

# تحلیل ابعادی فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته حاوی ذرات بی‌اثر

مهدی مرادی<sup>۱\*</sup>، سید حسین کارپورفر<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۱

پیام‌نگار: moradih@shirazu.ac.ir

## چکیده

مدل خشک شدن دانه‌های ذرت در خشک‌کن پیوسته جریان مخالف، بر اساس تحلیل ابعادی به‌دست آمد و بررسی و ارزیابی شد. از دمای هوای خشک‌کننده، سرعت هوای خشک‌کننده، سرعت حرکت محصول در داخل مخزن، نسبت جریان جرمی ذرات بی‌اثر به دانه‌های ذرت در ورودی مخزن، هر کدام در سه سطح، ارتفاع نمونه‌برداری (در ۵ سطح)، و زمان نمونه‌برداری (در ۴ سطح)، به عنوان عوامل مؤثر بر فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت بهره گرفته شد. با تعیین گروه‌های بی‌بعد مستقل و وابسته، مناسب‌ترین مدلی حاصل و ارزیابی شد که گویای اثر تجمعی گروه‌های بی‌بعد مستقل بر گروه بی‌بعد وابسته به شمار می‌آید. ضریب تبیین این شبیه‌سازی معادل ۰/۸۵، میانگین خطا برابر ۶/۴۸ درصد، و خطای میانگین مربعی ۰/۰۱۸ بود که نمایانگر مدلسازی مطلوب داده‌هاست.

کلیدواژه‌ها: خشک‌کن پیوسته، دانه ذرت، ذرات بی‌اثر، مدل بی‌بعد

## ۱. مقدمه

دانه‌های ذرت به روش مصنوعی بسیار اهمیت دارد [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از روش بستر متحرک برای خشک‌شدن دانه‌ها از استقبال پژوهشگران زیادی برخوردار شده است [۲-۷]. استفاده از این روش به‌منظور خشک کردن محصولات، دارای مزایای زیادی از قبیل نیاز به سرمایه اولیه، مصرف انرژی کمتر و کاهش آسیب مکانیکی به دانه‌ها در مقایسه با سایر انواع روش‌های خشک کردن است [۲]. خشک‌کن‌های بستر متحرک به سه نوع جریان موافق، جریان مخالف و جریان عرضی تقسیم می‌شوند [۱].

یکی از مهمترین روش‌ها به‌منظور افزایش عمر انبارماتی دانه‌ها کاهش رطوبت آنها با استفاده از روش‌های مختلف خشک کردن است. برای کاهش رطوبت دانه‌های ذرت مقدار انرژی زیادی مورد نیاز است، به‌گونه‌ای که برای کاهش رطوبت هر تن ذرت از ۱ w.b<sup>۱</sup> / ۲۵٪ به ۱۵ w.b / ۱۵٪ حدود ۱۰۰ کیلوگرم آب تبخیر می‌شود که برای این کار به ۵۰۰ مگاژول گرما نیاز است. از این رو خشک کردن

\* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی بیوسیستم  
1. Wet Bbasis

اطلاعات به دست آمده از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، خشک شدن برنج بر اساس تحلیل ابعادی نظریه باکینگهام به دست آورده شد [۱۲]. آنان در این معادله بی‌بعد همه پارامترهای خشک شدن برای پیش‌بینی محتوای رطوبت دانه برنج را در طول فرایند خشک شدن ملاحظه می‌کنند. آنان معادلات تعادل گرمایی و جرمی دانه و هوا را بر اساس مدل شارپ نوشتند. برای حل مجموعه معادلات با مشتقات جزئی (تعادل گرمایی هوا، تعادل گرمایی دانه و تعادل جرمی دانه) از معادله لایه نازک خشک شدن دانه‌های برنج استفاده کردند. ۱۲ پارامتر موثر در فرایند خشک شدن یادشده عبارت بودند از: محتوای رطوبت دانه ( $M$ )، نرخ جریان جرمی هوا ( $G$ )، چگالی توده دانه ( $\rho_p$ )، مدت زمان خشک شدن ( $t$ )، دمای اولیه دانه ( $\theta_{in}$ )، دمای هوای ورودی ( $T_{in}$ )، رطوبت مطلق هوای خشک‌کننده ورودی ( $H_i$ )، رطوبت اولیه دانه ( $M_{in}$ )، رطوبت تعادلی دانه ( $M_{eq}$ )، عمق بستر ( $x$ )، سطح مخصوص دانه ( $a_s$ ) و شعاع معادل دانه ( $r_0$ ). ۴ بُعد اصلی [جرم ( $M$ )، طول ( $L$ )، زمان ( $t$ )، دما ( $T$ )] در این تحقیق عمل می‌کرد. بنابراین، بر اساس نظریه باکینگهام، حداکثر هشت گروه بی‌بعد مطابق معادله (۱) معرفی شد:

$$M(x, t) = f(M_{in}, M_{eq}, H_i, \frac{tG}{x\rho_p}, \frac{\theta_{in}}{T_{in}}, \frac{r_0}{x}, xa_s) \quad (1)$$

نتایج تحقیق آنها نشان داد که مدل بدون بُعد به دست آمده می‌تواند محتوای رطوبت دانه برنج را با دقت مطلوبی (ضریب تعیین  $^2$  ۰/۸۶۶ و خطای میانگین مربعی معادل  $^3$  برابر ۰/۰۱۴۶۸) پیش‌بینی کند و به دلیل سادگی مدل بی‌بعد به دست آمده و امکان ارائه همه عوامل موثر بر فرایند خشک شدن در یک معادله، استفاده از آن برای پیش‌بینی محتوای رطوبت دانه برنج، بسیار آسان بود [۱۲]. هدف از انجام این پژوهش معرفی یک مدل بی‌بعد برای خشک کردن دانه‌های ذرت در یک خشک‌کن پیوسته جریان مخالف حاوی ذرات بی‌اثر بود.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک دستگاه خشک‌کن پیوسته جریان مخالف طراحی و ساخته شد که در آن جریان هوای خشک‌کننده به صورت جابه‌جایی اجباری به کمک یک دمندة سه‌فازی تامین می‌شد.

