

# بررسی آزمایشگاهی خشک کردن ذرت در خشک کن دوار با نرم افزار طراحی آزمایش

راحله متو<sup>۱</sup>، سارا ناناکناری<sup>۲</sup>، کامیار موقرنژاد<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

پیام نگار: [k-movaghar@nit.ac.ir](mailto:k-movaghar@nit.ac.ir)

## چکیده

خشک کردن جامدات از قدیمی ترین و رایج ترین نوع عملیات واحد است که در صنایع مختلف کاربرد دارد. در این مطالعه دستگاه و ماده مورد نظر، خشک کن دوار و ذرت شیرین بوده و با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ اثر دمای هوای ورودی و سرعت چرخش استوانه بر پارامترهای نهایی همچون زمان خشک شدن و دمای نهایی محصول بررسی شد. میزان رطوبت اولیه و نهایی دانه های ذرت در این پژوهش به ترتیب ۷۳٪ و ۱۵٪ بر پایه تر است. نتایج نشان داد که زمان خشک شدن، با افزایش دمای فرایند، کاهش ولی با افزایش سرعت چرخش، افزایش می یابد. همچنین شرایط عملیاتی دمای (°C) ۶۵/۶ و سرعت چرخش (rpm) ۶/۵ برای رسیدن به رطوبت نهایی ۱۵ درصد، بهترین شرایط برای خشک کردن دانه های ذرت در خشک کن دوار است.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۱۴

شماره صفحات: ۴۱ تا ۴۹

**کلیدواژه ها:** خشک کردن،

خشک کن دوار، دانه های ذرت،

دمای هوا، سرعت چرخش.

## ۱. مقدمه

ذرت در دنیا پس از گندم و برنج پرمحصول ترین غله است [۱] که منشأ آن قاره آمریکا است و ایران هم یکی از تولیدکنندگان مهم آن است. ذرت یا بلال به زبان عربی است و نام علمی آن زیمایس<sup>۱</sup> و نام فارسی این میوه در گویش خراسانی، جواری است. از ویژگی های دارویی و مثبت این میوه می توان به درمان آگزما و بیماری های پوستی، کاهش کلسترول خون، جلوگیری از کرم خوردگی دندان و خشک کنندگی زخم اشاره کرد و از ضررهای این میوه میزان بالای

رطوبت و چربی آن است که از مشکلات اصلی برای خشک کردن است و سبب فاسد شدن ذرت نیز می شود مگر آن که رطوبت آن را به زیر میانگین ۱۵٪ برسانیم [۲]. اگر بخواهیم خوراکی با حجم زیاد را به روش پیوسته خشک کنیم، خشک کن دوار از بهترین گزینه ها است.

مطالعات مختلفی درباره استفاده از خشک کن دوار در فرایند خشک کردن انجام شده است که از آن ها می توان به بررسی فیروزی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد که به فرایند خشک کردن برنج با استفاده از خشک کن دوار پرداختند. فرایند خشک کردن برنج یک فرایند با انرژی مصرفی بالاست که آن ها توانستند با طراحی این

\* بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، دانشکده مهندسی شیمی، گروه ترموسینتیک و کاتالیست

1. Zeamays

نظر گرفته شد. در آزمایش‌های آن‌ها، رطوبت اولیه ذرت  $24/5 \pm 0/5$ ٪ و رطوبت نهایی  $14/2$ ٪ بوده است. پارامترهای خشک کردن لایه نازک به طور آزمایشگاهی بررسی شد و مدل‌های ریاضی مناسبی وابسته به دما و شدت تابش به دست آمد. با مقایسه و بررسی مدل‌های به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی، مدل لایه نازک پیچ بهترین مدل برای توصیف رفتار ذرت در خشک‌کن انتخاب شد [۹]. خانعلی و همکاران در ۲۰۱۷ خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن بستر سیال را بررسی کرده و یک مدل دیفرانسیلی برای آن ارائه دادند. آزمایش‌های آن‌ها در سه جریان جامد ورودی (۲۴۵ و ۴۲۰ و ۵۶۵ (g/min))، شش دمای هوای ورودی (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ (°C)) و دو ارتفاع سرریز (۰/۲۵ و ۰/۵ (m)) انجام شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، با افزایش دمای گاز ورودی و ارتفاع سرریز، مقدار رطوبت جامد کاهش و با افزایش دبی ماده ورودی، مقدار رطوبت جامد، افزایش یافت [۱۰]. شریفیان و همکاران در سال ۱۳۹۴ فرایند خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن بستر ثابت به صورت لایه نازک را بررسی کردند و همچنین تأثیر تغییرات دو عامل دمای خشک‌کن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ (°C) و سرعت جریان هوای گرم در چهار سطح ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ (m/s) را روی پارامترهای زمان خشک کردن، ضریب نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعال سازی و میزان مصرف انرژی ارزیابی کردند. آن‌ها چنین نتیجه گرفتند که با افزایش دما، زمان خشک شدن، کاهش و با افزایش سرعت، افزایش می‌یابد. همچنین میزان مصرف انرژی با افزایش دما، کاهش و با افزایش سرعت هوای ورودی، افزایش می‌یابد [۱۱].

