت ورودی مخصوص ذرات بی‌اثر به داخل مخزن تغذیه می‌شدند. سرعت حرکت مواد در داخل مخزن توسط نقاله خروجی که در پایین مخزن قرار داشت، کنترل می‌شد. سرعت موتور DC استفاده شده برای خروج مواد به وسیله اینورتر نصب شده در داخل تابلو برق کنترل می‌شد. البته قابل ذکر است که اینورتر قبل از استفاده با زمان‌گیری دستی کالیبره شد. آزمایش‌ها در چهار سطح نسبت دبی ورودی ذرات بی‌اثر به دبی دانه‌های ورودی، سه سطح دمای هوای خشک‌کن، سه سطح سرعت حرکت مواد در داخل مخزن، سه سرعت مختلف هوای خشک‌کننده و در سه تکرار انجام گرفت. در حین انجام آزمایش‌ها، نمونه‌گیری توسط نمونه‌گیر ساخته شده در بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز، با فواصل زمانی مشخص انجام می‌گرفت. نمونه‌های دانه ذرت از ۶ قسمت مختلف مخزن خشک‌کن بدست می‌آمد. بعد از توزین با ترازوی دیجیتال A&D با دقت ۰/۰۰۱ گرم، در داخل آون الکتریکی قرار داده می‌شدند. بعد از ۱۶ ساعت، نمونه‌ها از داخل آون بیرون آورده شده و با توزین ثانویه، درصد رطوبت آن‌ها بدست می‌آمد. دقیقه، در زیر محل‌های نمونه‌گیری برای دانه ذرت، محل‌هایی هم مخصوص تعبیه دماسنج در داخل مخزن قرار داده شده بود. به گونه‌ای که از لوله‌هایی که به داخل مخزن جوش داده شده بودند، استفاده شد. یکسر لوله‌ها بسته و سر دیگر برای تعبیه دماسنج در آن‌ها باز بود. البته دیواره این لوله‌ها مشبک بود تا هوای خشک‌کن از داخل این لوله‌ها عبور نماید. به طور کلی ۶ محل برای اندازه‌گیری رطوبت نمونه و ۶ محل جهت اندازه‌گیری دمای هوای خشک‌کن استفاده گردید. همچنین برای کنترل دمای هوای خشک‌کننده از یک ترموستات دیجیتال استفاده گردید.



شکل ۱- تصویر شماتیک قسمت‌های مختلف دستگاه خشک‌کن پیوسته استفاده شده

به منظور خشک شدن یکنواخت تر دانه‌های ذرت از یک خشک کن جریان پیوسته جریان مخالف محصولات دانه‌ای استفاده شد. زیرا رطوبت محصول در طول بستر یکنواخت تر می‌شود. ضمن این که احتمال شکستن دانه‌های نزدیک به محل ورود هوای گرم، کمتر می‌شود. زیرا بستر محصول، در حال حرکت بوده و همه دانه‌ها به گونه یکنواخت تری در معرض هوای خشک کننده قرار می‌گیرند. از ذرات بی‌اثر به دلیل مزایای متعدد در تحقیقات مختلفی طی فرایند خشک شدن دانه‌ها استفاده شده است [۴]. از این رو در این تحقیق، تصمیم بر آن شد که تاثیر کاربرد ذرات بی‌اثر بر نرخ خشک شدن دانه‌های ذرت به شکل آزمایشگاهی بررسی گردد. بنابراین برای انجام تحقیق از ساچمه‌های فولادی به قطر ۴ میلی متر استفاده گردید. برای انجام شبیه‌سازی فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، از نرم افزار فلوئنت ۱۴ استفاده گردید. سایر تنظیمات و ورودی های نرم افزار به شرح جدول ۱ تعریف شدند:

جدول ۱- تنظیمات اعمالی در نرم افزار فلوئنت جهت شبیه‌سازی

توضیح	روش / مقدار
قطر معادل دانه ذرت (m)	۰/۰۰۸ [۵]
قطر ذره بی‌اثر (m)	۰/۰۰۴
ویسکوزیته دانه ای	[۶]
ویسکوزیته توده دانه	[۷]
ویسکوزیته اصطکاکی	[۸]
زاویه اصطکاک داخلی دانه ذرت (deg)	۴۵ [۵]
زاویه اصطکاک داخلی ساچمه فولادی (deg)	۲۵ [۹]
دمای دانه ای (m^2/s^2)	جبری
فشار جامدات	[۱۰]
تابع توزیع شعاعی	[۱۱]
حداکثر حد پر شونده گی	۰/۶۲
فشار اصطکاکی	[۱۲]
شرط مرزی ورود دانه ها و ذرات بی‌اثر	Mass flow inlet
شرط مرزی ورود هوای خشک کننده	Velocity inlet
شرط مرزی خروجی دانه ها و ذرات بی‌اثر	Pressure outlet
شرط مرزی خروجی هوای خشک کننده	Pressure outlet
گام زمانی مورد استفاده	۰/۰۰۱ ثانیه

بقیه شرایط مطابق پیش فرض نرم افزار تنظیم شد. روش حل، در این تحقیق بر مبنای فشار و الگوریتم تفکیک شده بود.

انتقال حرارت

در این تحقیق برای بررسی انتقال حرارت از هوای خشک کننده به دانه ذرت و ذرات بی‌اثر از مدل Gunn استفاده گردید [۱۳]. همچنین برای تعریف انتقال حرارت از ذرات بی‌اثر به دانه‌های ذرت، از کد نویسی برای نرم افزار فلوئنت استفاده شد. در این کد، شار حرارتی از ذرات بی‌اثر به دانه ذرت به صورت رابطه ۱ نوشته شد: [۱۴]



$$q'' = -k_g \frac{(T_g - T_i)}{dr} \quad (1)$$

در این رابطه k_g رسانایی دانه ذرت، T_g دمای دانه ذرت، T_i دمای ذره بی‌اثر، r شعاع دانه ذرت (بافرض کروی بودن) می‌باشند. جهت بدست آوردن نرخ انتقال حرارت برحسب واحد حجمی دانه‌ها (Q) از رابطه ۲ استفاده شد: [۱۵]

$$Q = \frac{6q'' \alpha_g \alpha_i}{d_g} \quad (2)$$

که α_g ، نشان‌دهنده کسر حجمی دانه‌های ذرت، α_i ، نشان‌دهنده کسر حجمی ذرات بی‌اثر و d_g قطر متوسط دانه‌های ذرت می‌باشند.

انتقال جرم

برای تعریف انتقال جرم از دانه به هوای خشک‌کننده، از مدل استاندارد لایه‌نازک Two term که نزدیک‌ترین تخمین را به نتایج آزمایش داشت، استفاده شد (رابطه ۳) [۱۶].

$$t = A \ln MR + B(\ln MR)^2 \quad (3)$$

که نسبت رطوبتی (MR) از رابطه ۴ بدست آمد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

که M_0 محتوای رطوبت اولیه دانه و M_e رطوبت تعادلی دانه می‌باشند.

که A و B برای لایه‌نازک ذرت به صورت رابطه ۵ می‌باشد:

$$A = -1.86178 + 0.00488T, B = 427.3640 \exp(-0.03301T) \quad (5)$$

که t زمان خشک شدن برحسب ساعت و T دمای دانه برحسب فارنهایت می‌باشند.

همچنین رطوبت تعادلی دانه ذرت با استفاده از رابطه ۶ بدست آمد: [۱۶]

$$1 - RH = \exp(-c(T + 50)M_e^n) \quad (6)$$

که T دمای هوا، $c = 3.82 \times 10^{-5}$ و $n = 2$ برای دانه ذرت می‌باشند.

رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده طبق رابطه ۷ نیز بدست می‌آید: [۱۶]

$$RH = \frac{101.3W}{0.622P_{vs} + WP_{vs}} \quad (7)$$

که RH رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده، W نسبت رطوبت^۱ و P_{vs} فشار بخار اشباع بوده که از رابطه ۸ بدست می‌آید: [۱۶]

$$\ln\left(\frac{P_{vs}}{R}\right) = \frac{-27405.53 + 97.54T - 0.15T^2 + 0.000126T^3 - 0.485 \times 10^{-7}T^4}{4.35 - 0.0394T^2} \quad (8)$$