خشک کردن به روش موازی (جریان مخالف و جریان موافق) به دلیل خشک شدن یکنواخت‌تر محصول و استفاده بهتر از انرژی نسبت به نوع جریان عرضی، دارای مزیت است [۸]. در خشک‌کن پیوسته، نوع جریان موافق به دلیل این که هوای سرد مرطوب از میان دانه‌های خشک شده عبور می‌کند، به سختی می‌توان محصول را با رطوبت پایین دریافت کرد [۹]. اما در خشک‌کن پیوسته جریان مخالف، به دلیل این که هوای گرم با محصول در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند، شرایط مناسب تری برای خشک شدن دانه‌ها فراهم می‌کند. امروزه پژوهشگران برای افزایش آهنگ خشک شدن دانه‌ها، از روش‌های ترکیبی استفاده می‌کنند. یکی از این روش‌ها، استفاده از ذرات حامل انرژی (ذرات بی‌اثر<sup>۱</sup>) برای افزایش آهنگ خشک شدن دانه‌ها است. به طور کلی جنس ذرات بی‌اثر غیر از جنس محصول خشک‌شونده است که دارای ظرفیت گرمایی کمتر و رسانایی بیشتری‌اند. این ذرات موجب افزایش آهنگ انتقال گرما به درون محصول خشک‌شونده می‌شود که در نهایت افزایش آهنگ خشک شدن محصول را در پی خواهند داشت [۱۰ و ۱۱].

پیش‌بینی محتوای رطوبت دانه‌ها طی فرایند خشک کردن عموماً بر مبنای دو روش نظری و تجربی امکان پذیر است. تعیین معادلات با مشتقات جزئی، هنگام استفاده از روش‌های نظری پیچیدگی‌های زیادی در پی دارد ضمن این که حل کردن آنها نیز خسته‌کننده است. تحلیل ابعادی به عنوان یک روش ریاضی برای کاهش پیچیدگی مسائل فیزیکی قابل استفاده است. بُعد هر کمیت فیزیکی ترکیبی از ابعاد فیزیکی پایه ای است که آن را تشکیل می‌دهند. ابعاد فیزیکی پایه عبارتند از: جرم ( $M$ )، طول ( $L$ )، زمان ( $t$ )، دما ( $T$ )، جریان الکتریکی ( $I$ )، شدت روشنایی ( $L$ ) و مولاریته ( $N$ ). تحلیل ابعادی برای برقرار کردن رابطه معقول و منطقی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل به کار می‌رود. این روش عموماً در آزمایش‌هایی که دارای تیمارهای متعدد و پارامترهای زیادی باشند، به کار می‌رود، زیرا در این حالت، سایر روش‌ها به دلیل پیچیدگی دارای دقت کمتری بوده و هزینه محاسبات نیز گزاف خواهد بود (فخرایی و کارپورفر، ۱۳۸۶). برخی پژوهشگران به معرفی مدل بی‌بعد برای خشک شدن دانه‌ها در حالت‌های خاص مبادرت کرده‌اند [۱۲-۱۴].

یک مدل بی‌بعد برای خشک کردن لایه ضخیم دانه‌های برنج از

2. Coefficient of Determination (R2)  
3. Root mean Square Error (RMSE)

1. Inert Particles

خشک‌کن نیمه صنعتی آزمایشگاهی ساخته شده در این طرح، دارای یک مخزن استوانه‌ای به ارتفاع یک متر و قطر داخلی ۲۵ سانتیمتر و ظرفیت تقریبی ۳۰ کیلوگرم ذرت بوده که در قسمت بالای آن دو محل برای ورود دانه‌های ذرت و ساچمه‌ها تعبیه شده بود (شکل (۱)). دانه‌های ذرت از گونهٔ دندان اسبی<sup>۱</sup> بوده که با رطوبت اولیه حدود ۱۰ درصد (برمبنای تر) از کارخانه خوراک دام خریداری شد و در آزمایشگاه با افزودن آب مقطر طی چندین مرحله، رطوبت آنها به ۳۰ درصد (برمبنای تر) رسید. ابعاد دانه‌های ذرت به کار رفته به طور متوسط ۵×۸×۱۱ میلی‌متر مکعب بود. در تحقیقی که مولا و حاتمی پور روی فرایند خشک شدن دانه‌ی ذرت در خشک‌کن بستر سیال انجام دادند، از دو جنس فولاد ضدزنگ و شیشه به عنوان ذرات بی اثر بهره بردند. آنان کره‌های فولادی را به عنوان مناسب‌ترین جنس برای خشک شدن دانه‌های ذرت معرفی کردند [۱۰]. از این رو، در تحقیق حاضر ذرات بی اثر از جنس فولاد ضد زنگ و با قطر ۴ میلی متر با آهنگ تغذیه از پیش تعیین شده‌ای از بخش ورودی مخصوص ذرات بی اثر به داخل مخزن وارد می‌شدند. بخش ورود هوای گرم خشک‌کننده در نیمه پایینی مخزن قرار داشت. هوای محیط با عبور از یک گرم کن الکتریکی ۶ کیلو واتی توسط دمنده به داخل مخزن دمیده می‌شد که در آن دانه‌های ذرت در جریان (به سمت پایین) بودند. به دلیل این که در قسمت خروجی مواد جامد در پایین مخزن، از یک مارپیچ نقاله‌ای با گام ۲/۵ سانتیمتری استفاده شده بود، مقدار بسیار کمی از هوای گرم از قسمت پایین مخزن خارج می‌شد، به گونه‌ای که جریان هوا با دست احساس نمی‌شد ولی قسمت اعظم هوای خشک‌کننده از قسمت بالای مخزن خارج می‌شد.