هدف این پژوهش بررسی اثر دمای فرایند و سرعت چرخش استوانه بر پارامترها و ویژگی‌های خشک کردن ذرت است. آزمایش‌ها در بازه دمایی ۴۰ تا ۷۰ (°C) و بازه سرعت چرخش ۵ تا ۱۵ (rpm) انجام شد. دبی خوراک برای همه این شرایط، ثابت و برابر  $0/00138$  (g/s) تا رسیدن رطوبت دانه‌های ذرت از ۷۳ به ۱۵ درصد بر پایه تر در نظر گرفته شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد

ذرت انواع متفاوتی دارد که در این پژوهش ذرت شیرین با رطوبت بالا بررسی شد. بلال استفاده شده در فصل برداشت از بازار شهرستان بابل تهیه شد. سپس دانه‌های آن جدا و به آزمایشگاه

خشک‌کن دوار جدید، مصرف انرژی را کاهش داده و هم‌زمان، بازده برنج سالم را افزایش دهند [۳]. راسلت و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در خشک‌کن دوار پرداختند. آن‌ها تأثیر پارامترهای ورودی خشک‌کن دوار را روی عملکرد و مصرف انرژی خشک‌کن بررسی کردند. نتایج نشان داد که داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با داده‌های به دست آمده از این مدل داشته است [۴]. حامد عباس‌فرد و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در ایران روی کود نیترات آمونیوم در خشک‌کن دوار بحث کردند. آن‌ها با مدل‌سازی ریاضی که بر اساس داده‌های صنعتی بررسی شد، هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آوردند و نتیجه گرفتند که جدای از شیب و سرعت خشک‌کن، رطوبت و دمای هوای ورودی، بیشترین تأثیر را روی رطوبت خروجی محصول می‌گذارد [۵]. فان گنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ زمان ماندن ذرات تنباکو در خشک‌کن دوار را مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر سرعت چرخش، شیب استوانه، سرعت جریان گاز، دبی مواد ورودی و رطوبت مواد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمان ماندن با افزایش سرعت چرخش، سرعت جریان گاز و شیب استوانه، کاهش و با افزایش دبی مواد ورودی و رطوبت، افزایش می‌یابد [۶]. تقی‌زاد در ۱۳۹۲ (ش) مدل‌سازی خشک کردن کنگد در خشک‌کن دوار و اثر تغییر برخی پارامترهای ورودی مانند دبی هوا، دبی خوراک و دمای هوا را روی دما و رطوبت محصول بررسی کرد. نتایج نشان داد که مقدار متوسط تفاوت نتیجه‌های مدل ارائه شده و نتیجه‌های تجربی برای رطوبت ماده و هوا، حدود ۵/۳۸٪ و برای دمای خوراک و هوا حدود ۴/۶۵٪ است [۷]. فرناندز و همکارانش در سال ۲۰۰۸ اشاره کردند که با بررسی خشک شدن کود در خشک‌کن دوار به پیش‌بینی زمان ماند و متغیرهای خشک شدن و مقایسه آن با داده‌های تجربی پرداختند. نتایج نشان داد که با وجود انحراف ۲۰٪ می‌توان برای طراحی و شبیه‌سازی از این داده‌ها استفاده کرد؛ برای نمونه، اختلاف میان داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌های معادلات برای رطوبت جامد مرطوب ۷/۷٪، دمای جامد ۱۲/۸٪ و دمای هوا ۴/۶٪ بود [۸]. خشک کردن ذرت با خشک‌کن‌های مختلف طی سال‌های متفاوت بررسی شده است که می‌توان به رحمانیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد که خشک کردن ذرت در خشک‌کن فروسرخ با هوای داغ را بررسی کردند. دمای هوای ورودی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ (°C) و شدت تابش فروسرخ ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ ( $w/m^2$ ) در

(۸)، اریفیس (۹)، مانومتر (۱۰) و گرم‌کن (۱۱) است. دماهای خشک و مرطوب گاز ورودی و خروجی و دمای خوراک از صفحه نمایش دستگاه خوانده می‌شود. این خشک‌کن به صورت همسو کار می‌کند و از هوای گرم برای خشک کردن دانه‌ها استفاده می‌شود.