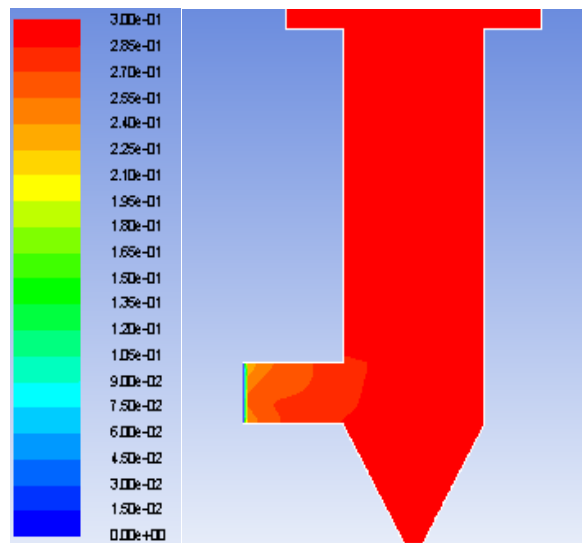
که در این رابطه، R ثابت گازها و T دمای مطلق هوای خشک‌کننده هستند.

نتایج و بحث

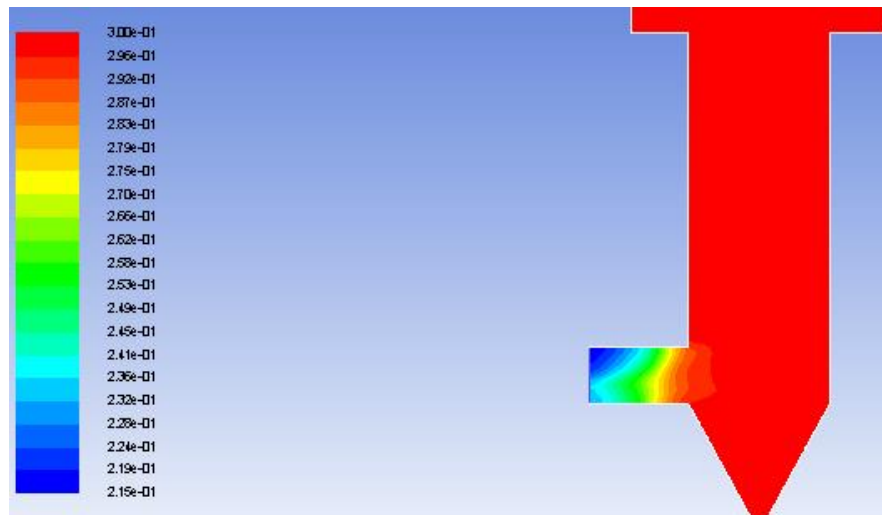
نتایج حاصل از تحلیل تاثیر عامل‌های مستقل بر سنتتیک خشک شدن دانه‌های ذرت نشان داد که استفاده از ذرات بی‌اثر، دمای هوای خشک‌کننده و نرخ هوای خشک‌کننده تاثیر مستقیم بر نرخ خشک شدن دانه‌های ذرت دارد. در این آزمایش‌ها اثر فاکتورهای دما (T) (در سه سطح)، سرعت هوا (V_a) (در سه سطح)، نسبت ذرات بی‌اثر به دانه (I) (در چهار سطح)، بر روی نسبت رطوبت محصول (M) در سه تکرار بررسی گردید. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان داد که این فاکتورها تاثیر معناداری بر فرایند خشک شدن دارند که نتایج این تحلیل در تحقیق جداگانه‌ای آورده شده است [۳].