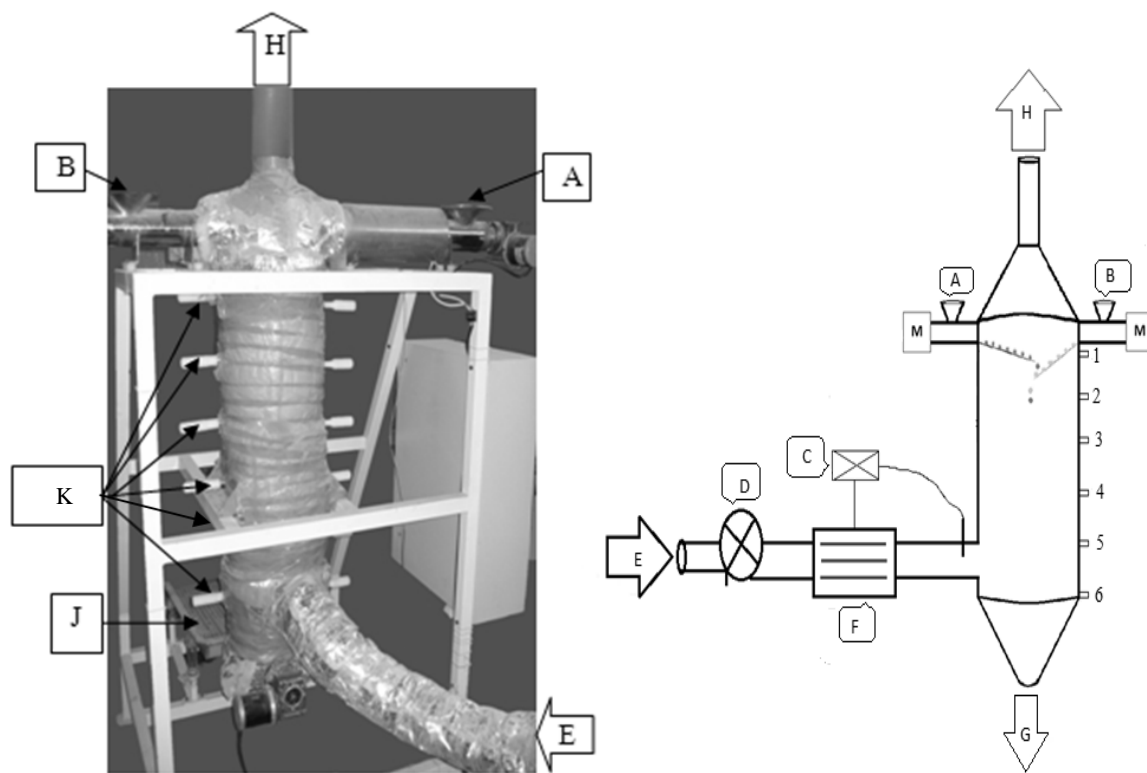
برای اندازه‌گیری دمای هوا درون بستر محصول، لوله‌هایی مشبک عرضی در ۵ نقطه مختلف به داخل مخزن (با ارتفاع متفاوت) متصل شدند. یک طرف این لوله‌های مشبک به قسمت داخلی مخزن جوش داده شده ولی طرف دیگر آنها باز بود تا دماسنج در داخل آنها تعبیه شود. برای بالا بردن دقت کار هنگام اندازه‌گیری، اطراف حسگر دما با عایق فوم پوشانده شد تا گرما هدر نرود. حسگر دمای مورد استفاده از نوع Testo 625 (Testo Company, Germany) با دقت

۰/۵ درجه سلسیوس بود. اندازه‌گیری دما با فواصل زمانی ۵ دقیقه انجام می‌گرفت.