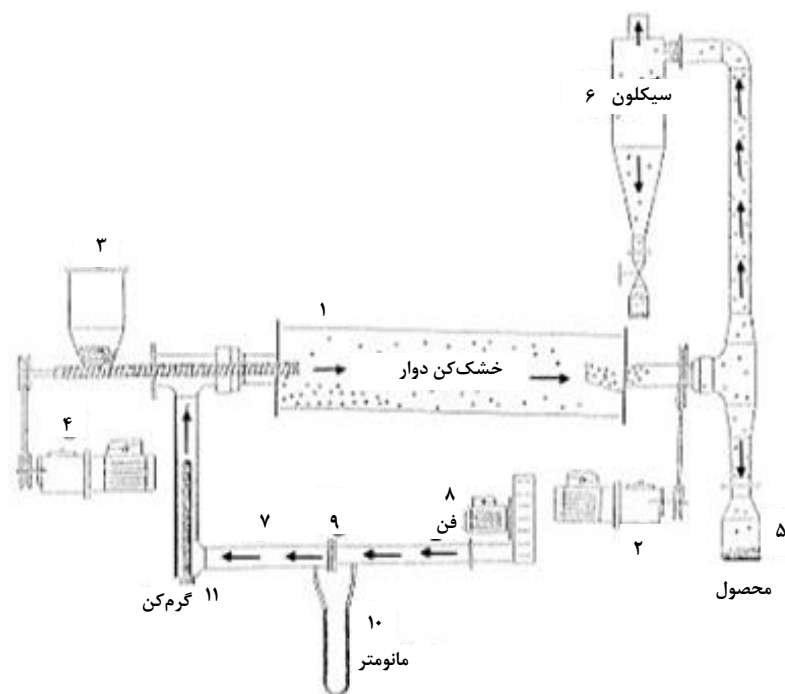
نوشیروانی بابل انتقال داده شد. دانه‌های ذرت پیش از شروع آزمایش‌ها، پاک شده و اجسام خارجی از آن‌ها جدا شد. رطوبت اولیه دانه‌های ذرت تهیه شده، ۷۳٪ بر پایه تر اندازه‌گیری شد. در این پژوهش دانه‌های ذرت در همه آزمایش‌ها تا رسیدن به رطوبت نهایی ثابت ۱۵٪ بر پایه تر تحت فرایند خشک شدن قرار گرفت.

### ۲-۳ وسایل اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری وزن ماده از ترازوی دیجیتال آزمایشگاه با دقت اندازه‌گیری (g) ۰/۰۱ و قابلیت اندازه‌گیری ۰ تا ۶۰۰۰ (g) و برای اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌ها از ترازوی رطوبت‌سنج با دقت اندازه‌گیری (g) ۰/۰۱ و قابلیت اندازه‌گیری ۰ تا ۵۱ (g) استفاده شده است. وسایل اندازه‌گیری و دقت و مدل آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

### ۲-۲ دستگاه

شمایی از دستگاه استفاده‌شده در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است این دستگاه، شامل یک استوانه با شیب کم (۱)، موتور الکتریکی (۲) برای حرکت دورانی استوانه، مخزن ورودی خوراک (۳)، خوراک‌دهنده الکتریکی (۴) با سرعت قابل تنظیم، مخزن گردآوری محصول (۵)، مخزن جمع‌آوری ضایعات (۶)، کانال اصلی ورودی هوا (۷)، دستگاه فن



شکل ۱. شماتیک خشک‌کن دوار.

جدول ۱. وسایل اندازه‌گیری.

متغیرها	وسایل اندازه‌گیری	دقت	محدوده عملیاتی	مدل
رطوبت ذرت	رطوبت‌سنج	۰/۰۱ گرم	۰ تا ۵۱ گرم و تا ۱۰۰٪	MX-50
جرم ذرت	ترازو	۰/۱ گرم	۰ تا ۶۰۰۰ گرم	EK-6100i

## ۲-۴ طراحی آزمایش

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $y$  پاسخ پیش‌بینی شده،  $a_0$ ،  $a_i$ ،  $a_{ii}$ ،  $a_{ij}$  ثابت‌های موجود در چندجمله‌ای و  $X_i$  متغیرهای مستقل است [۱۷-۱۴]. متغیرهای مستقل انتخاب شده برای طراحی آزمایش در این پژوهش، دمای هوای ورودی ( $T_{ai}$ ) بر حسب درجه سلسیوس ( $^{\circ}C$ ) و سرعت چرخش استوانه ( $V$ ) بر حسب دور در دقیقه (rpm) است. دبی جرمی ورودی خوراک ( $G_{a,in}$ )، ثابت و برابر  $0.138 \text{ Kg/s}$  و دمای خوراک ورودی،  $30.1^{\circ}C$  در نظر گرفته شده است. پس از تعیین متغیرها و بازه آن‌ها، برای بررسی اثر دو پارامتر انتخاب شده بر مقدار پاسخ‌های فرایند، ۱۳ آزمایش به وسیله نرم‌افزار طراحی شد. آزمایش‌های طراحی شده و مقدار پاسخ‌های فرایند (پاسخ‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده) در جدول (۲) ارائه شده است.