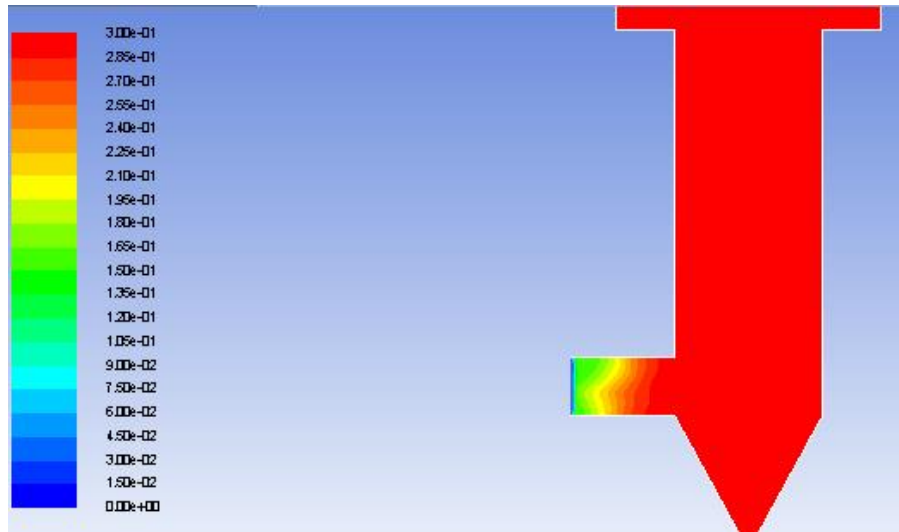
در تحقیق جاری شبیه‌سازی فرایند خشک شدن با استفاده از نرم افزار فلوئنت ۱۴ انجام شد که پروفایل محتوای رطوبت دانه‌های ذرت در مخزن خشک کن در حالت‌های مختلف بدست آورده و مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که همبستگی مناسبی بین محتوای رطوبت بدست آمده از آزمایش و مدل‌سازی وجود دارد به گونه‌ای که ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۰۱ بدست آمد. در شکل‌های ۲ تا ۱۳ پروفایل رطوبت دانه‌ها درون مخزن برای یک‌گ‌زمان (۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش) به‌عنوان نمونه آورده شده است.



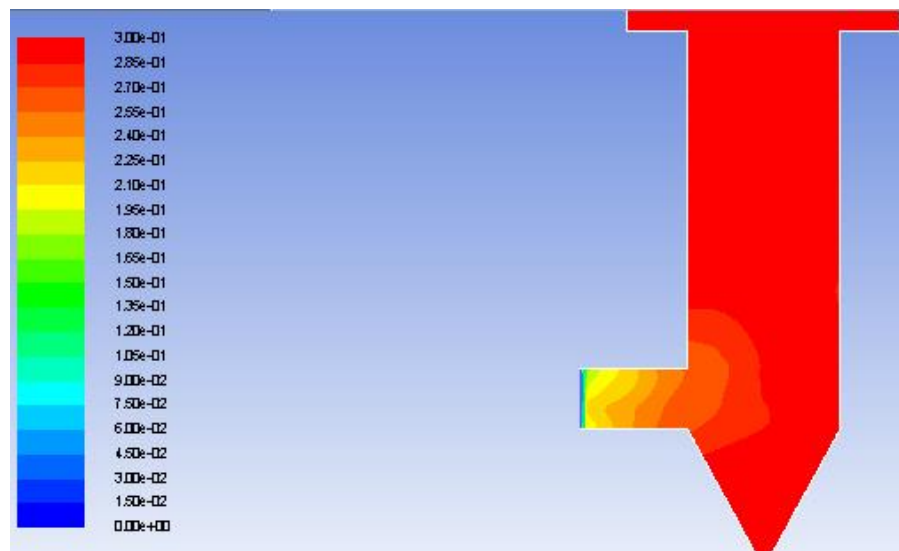
شکل ۲- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=0$) در ۵۰۰ ثانیه



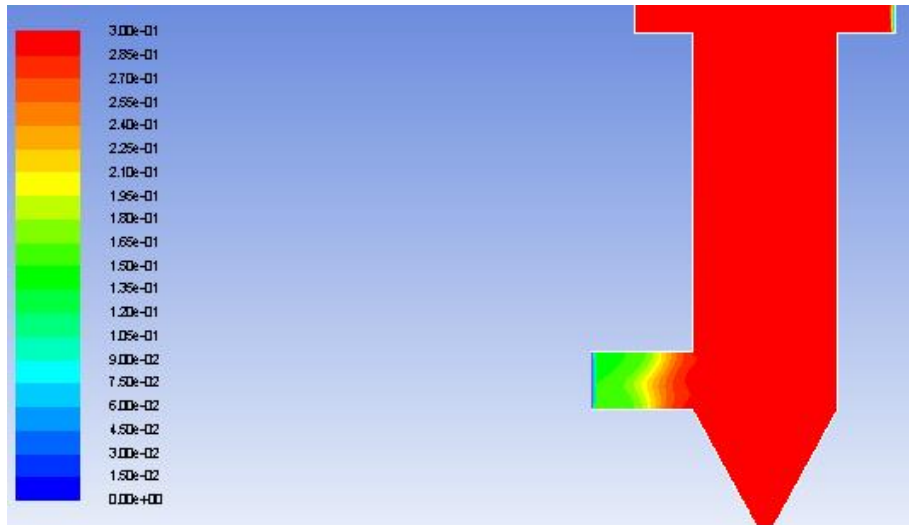
شکل ۳- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=1$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