دانه‌های ذرت با رطوبت اولیه حدود ۳۰ درصد برمبنای تر برای خشک شدن در داخل دستگاه خشک‌کن پیوسته جریان مخالف ریخته می‌شدند. نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا ذرت از ورودی دانه با نرخ مشخص تغذیه می‌شد (شکل (۱)). پس از پر شدن مخزن، موتور محرک نقاله خروج مواد جامد که در قسمت پایین دستگاه قرار داشت، روشن می‌شد. آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن از طریق نقاله خروجی مواد کنترل می‌شد. سرعت موتور جریان مستقیم<sup>۲</sup> به کار گرفته شده برای خروج مواد به وسیله مبدل نصب شده در داخل تابلو برق کنترل می‌شد. باید گفت که مبدل قبل از استفاده، با زمان گیر دستی واسنجی شده بود. آزمایش‌ها در سه سطح نسبت دبی جرمی ورودی ذرات بی اثر به دبی جرمی دانه‌های ورودی (۱، ۲ و ۳)، سه سطح دمای هوای خشک‌کننده (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس)، سه سطح آهنگ جریان جرمی دانه‌های خروجی از مخزن (۱/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر دقیقه)، سه سطح مختلف آهنگ جریان جرمی هوای خشک‌کننده (۰/۵۳۷، ۱/۰۷۴ و ۱/۶۱۱ کیلوگرم بر دقیقه) و در سه تکرار انجام شد. در ضمن انجام آزمایش‌ها، نمونه‌گیری از دانه‌های داخل مخزن با فواصل زمانی مشخص انجام می‌شد. به گونه‌ای که در طول هر آزمایش، در ۵ مرحله زمانی نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف مخزن انجام می‌شد. نمونه‌های دانه ذرت از ۶ قسمت مختلف مخزن خشک‌کن (شکل (۱)) به دست می‌آمد. بعد از توزین با ترازوی دیجیتال A&D با دقت ۰/۰۰۱ گرم، نمونه‌ها به صورت جداگانه در داخل آون پرتو قرار داده شد. بعد از ۱۶ ساعت، نمونه‌ها از داخل آون بیرون آورده و با توزین ثانویه، درصد رطوبت آنها به دست می‌آمد. برای کنترل دمای هوای خشک‌کننده در قسمت ورود هوای گرم مخزن، از یک حسگر دمایی<sup>۳</sup> دیجیتال استفاده شد. برای شبیه‌سازی فرایند خشک شدن دانه‌های ذرت در خشک‌کن یادشده، از روش تحلیل ابعادی بهره گرفته شد. با این روش، می‌توان رطوبت دانه‌های ذرت را در شرایط مختلف خشک شدن پیش‌بینی کرد.

2. Direct Current  
3. Thermostat

1. Dent Corn



- |                         |   |
|-------------------------|---|
| A: ورودی ذرات بی‌اثر    | G: خروجی مواد جامد                      |
| B: ورودی دانه‌های ذرت   | H: خروجی هوا                            |
| C: واحد کنترل‌کننده دما | I: موتور و گیربکس محرک نقاله ورودی      |
| D: دمنده                | J: الک لرزاننده                         |
| E: ورودی هوای خشک‌کننده | K: محل‌های نمونه‌برداری از دانه‌های ذرت |
| F: گرم‌کن هوا           |   |

شکل ۱. (الف) شکل واقعی خشک‌کن به‌کار رفته، (ب) شکل نمادین خشک‌کن به‌کار رفته.

## ۱.۲ مدل خشک کردن

بی‌بعد قرار گیرند. مرتبه ماتریس بی‌بعد ۴ (M, L, T, K) است. بنابراین، هفت گروه بدون بعد، قابل تفکیک و بررسی بودند که با ادغام برخی از متغیرهای معرفی شده در رابطه (۲)، متغیرهای مستقل و وابسته مطابق رابطه (۳) بازنویسی شدند:

$$DR = f(\dot{m}_a / \dot{m}_g, \dot{m}_i / \dot{m}_g, T_e / T_t, K_{ave} / K_a, h / H) \quad (3)$$

که در آن  $DR = M / M_0$

با توجه به جدول (۱)، محدوده تغییرات گروه‌های مستقل بدون بعد  $\pi_1$  الی  $\pi_5$  به ترتیب زیر معرفی شدند.

به‌منظور ارائه مدل بی‌بعد، ابتدا باید متغیرهای موثر بر رطوبت محصول در حال خشک شدن معرفی شوند [۱۷-۱۵]. متغیرهای موثر بر محتوای رطوبت محصول ضمن خشک شدن، در رابطه (۲) معرفی شده‌اند:

$$f(M, M_0, \dot{m}_i, \dot{m}_g, \dot{m}_a, K_a, K_{ave}, H, h, T_e, T_t) = 0 \quad (2)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این رابطه حاوی متغیرهای زیادی است. بنابراین، مدلی پیشنهاد شد که همه متغیرها در گروه‌هایی

جدول ۱. سطوح مختلف گروه‌های بی‌بُعد مستقل.

$\pi_5 = h/H$	$\pi_4 = K_{ave}/K_a$	$\pi_3 = T_e/T_i$	$\pi_2 = \dot{m}_i/\dot{m}_g$	$\pi_1 = \dot{m}_a/\dot{m}_g$
۰/۱۶۷	۰/۳۴۵۴	۰/۲۵	۱	۰/۳۵۸
۰/۳۳۳	۰/۳۵۲	۰/۵	۲	۰/۵۳۷
۰/۵	۰/۳۷۸	۰/۷۵	۳	۰/۷۱۶
۰/۶۶۷		۱		۱/۰۷۴
۰/۸۳۳				۱/۰۷۴
				۱/۰۷۴
				۱/۶۱۱
				۲/۱۴۸
				۳/۲۲۳