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر پاسخ‌های فرایند، نیازمند صرف هزینه و وقت زیادی است. طراحی آزمایش برنامه‌ای است که می‌توان با کمک آن، این بررسی‌ها را به صورت هدفمند و بدون اتلاف وقت انجام داد و به نوعی می‌تواند عملیات مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند را نیز انجام دهد [۱۲]. نرم‌افزار به کاررفته در این طراحی، نرم‌افزار طراحی آزمایش نسخه ۷<sup>۱</sup> است؛ کاربرد این نرم‌افزار بدین صورت است که یک چندجمله‌ای را پیدا و داده‌های آزمایشگاهی را با آن برازش کرده و در نهایت، شرایط بهینه را مشخص می‌کند [۱۳]. در پژوهش پیش رو میان روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ که از رایج‌ترین روش‌هاست و میان روش‌های سطح پاسخ، روش سنترال کامپوزیت<sup>۲</sup> به دلیل داشتن تعداد کم آزمایش‌ها و همچنین خطای کم، انتخاب شد. همچنین به دلیل انعطاف‌پذیری بالاتر، از چندجمله‌ای درجه دو استفاده شد که شکل ساختاری آن مطابق با رابطه (۱) است.

جدول ۲. جدول کامل طراحی آزمایش همراه دو پاسخ.

شماره آزمایش	دمای هوای ورودی ( $^{\circ}C$ )	سرعت چرخش (rpm)	زمان آزمایشگاهی خشک شدن نمونه‌ها (hr)	زمان پیش‌بینی شده خشک شدن نمونه‌ها (hr)	دمای آزمایشگاهی محصول ( $^{\circ}C$ )	دمای پیش‌بینی شده محصول ( $^{\circ}C$ )
۱	۵۵	۱۰	۷/۱۳	۷/۱۳	۵۱/۵۰	۵۱/۵۰
۲	۵۵	۱۰	۷/۱۴	۷/۱۳	۵۱/۵۰	۵۱/۵۰
۳	۴۰	۱۰	۱۲/۳۰	۱۲/۳۸	۴۳/۴۸	۴۲/۵
۴	۵۵	۱۰	۷/۱۵	۷/۱۳	۵۱/۵۰	۵۱/۵۰
۵	۷۰	۱۰	۵	۴/۶۲	۶۳/۷۴	۶۴
۶	۴۴/۴	۱۳/۵	۱۲/۱۵	۱۲/۱۶	۴۶/۷۲	۴۷/۵
۷	۵۵	۱۵	۹/۱۰	۸/۸۹	۵۵/۰۰	۵۴/۷
۸	۵۵	۱۰	۷/۱۰	۷/۱۳	۵۱/۵۰	۵۱/۵
۹	۵۵	۵	۶/۳۵	۶/۲۶	۵۱/۴۲	۵۱
۱۰	۶۵/۶	۶/۵	۴/۵۵	۴/۸۲	۵۸/۵۳	۵۸/۵
۱۱	۵۵	۱۰	۷/۱۵	۷/۱۳	۵۱/۵۰	۵۱/۵
۱۲	۶۵/۶	۱۳/۵	۵/۴۰	۵/۷۵	۶۲/۵۷	۶۲/۵
۱۳	۴۴/۴	۶/۵	۹/۴۵	۹/۴۰	۴۵/۷۵	۴۶/۶

### ۳. نتایج و بحث

شاخص p value نیز در جدول (۳) نشان دهنده میزان معناداری متغیرها است. بر اساس نرم افزار طراحی آزمایش  $p \text{ value} < 0.0001$  گویای متغیرهای بسیار معنادار،  $0.05 < p \text{ value} < 0.0001$  گویای متغیرهای معنادار و  $p \text{ value} > 0.05$  گویای معنادار نبودن متغیرها است. با توجه به مقدار p value های ارائه شده در جدول، معنادار یا بسیار معنادار بودن متغیرهای مستقل و مدل درجه دو در نظر گرفته شده را می توان نتیجه گرفت.

در نهایت برای محاسبه دمای محصول خروجی (که با دمای هوای خروجی یکی است) و زمان خشک شدن دانه های ذرت، مدل درجه دو کاهش یافته ای به وسیله رابطه (۱) در جدول (۴) ارائه شده است که  $R^2$  ارائه شده در همان جدول نشان دهنده تطابق خوبی میان داده های آزمایشگاهی و تخمین زده شده به وسیله مدل است.

مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده زمان خشک شدن و دمای محصول خروجی در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل، تطابق خوبی دارند. نتایج به دست آمده مربوط به زمان خشک شدن و دمای محصول (هوا) خروجی به عنوان پاسخ در جدول (۳) نشان داده شده است. شاخص F value نشان دهنده میزان تأثیر متغیر مورد نظر بر پاسخ فرایند است که هر چه مقدار آن بیشتر باشد گویای تأثیر بیشتر آن متغیر بر پاسخ خواهد بود [۱۷ و ۱۸]؛ در نتیجه بر اساس مقادیر F گزارش شده در جدول (۳)، دمای هوای ورودی نسبت به سرعت چرخش استوانه، تأثیر بیشتری بر هر دو پاسخ (زمان خشک شدن و دمای محصول خروجی) داشته است.

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس.