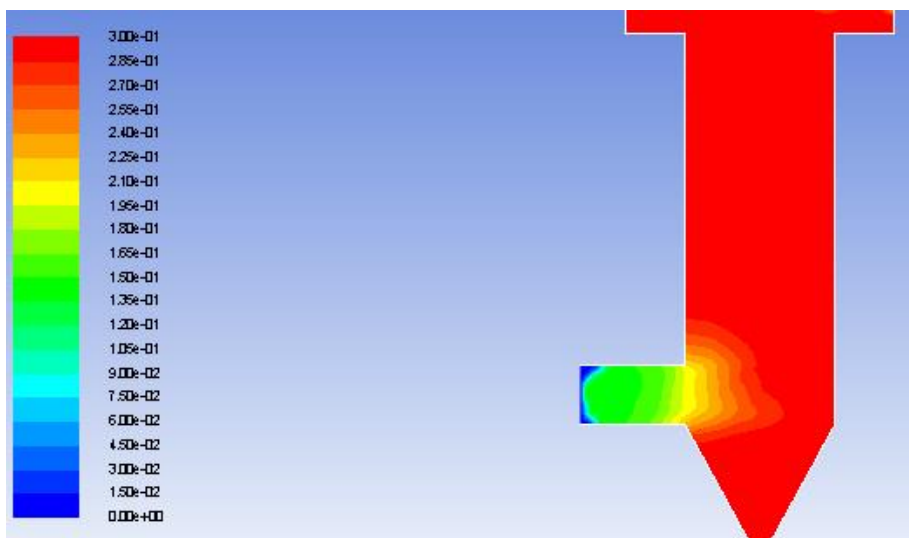
شکل ۴- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=2$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



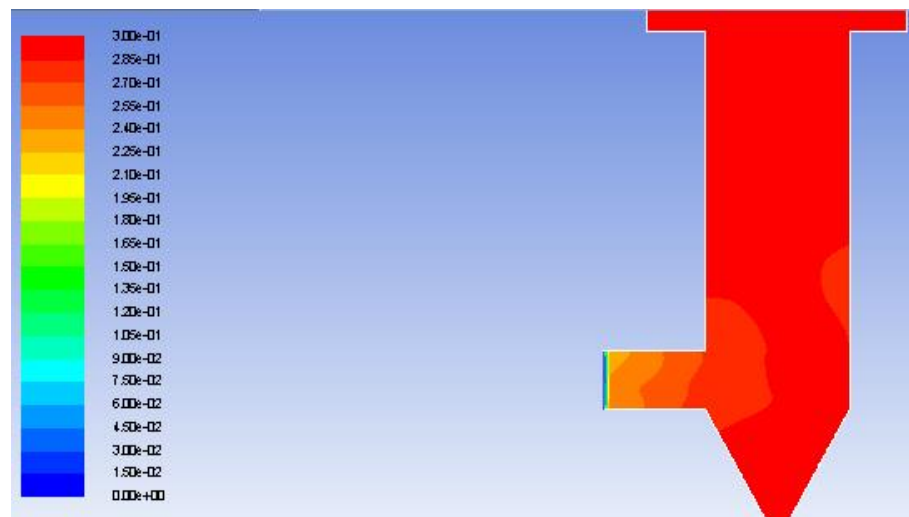
شکل ۵- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=0$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