برای رسیدن به یافتن معادله نهایی، مدل زیر پیشنهاد شد:

$$DR = A[F_1(\dot{m}_a/\dot{m}_g), F_2(\dot{m}_i/\dot{m}_g), F_3(T_e/T_i), F_4(K_{ave}/K_a), F_5(h/H)]^B \quad (۹)$$

به منظور ارائه رابطه‌ای خطی، از طرفین معادله (۹) لگاریتم گرفتیم و به رابطه (۱۰) رسیدیم [۱۲]:

$$\text{Log}(DR) = \text{Log}A + \text{Log}[F_1(\dot{m}_a/\dot{m}_g), F_2(\dot{m}_i/\dot{m}_g), F_3(T_e/T_i), F_4(K_{ave}/K_a), F_5(h/H)]^B \quad (۱۰)$$

در این رابطه  $\text{Log}A$ ، عرض از مبدا و  $B$  شیب معادله نهایی است. رابطه (۱۰) به شکل ساده‌تری بازنویسی شد:

$$\text{Log}(DR) = \text{Log}A + B[\Phi_1\Phi + \Phi_2\Phi + \Phi_3\Phi + \Phi_4\Phi + \Phi_5] \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$\Phi_n = \text{Log}(F_n), (n=1,2,3,4,5) \quad (۱۲)$$

برای یافتن رابطه خطی معادله (۱۱)، ابتدا رابطه هر کدام از جمله‌های  $\pi$  مستقل با جمله‌های  $\pi$  وابسته به صورت جداگانه به دست آورده شد. به این منظور لگاریتم داده‌های موجود (مستقل و وابسته) در نظر گرفته شد. سپس با در نظر گرفتن مقادیر مندرج در جدول (۱)، تغییرات جمله‌های  $\pi$  مستقل نسبت به جمله‌های  $\pi$  وابسته به طور جداگانه (توابع  $\Phi_1$  تا  $\Phi_5$ ) ترسیم شد (شکل‌های (۲) تا (۶)). با ترسیم بهترین خط عبوری از داده‌های به دست آمده از میانگین سه تکرار هر آزمایش، معادله خطی‌سازی بین جمله  $\pi$  وابسته مورد نظر و جمله  $\pi$  مستقل ( $DR$ ) به دست آمد. در شکل (۲)، معادله بهترین خط برای اولین متغیر مستقل نسبت به متغیر وابسته به صورت زیر ارائه شد:

$$\text{Log}(D.R) = -0.068 \Phi_1 - 0.067 \Phi_2, \quad R^2 = 0.986 \quad (۱۳)$$

که در آن:

$$\Phi_1 = \text{Log}(\dot{m}_a/\dot{m}_g)$$

$$3/223 \geq \pi_1 \geq 0/358 \quad (۴)$$

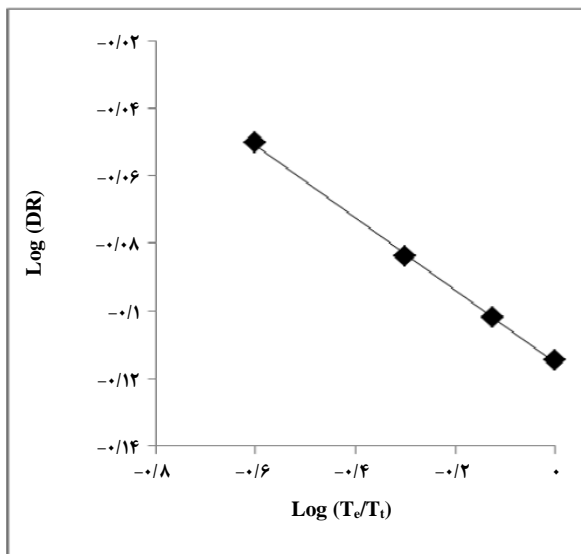
$$3 \geq \pi_2 \geq 1 \quad (۵)$$

$$1 \geq \pi_3 \geq 0/25 \quad (۶)$$

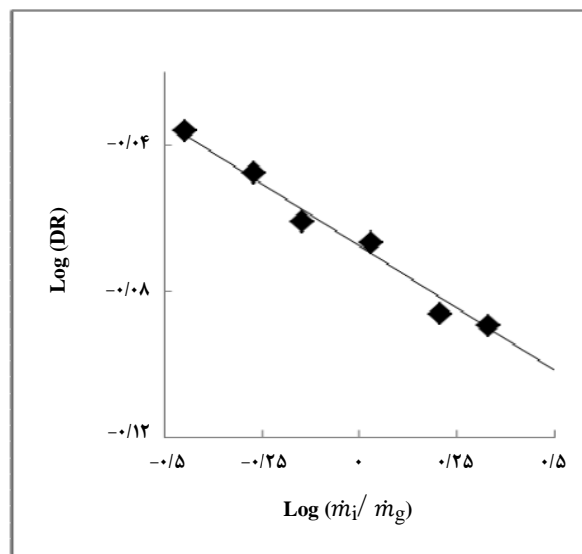
$$0/378 \geq \pi_4 \geq 0/345 \quad (۷)$$