دمای هوای خروجی (°C)		زمان خشک شدن (hr)		درجه آزادی	متغیرها
P value	F value	P value	F value		
<0.0001	۱۱۰۴/۶۵	<0.0001	۱۰۱۵/۷۱	۱	A: T <sub>ai</sub> (°C)
0.0006	۳۴/۵۴	<0.0001	۱۱۶/۴۱	۱	B: V (rpm)
0.0385	۶/۴۷	0.0068	۱۴/۴۰	۱	AB
0.0026	۲۰/۸۹	0.0002	۵۴/۶۱	۱	A <sup>2</sup>
0.0076	۱۳/۷۳	0.0485	۵/۶۹	۱	B <sup>2</sup>
<0.0001	۲۳۵/۲۷	<0.0001	۲۴۰/۴۶	۱	مدل

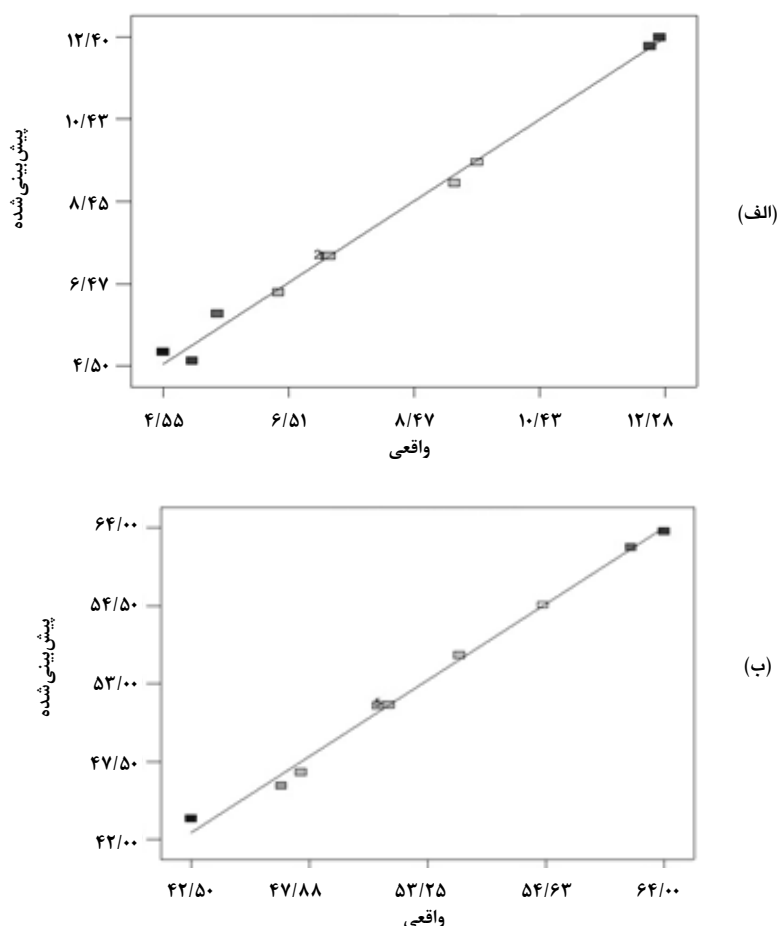
جدول ۴. روابط مدل کاهش یافته درجه دو به دست آمده.

ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	رابطه	پاسخ
0.9942	$t(\text{hr}) = +32.09264 - 0.80345 (T_{ai}) + 0.58854 (V) - 0.012333 (T_{ai})(V) + 6.07111E-003 T_{ai}^2 + 0.017640 (V^2)$	زمان خشک شدن
0.9941	$T_0 (\text{°C}) = +57.39124 - 0.56409 (T_{ai}) - 2.14843 (V) + 0.020667 (T_{ai})(V) + 9.38889E-003 (T_{ai}^2) + 0.068500 (V^2)$	دمای محصول خروجی