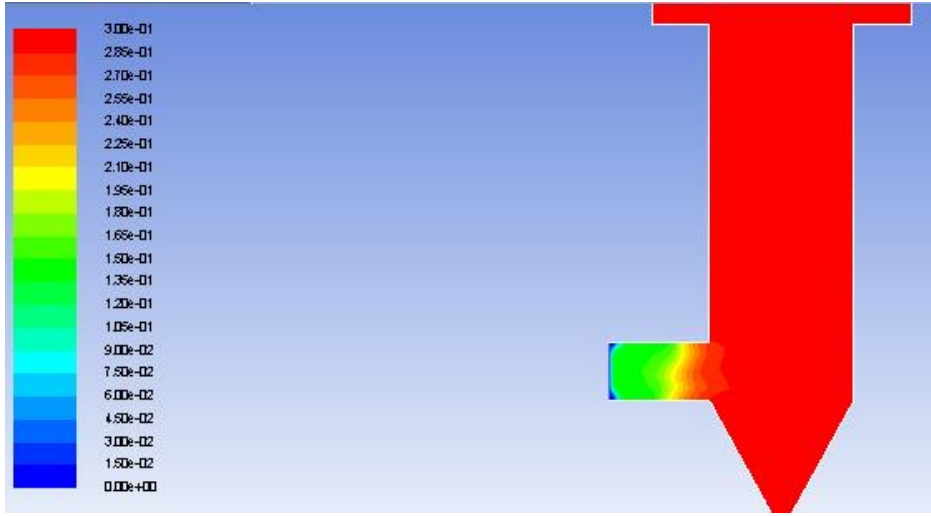
شکل ۶- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=1$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



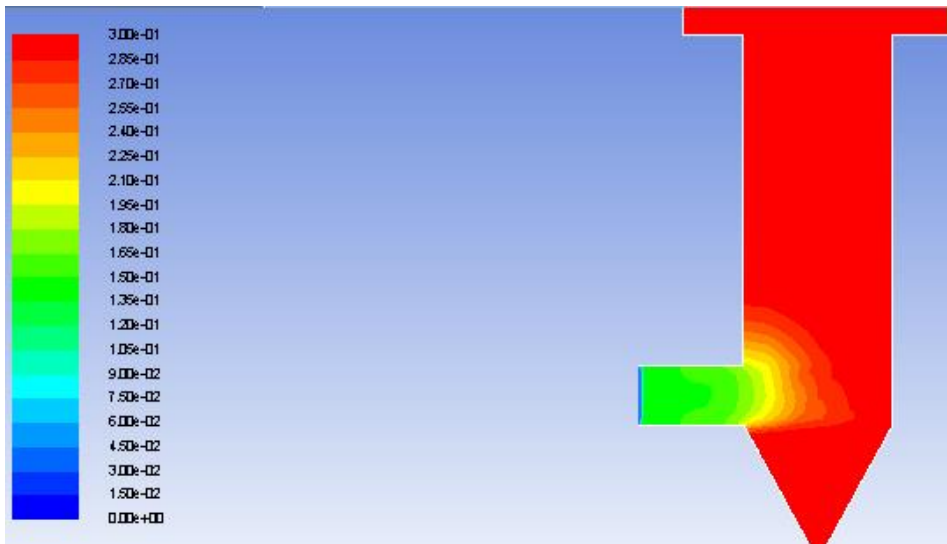
شکل ۷- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=1\text{m/s}$, $i=2$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



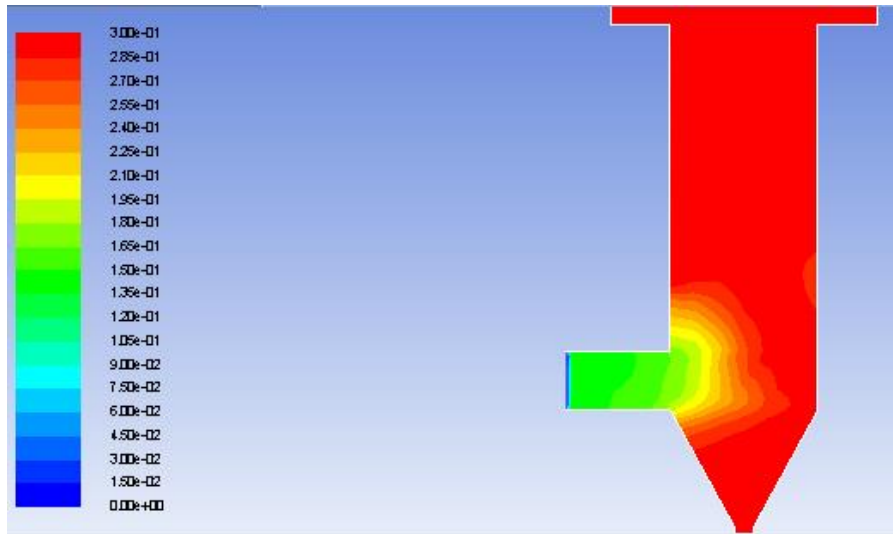
شکل ۸- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=0$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