$$0/833 \geq \pi_5 \geq 0/167 \quad (۸)$$

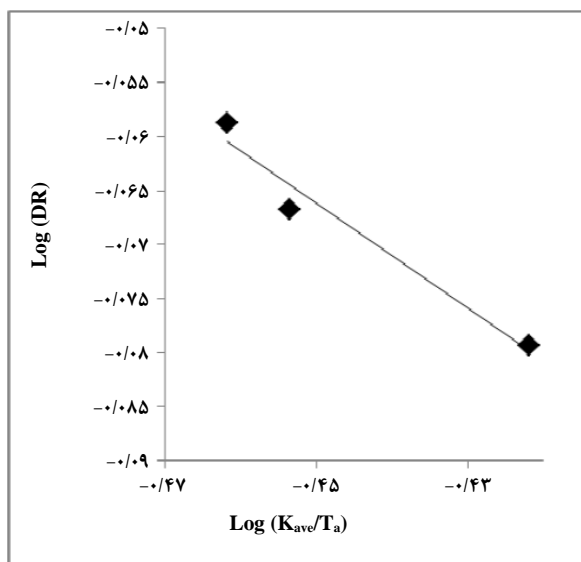
برای به دست آوردن  $\pi_1$  میانگین سطوح مختلف آهنگ جریان جرمی هوا (۰/۵۳۷، ۱/۰۷۴ و ۱/۶۱۱ کیلوگرم بر دقیقه) بر سطوح کاربرد آهنگ جریان جرمی دانه (۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر دقیقه) تقسیم شدند و حاصل آن ۹ عدد بی‌بُعد بود. با تنظیم نسبت سرعت دورانی نقاله‌های ماریچ و ورودی دانه و ذرات بی اثر در سه سطح مختلف، میانگین نسبت دبی جرمی ورودی ذرات بی اثر به دبی جرمی دانه‌های ذرت ( $\pi_2$ ) به دست آمد. از تقسیم مدت زمان سپری شده به زمان کل آزمایش، مقادیر  $\pi_3$  حاصل شد که در جدول (۱) نشان داده شده است. باید گفت که هر آزمایش در مدت زمان کل یک ساعت انجام گرفت.  $\pi_4$  از تقسیم دمای متوسط هوای درون مخزن بر میانگین دمای هوای ورودی (در سه حالت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) محاسبه شد. برای به دست آوردن  $\pi_5$  ارتفاع محل‌های نمونه برداری (از سطح زمین) بر ارتفاع کل مخزن تقسیم شد.



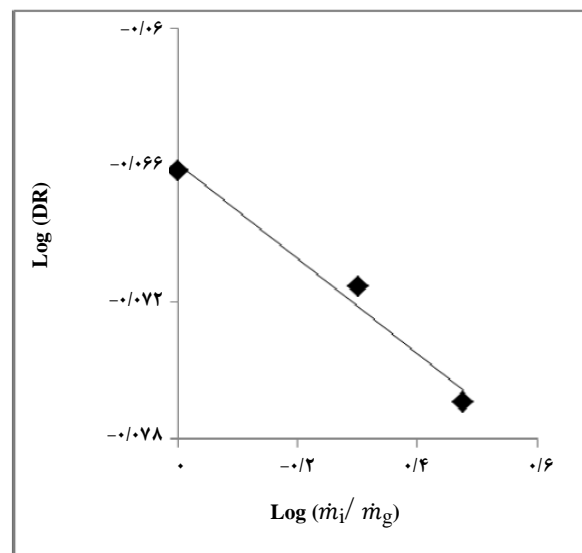
شکل ۴. تغییرات گروه بی‌بعد وابسته نسبت به گروه بی‌بعد  $T_e/T_i$ .



شکل ۲. تغییرات گروه بی‌بعد وابسته نسبت به گروه بی‌بعد  $\dot{m}_i/\dot{m}_g$ .



شکل ۵. تغییرات گروه بی‌بعد وابسته نسبت به گروه بی‌بعد  $K_{ave}/K_a$ .



شکل ۳. تغییرات گروه بی‌بعد وابسته نسبت به گروه بی‌بعد  $\dot{m}_i/\dot{m}_g$ .

توابع حاصل برحسب جمله‌های  $\pi$  مستقل دوم تا پنجم نیز عبارتند از:

$$\text{Log(D.R)} = -0.486 \Phi_4 - 0.285 \Phi_3, \quad R^2 = 0.961 \quad (16)$$

$$\text{Log(D.R)} = -0.0208 \Phi_2 - 0.066 \Phi_1, \quad R^2 = 0.976 \quad (14)$$

$$\text{Log(D.R)} = -0.174 \Phi_5 - 0.018 \Phi_4, \quad R^2 = 0.899 \quad (17)$$

که در آن:  $\Phi_2 = \text{Log}(\dot{m}_i/\dot{m}_g)$

$$\text{Log(D.R)} = -0.107 \Phi_3 - 0.1153 \Phi_2, \quad R^2 = 0.999 \quad (15)$$