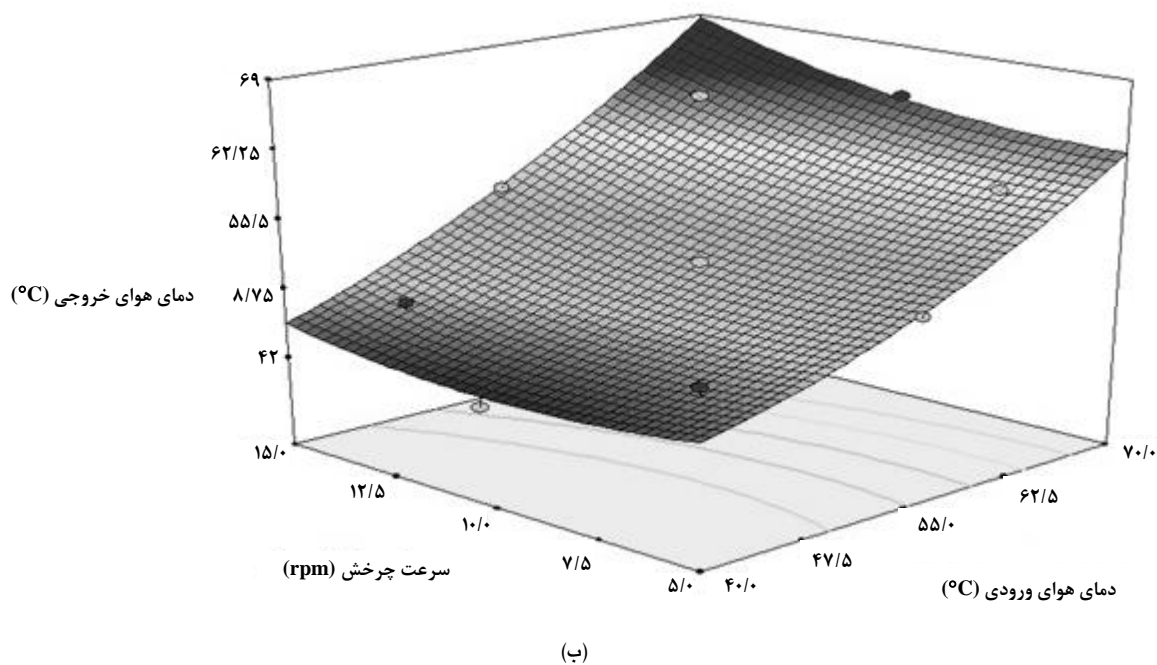
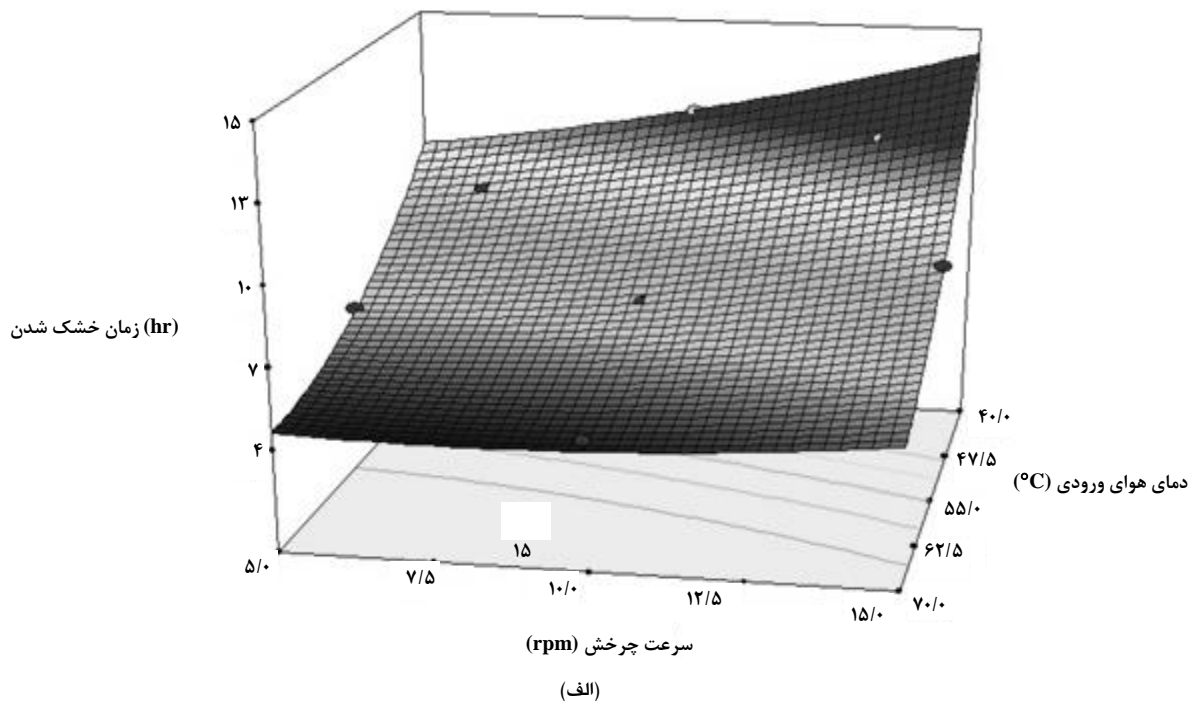
درمای هوا در خشک کن باعث کاهش رطوبت نسبی آن می شود، در نتیجه سرعت انتقال جرم (رطوبت) از دانه ذرت به محیط، افزایش و زمان خشک شدن، کاهش پیدا می کند [۷]. همچنین می توان دریافت که در دمای ثابت، با افزایش سرعت چرخش استوانه، زمان خشک شدن دانه ها افزایش می یابد. این تأثیرات در دماهای پایین تر بسیار بالا بوده و در دماهای بالا، افزایش سرعت چرخش، تأثیر زیادی بر زمان خشک شدن دانه ها ندارد. شکل (۳) - (ب) تأثیر دمای هوای ورودی و سرعت چرخش بر دمای محصول خروجی را نشان می دهد. با توجه به نمودار می توان گفت با افزایش ۷۵ درصدی دمای هوای ورودی، دمای محصول خروجی ۵۰٪ افزایش می یابد. همچنین می توان دریافت که تغییرات سرعت چرخش استوانه در دماهای پایین، تأثیر چندانی بر دمای محصول خروجی ندارد اما در دمای بالا، با افزایش سرعت چرخش استوانه، دمای هوای خروجی افزایش می یابد.