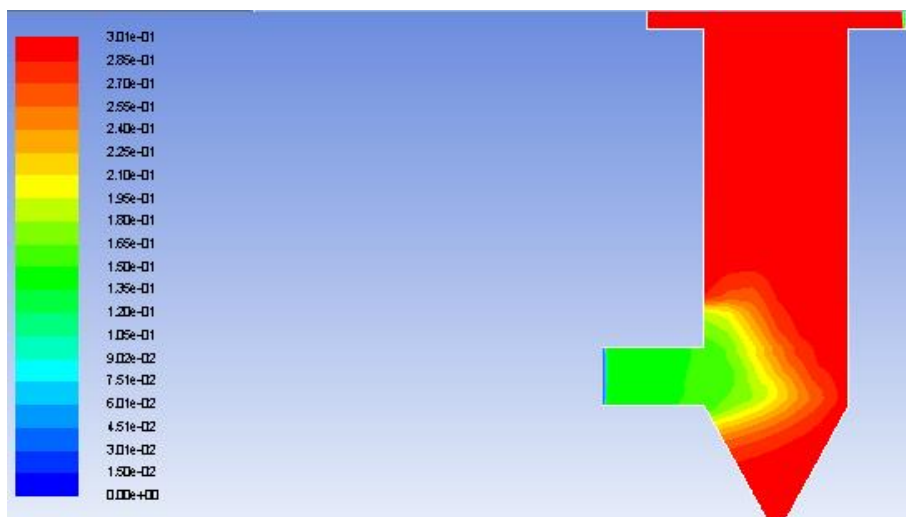
شکل ۹- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=1$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



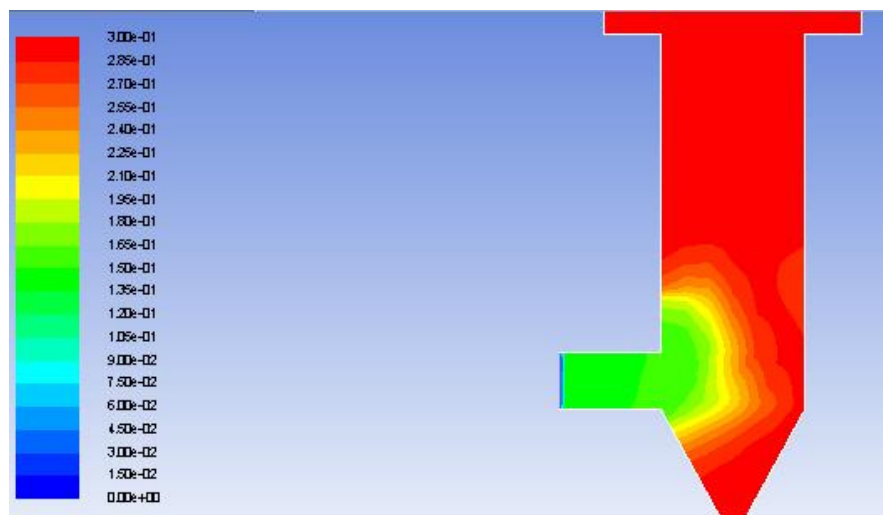
شکل ۱۰- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=50^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=2$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



شکل ۱۱- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=0$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



شکل ۱۲- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=1$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



شکل ۱۳- محتوای رطوبت دانه‌های ذرت (در حالت $T=60^{\circ}\text{C}$, $v_a=2\text{m/s}$, $i=2$) در زمان ۵۰۰ ثانیه بعد از شروع آزمایش



همان گونه که در شکل‌های بالا قابل مشاهده است، با افزایش تعداد ذرات بی‌اثر در واحد جرمی دانه‌های ذرت، نرخ خشک شدن دانه‌های ذرت افزایش می‌یابد. که این به دلیل حضور پرننگ ذرات بی‌اثر در فرایند انتقال حرارت به دانه‌ها و کمک به تسریع در خشک شدن آنها می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت و دمای هوای خشک‌کننده محتوای رطوبت دانه‌های ذرت کمتر می‌شود. زیرا با افزایش سرعت هوای خشک‌کننده ضریب همرفتی آن افزایش یافته و لذا موجب تسریع در فرایند انتقال حرارت از دانه به هوای خشک‌کننده می‌شود. از طرفی با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، اختلاف دمای زیاد بین هوای خشک‌کننده و دانه ذرت موجب گرم شدن سریع تر دانه‌ها شده بنابراین دانه‌ها زودتر خشک می‌شوند. در قسمت پایین مخزن خشک‌کن به دلیل این که به هوای خشک‌کننده نزدیک‌تر است، نرخ خشک شدن نسبت به قسمت‌های بالای مخزن، بیشتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر فرایند خشک کردن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی گردید که نتایج شبیه‌سازی نشان داد همبستگی مناسبی بین داده‌های حاصل از آزمایش و مدل وجود دارد.