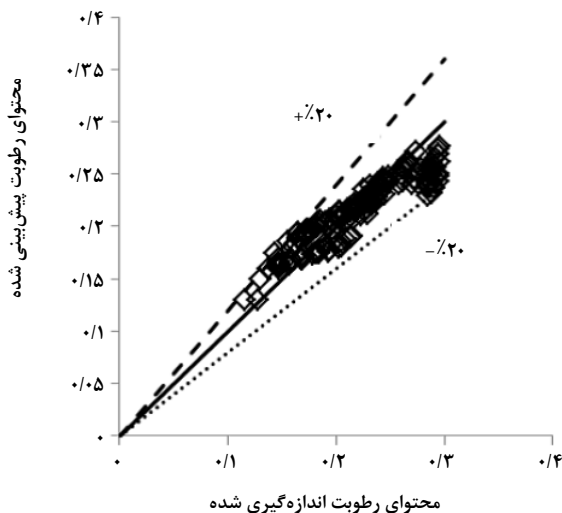
که:  $\Phi_5 = \text{Log}(h/H)$

که از آنجا می‌توان محتوای رطوبت دانه‌ها را با استفاده از رابطه (۲۰) به دست آورد:

$$M = M_0^{1.0} \times \text{Log}(\text{DR}) \quad (20)$$

### ۱.۳ ارزیابی مدل

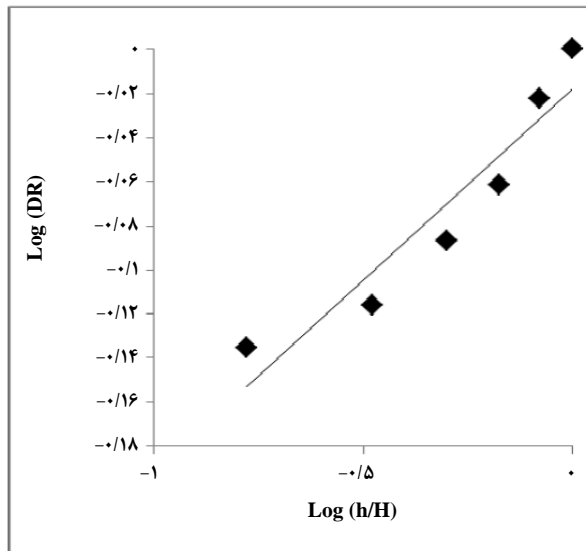
به منظور ارزیابی مدل به دست آمده، از ۲۰ درصد کل داده‌ها که هنگام به دست آوردن مدل به کار نرفته بودند، بهره گرفته شد. باید گفت که این داده‌ها به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. نتایج ناشی از مدل و داده‌های آزمایشگاهی بر روی دو محور شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷. مقایسه نسبت خشک شدن حاصل از مدلسازی و آزمایش.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، همبستگی نسبتاً خوبی بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج حاصل از مدلسازی برقرار است. ضریب تعیین ناشی از این مدلسازی ۰/۸۵ به دست آمد. در تحقیق‌های مشابه [۱۴ و ۱۲] ضرایب تعیین در محدوده ۰/۸۶ گزارش شده است که با مقایسه به عمل آمده، نشان از همبستگی مطلوب بین داده‌های آزمایشگاهی و مدلسازی دارد. همچنین میزان خطا، میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> و انحراف نسبی میانگین<sup>۱</sup>، به ترتیب،

2. Mean Bias Error  
3. Root Mean Square Error



شکل ۶. تغییرات گروه بی‌بُعد وابسته نسبت به گروه بی‌بُعد h/H.

### ۳. نتایج و بحث

به منظور تعیین ضرایب A و B (رابطه (۱۱)) از یک الگوریتم بهینه سازی استفاده شد. معیار مورد استفاده در این الگوریتم، میزان خطای<sup>۱</sup> بین داده‌های حاصل از آزمایش و داده‌های ناشی از مدلسازی می‌باشد. بنابراین ضرایب A و B در رابطه (۱۱) با کمینه کردن خطای مدلسازی (رابطه (۱۸)) تعیین شدند [۱۴].

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{DR_i^{ex} - DR_i^{pre}}{DR_i^{ex}} \right| \quad (18)$$

که  $DR_i^{ex}$  نسبت خشک شدن دانه حاصل از آزمایش،  $DR_i^{pre}$  نسبت خشک شدن دانه ذرت حاصل از مدل بی‌بُعد،  $\beta$  معیار بهینه‌سازی و N تعداد آزمایش‌ها است. به این ترتیب، ثابت‌ها عبارتند از:

$$A = 2.387, \quad B = 1.328$$

از این رو معادله نهایی به شکل زیر به دست آمد:

$$\text{Log}(\text{DR}) = \text{Log}(2.387) + 1.328 \{ [-0.068 \text{Log}(\dot{m}_a/\dot{m}_g) - 0.0674] + [-0.0208 \text{Log}(\dot{m}_i/\dot{m}_g) - 0.0659] + [-0.1072 \text{Log}(\text{Te}/T_i) - 0.1153] + [-0.486 \text{Log}(K_{ave}/K_a) - 0.2849] + [0.1736 \text{Log}(h/H) - 0.018] \} \quad (19)$$

1. Mean Bias Error

Kg/s	$\dot{m}_a$	آهنگ جریان جرمی ورودی هوای خشک کننده
°C	$K_a$	دمای هوای خشک‌کننده ورودی
°C	$K_{ave}$	میانگین دمای هوا در داخل مخزن
M	H	ارتفاع مخزن خشک کن
M	h	عمق محل نمونه‌برداری دانه
S	$T_e$	مدت زمان سپری شده
S	$T_t$	مدت زمان کل آزمایش
-	DR	نسبت خشک شدن

از روابط ۱۸ و ۲۱ و ۲۲ به دست آمدند. دو خط  $+۰.۲۰\%$  و  $-۰.۲۰\%$  محتوای رطوبت نیز ترسیم شد تا نشان داده شود که همه نقاط به دست آمده از مدل در داخل این محدوده قرار دارند [۱۴].