در شکل (۲) محور عمودی، مقادیر پیش بینی شده پاسخ ها به وسیله مدل ارائه شده در رابطه (۱) در نقاط طراحی آزمایش و محور افقی، مقادیر واقعی آن ها را نشان می دهد. در شکل مورد نظر، توانایی مدل در پیش بینی پاسخ گویا است؛ که این را می توان از نزدیک بودن داده ها به خط ۴۵ درجه نتیجه گرفت.

شکل (۳) تأثیر متغیرهای انتخاب شده بر پاسخ های فرایند خشک شدن دانه های ذرت را نشان می دهد. نقطه وسط نشان داده شده در شکل را نقطه ی مرکزی می نامند. نقطه ی مرکزی دمای هوای ورودی و سرعت چرخش به ترتیب  $55^{\circ}\text{C}$  و  $10\text{rpm}$  است. شکل (۳) - (الف) تأثیر دمای هوای ورودی و سرعت چرخش استوانه بر زمان خشک شدن را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش ۷۵ درصدی دمای هوای ورودی در سرعت چرخش ثابت، زمان خشک شدن نمونه ها ۶۰٪ کاهش می یابد. نتایج بالا به این دلیل حاصل می شود که افزایش



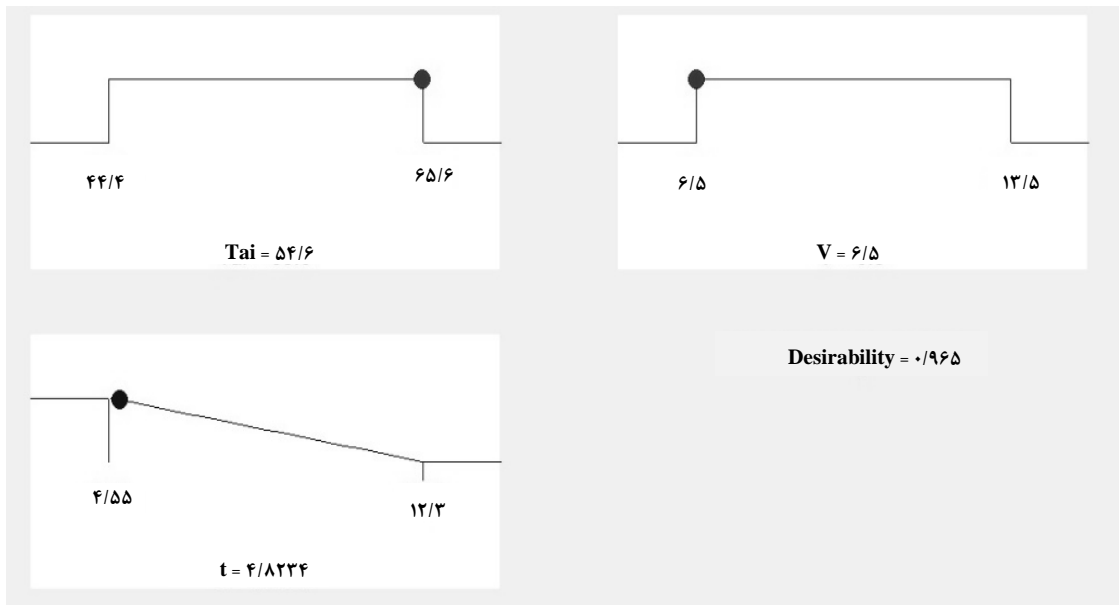
شکل ۲. مقادیر پیش بینی شده؛ (الف) زمان خشک شدن، (ب) دمای محصول خروجی بر حسب مقادیر واقعی آن ها.



شکل ۳. نمودار سه بعدی تأثیر دمای هوای ورودی و سرعت چرخش بر (الف) زمان خشک شدن (ب) دمای محصول خروجی

کمترین زمان خشک شدن در دمای (°C) ۶۵/۶ و در سرعت چرخش (rpm) ۶/۵ به دست می آید.

پس از بررسی نحوه تأثیر متغیرها بر فرایند خشک شدن ذرت در خشک کن دوار، برای رسیدن به کمترین زمان خشک شدن، فرایند بهینه سازی شد. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می کنید



شکل ۴. مقادیر بهینه متغیرهای فرایند برای رسیدن به کمینه زمان خشک شدن.