منابع

۱. مرادیم، و کارپرور فرد س.ح. ۱۳۹۴. مدل سازی فرایند خشک شدن دانه های ذرت در یک خشککن پیوسته حاوی ذرات بی اثر نشیره مهندسی شیمی ایران ۸۳: ۱۴-۲۵.
۲. مرادی، م. ۱۳۹۳. بررسی نظری و آزمایشگاهی یک خشک‌کن پیوسته جدید برای محصولات دانه ای به کمک ذرات بی‌اثر گرم شده. پایان نامه دکتری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۳. مرادی م، و زمردیان ع. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی سینتیک خشک شدن دانه های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف حاوی ذرات بی اثر مجله مهندسی شیمی ایران ۹۸: ۹۰-۸۱.
4. Hatamipour M.S., Mowla, D. (2006). Drying behavior of maize and green peas immersed in fluidized bed of inert energy carrier particles. *Food and Bioproducts Processing*. 84(C3): 220-226.
5. Tarighi J, Mahmoudi A and Alavi N. (2011). Some mechanical and physical properties of corn seed. *African Journal of Agricultural Research* 6(16): 3691-3699.
6. Gidaspow D., R. Bezburuah, and J. Ding. (1952). Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. In *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, pages 75-82.
7. Lun C. K. K., S. B. Savage, D. J. Jeffrey, and N. Chepurmy. (1984). Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette Flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *Journal of Fluid Mechanics*., 140:223-256.
8. Schaffer. D.G. (1987). Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. *Journal of Diffusion Equation*., 66:19-50.
9. Khakhar D.V. and Ashish V. Orpe. (2001). Surface granular flows: two related examples. *Advanced Complex Systems*. 4(4): 407-413.
10. Ma D. and G. Ahmadi. (1990). A thermodynamical formulation for dispersed multiphase turbulent flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 16:323-351.
11. Ibdir H. and H. Arastoopour. Modeling of multi-type particle flow using kinetic approach. *AICHE Journal*, May 2005.



12. Johnson, P.C. and Jackson, R. (1987). Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing. *J. Fluid Mech.*, 176:67-93.
13. Gunn D.J. (1978). Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidized beds. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 21:467-476.
14. Holman JP. (2002). *Heat Transfer*, 9th edition. McGraw-Hill, New York. 671 pp.
15. Roman G. Szafran and Andrzej Kmiec. (2004). CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer. *Indian Engineering Chemical Research*. 4: 1113-1124.
16. Brooker, D.B. , F.W. Bakker- Arkema and C.W.Hall. (1992). *Drying and Storage of Oilseeds*. The AVI Publishing Company , New York. 450p.



Simulating of the drying process of corn grains in a continuous counter current dryer by using CFD

M. Moradi^{1*}, A. Zomorodian²

1. Assistant professor of Biosystems engineering department of Shiraz University
2. Former professor of Biosystems engineering department of Shiraz University

Abstract

In order to investigate the drying process of corn grain by inert particles, a continuous counter current dryer fabricated and the effect of different factors on drying was investigated theoretically and practically. Experiments were performed on the corn grains with initial moisture content of 30% (on the wet basis) in three levels of air temperature (50, 60, and 70 °C) and three levels of air flow rate (0.47, 0.94, and 1.41 m³/s). To perform mathematical modeling of drying process, computational fluid dynamics technique on the basis of Eulerian approach was used. Modeling results revealed a good agreement between experimental and theoretical moisture ratio of the grain so that R² and RMSE was 0.90 and 0.01, respectively.

Keywords: CFD, Drying, Inert particles.

*Corresponding author

E-mail: moradih@shirazu.ac.ir