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DR_i^{ex} - DR_i^{pre})^2 \right]^{0.5} \quad (21)$$

$$MRD = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{DR_i^{ex} - DR_i^{pre}}{DR_i^{ex}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (22)$$

با بهره‌گیری از این روابط، میزان خطا، خطای میانگین مربعی و انحراف نسبی میانگین، به ترتیب،  $۰/۰۶۴$ ،  $۰/۰۱۸$  و  $۰/۰۰۹$  به دست آمد که نمایانگر توسعه نسبتاً خوب مدل بی‌بعد است. مقادیر، میزان خطا و خطای میانگین مربعی در تحقیق مشابه [۱۲]، به ترتیب،  $۰/۰۶۸۵$ ،  $۰/۰۱۵$  به دست آمد.

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، یک خشک‌کن پیوسته برای بررسی فرایند خشک‌شدن دانه‌های ذرت با کمک ذرات بی‌اثر به‌کار گرفته شد. برای مدل‌سازی این فرایند، روش ریاضی از تحلیل ابعادی سود جستند. به این منظور، پنج گروه بی‌بعد مستقل و یک گروه بی‌بعد وابسته شناسایی شدند. سرانجام، مدلی بی‌بعد بر اساس نظریه باکینگهام برای خشک‌کردن دانه‌های ذرت به‌دست آورده شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مدل‌سازی، همبستگی بالا و خطای کم بین محتوای رطوبت به دست آمده از آزمایش و محتوای رطوبت حاصل از مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

#### جدول نمادها

پارامتر	نماد	یکا
درصد رطوبت اولیه دانه‌های ذرت	$M_0$	(w.b)/.
درصد رطوبت دانه‌های ذرت	M	(w.b)/.
آهنگ ورودی جریان جرمی دانه‌های ذرت	$\dot{m}_g$	-
آهنگ ورودی جریان جرمی ذرات حامل انرژی	$\dot{m}_i$	-

1. Mean Relative Deviation

#### مراجع

- [1] Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W., Drying and storage of grains and oilseeds. The AVI publishing company, Inc, (1992).
- [2] Lacerda, A. F., Lisboa, M. H., Barrozo, M. A. S., "Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer". Applied Thermal Engineering 25, 2641-2652, (2005).
- [3] Lacerda, A. F., Lisboa, M. H., Oliveira, M. S., Barrozo, M. A. S., "Two-phase modeling and the quality of soybean seeds dried in a countercurrent moving bed drier". Journal of Food Process Engineering 27, 432-448, (2004).
- [4] Hong, L., Yangdong, H., Pei, Z., Lianying, W., Yonggang, L., "Simulation of co-current multi-effect drying system". Advanced Materials Research 236-238, 808-813, (2011).
- [5] Hong, L., Lianying, W. U., Xianli, W. U., Yangdong, H. U., "Simulation of Countercurrent Multi-Effect Drying System". Advanced Materials Research 2, 206-211, (2012).
- [6] Pfeifer, A. A., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S. "Modeling of soybean seed drying in concurrent sliding bed dryers: Effect of the number of stages on the seed quality and drying performance". Biosystems Engineering 107(4), 341-348, (2010).
- [7] Khatchatourian, O. A., Vielmo, H. A., Bortolaia, L. A., "Modeling and simulation of cross flow grain dryers". Biosystems Engineering 116(4), 335-345, (2013).
- [8] Lira, T. S., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S., Assis, A. J., "Effect of radial air profiles on a countercurrent moving bed drying". Food and Bioproducts Processing. 85 (C3), 241-246, 2007.
- [9] Fellow, P., Food Processing Technology. Ellis Horwood, England, (1988).
- [10] Hatamipour, M. S., Mowla, D., "Drying behavior of maize and green peas immersed in fluidized bed of inert energy carrier particles". Food and Bioproducts Processing 84(C3), 220-226, (2006).



- [۱۱] مرادی، مهدی؛ زمردیان، علی، "امکان سنجی ارتقاء فرایند خشک کردن دانه‌های ذرت با کمک ذرات بی‌اثر"، مجله پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۲(۳)، ۹-۱۸، (۱۳۹۲).
- [12] Zare, D., Jayas, D. S., Singh, C. B., "A generalized dimensionless model for deep bed drying of Paddy", *Drying Technology*, 30, 44-51, (2012).
- [13] Pavon, G. M., Hernandez, J. A., Salgado, M. A., Garcia, M. A., "Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying". *Journal of Food Engineering* 51, 347-353, (2002).
- [14] Eric, O., Karine, L. Celine, M., Guillaume, D., Annie, M., "Critical agitation for microcarrier suspension in orbital shaken bioreactors: experimental study and dimensional analysis", *Chemical Engineering Science*, in Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.08.063>, (2014).
- [15] Streeter, V. L. Wylie, E. B. *Fluid Mechanics*; McGraw-Hill: New York, (1983).
- [۱۶] کارپورفرد، سید حسین، "تعیین عمق بهینه شیارهای داخلی طولی در لوله‌های افقی انتقال نیوماتیکی مواد پیوسته و متراکم"، مجله مهندسی شیمی ایران، ۳(۹)، ۷-۱۵، (۱۳۸۳).
- [17] Szirtes, T.; Rozsa, P. *Applied Dimensional Analysis and Modeling*, 2<sup>nd</sup> Ed; Elsevier: Burlington, MA, (2007).