#### ۴. نتیجه گیری کلی

در این پژوهش فرایند خشک شدن ذرت در خشک کن دوار به وسیله نرم افزار طراحی آزمایش بررسی شد. نتایج نشان داد که سرعت از دست دادن رطوبت دانه‌ها در شروع فرایند زیاد است ولی با گذشت زمان، کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که در ابتدای فرایند چون اختلاف دمای خوراک و هوای داغ زیاد است انتقال حرارت بیشترین میزان را دارد و با گذشت زمان، نرخ انتقال حرارت کاهش یافته به گونه‌ای که دمای محصول در زمان‌های پایانی تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین در محدوده شرایط آزمایش شده، دمای هوای ورودی بیشترین اثر را روی زمان خشک شدن و دمای محصول (دمای هوای خروجی) دارد و سرعت چرخش استوانه به نسبت، تأثیر کمتری دارد. با افزایش دمای هوای خشک کن از ۴۰ به ۷۰ (°C)، زمان خشک شدن دانه‌های ذرت ۶۰٪ کاهش و با افزایش سرعت چرخش استوانه، زمان خشک شدن افزایش یافت که این تغییرات در دمای پایین تر بیشتر بوده است. همچنین کمترین زمان خشک شدن برای دانه‌های ذرت در خشک کن استوانه‌ای دوار در دمای ۶۵/۶ (°C) و سرعت ۶/۵ (rpm) است.

#### ۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی بابل به وسیله اعتبار پژوهشی شماره BNUT/370675/98 اعلام می‌کنند.

#### مراجع

- [۱] حسینی، ح.، شیخ داودی، م. ج.، قربانی بیگرانی، م. "ارزیابی فنی روش‌های صنعتی خشک کردن ذرت در استان خوزستان"، اولین همایش ملی راهبردهای دستیابی به کشاورزی پایدار، اهواز، ص ۱۲-۱، (۱۳۹۰).
- [۲] چیدری، ا. ح.، امیرنژاد، ح. "مدیریت پروژه ساخت یک واحد ذرت خشک کنی با به کارگیری روش‌های پرت وسی-پی‌ام"، اقتصاد کشاورزی و توسعه، دوره هشتم، شماره ۲۹، ص ۲۵۷-۲۷۳، (۱۳۷۹).
- [3] Firouzi, S., Alizadeh, M. R., Haghtalab, D., "Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer." *Energy*, 119, 629-636, (2017).
- [4] Rousselet, Y., Vijay, K. D., "Numerical modeling of a co-current cascading rotary dryer." *Food and bioproducts processing*, 99, 166-178, (2016).



- [5] Abbasfard, H., Rafsanjani, H. H., Ghader. S., Ghanbari, M., "Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: a case study of ammonium nitrate plant." Powder technology, 239, 499-505, (2013).
- [6] Geng, F., Li, Y., Yuan, L., Liu, M., Wang, X., Yuan, Z., "Experimental study on the space time of flexible filamentous particles in a rotary dryer." Experimental Thermal and Fluid Science, 44, 708-715, (2013).
- [7] تقی‌زاد، الف، "بررسی نظری و تجربی عملکرد خشک‌کن دوار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، (۱۳۹۲).
- [8] Fernandes, N. J., Ataíde, C. H., Barrozo. M. A. S., "Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer." Brazilian Journal of Chemical Engineering, 26, 331-341, (2009).
- [9] Rahmanian-Koushkaki, H., Nourmohamadi-Moghadami, A., Zare, D., Karimi, G., "Experimental and theoretical investigation of hot air-infrared thin layer drying of corn in a fixed and vibratory bed dryer." Engineering in agriculture, environment and food, 10, 191-197, (2017).
- [10] Khanali, M., Khakpour Giglou, A., Rafiee, Sh., "Model development for shelled corn drying in a plug flow fluidized bed dryer." Engineering in agriculture, environment and food, 11, 1-8, (2018).
- [۱۱] شریفیان، ف.، کاوه، م.، "مطالعه سینتیک خشک کردن ذرت به روش جریان هوای گرم"، علوم مکانیک در ماشین‌های کشاورزی، جلد ۲، شماره ۲، ص ۸۸-۹۲، (۱۳۹۳).
- [12] Garcia-Diaz, A., Phillips, D. T., "Principles of experimental design and analysis", 1<sup>th</sup> ed., Springer Netherland, 978-0-412-60570-3, (1994).
- [13] Anderson, M. J., Whitcomb, P. J., "RSM Simplified: Optimizing processes using response surface methods for design of experiments". 2<sup>th</sup> ed., productivity press INC, portland, oregon, (2006).
- [14] Anderson, M. J., Whitcomb, P. J., "DOE Simplified: practical tools for effective experimentation", 3<sup>th</sup> ed., productivity press INC, portland, oregon, (2000).
- [15] Gholami, R. M., Mousavi, S. M., Borghei. S. M., "Process optimization and modeling of heavy metals extraction from a molybdenum rich spent catalyst by *Aspergillus niger* using response surface methodology." Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 18, 218-224, (2012).
- [16] Amani, T., Nosrati, M., Mousavi, S. M., "Study of syntrophic anaerobic digestion of volatile fatty acids using enriched cultures at mesophilic conditions." International Journal of Environmental Science & Technology, 8, 83-96, (2011).
- [17] Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments", 9<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons INC, New York, (2002).
- [18] Jafari, A., Tynjala, T., Mousavi, S. M., Sarkomaa, P., "CFD simulation and evaluation of controllable parameters effect on thermomagnetic convection in ferrofluids using Taguchi technique." Computers & Fluids, 37, 1344-1353, (2008).