



شبیه سازی خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی به روش دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه سازی آن با

## استفاده از روش Taguchi

طیب نازقلیچی<sup>۱</sup>، محمد حسین کیانمهر<sup>۲</sup>، سیدرضا حسن بیگی<sup>۳</sup>، مسعود عسکری<sup>۱</sup>

۱ و ۲- به ترتیب کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

### چکیده

در این تحقیق، خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی هویج با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شبیه سازی و با استفاده از روش Taguchi بهینه سازی شد. شبیه سازی بر پایه آرایه‌های متعامد Taguchi و L<sub>9</sub> برنامه ریزی شده و آزمایش‌ها در دمای هوای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، عمق بستر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر و هویج‌های مکعب شده به ابعاد ۴، ۷ و ۱۰ میلی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که اندازه مکعب‌ها و عمق بستر به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را در نسبت مصرف انرژی داشته‌اند. دمای هوای ۷۰°C، اندازه مکعب‌های ۴ میلی‌متر و عمق بستر ۹۰ میلی‌متر به عنوان شرایط بهینه آزمایش به دست آمد. نهایتاً، یک آزمایش برای بررسی اعتبار روش آماری مورد استفاده، انجام شد و درستی روش تایید گردید.

**واژه‌های کلیدی:** دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، خشک‌کن بستر سیال، بهینه سازی به روش Taguchi

### مقدمه

در اکثر فرایندهای صنعتی دست کم یک مرحله خشک کردن وجود دارد. روش‌های خشک کردن زیادی برای مواد وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های مخصوص به خود را دارد (Hatamipour & Mowla, ۲۰۰۲). با در نظر گرفتن راندمان‌های حرارتی فرایندهای خشک شدن، خشک‌کن‌های بستر سیال به دلیل نرخ بالای انتقال حرارت و جرم و نیز سرعت خشک کردن زیاد به طور وسیعی در خشک کردن مواد غذایی خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. خشک‌کن‌های بستر سیال در شیمی، متالورژی و صنایع دارویی کاربردهای فراوانی دارند (Bialobrzewski و همکاران، ۲۰۰۸).

محدود بودن منابع انرژی خصوصاً گاز طبیعی و نفت در سال‌های اخیر آشکار شده است (Smith, ۲۰۰۷). در کاربردهای عملی، خشک کردن فرآیندی است که به خاطر گرمای نهان تبخیر آب و بازده انرژی نسبتاً پایین خشک-کنهای صنعتی، به انرژی ورودی بالایی نیاز دارد (Taguchi & Yokoyama, ۱۹۹۳). مصرف انرژی در خشک‌کن

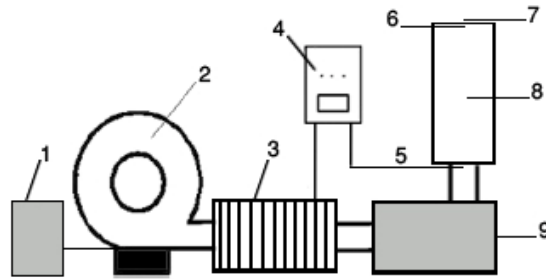
ها از مقدار پایین زیر ۰.۵٪ برای فرآیندهای صنعتی شیمی، تا ۳۵٪ برای عملیات کاغذسازی متغیر است. هزینه اصلی برای خشک‌کن‌ها در عملکرد آنهاست تا در هزینه اولیه سرمایه گذاری. بنابراین ایده‌های جدید در روش‌های خشک کردن و طراحی خشک‌کن نیازمند بهینه سازی مصرف انرژی و شرایط عملکرد است (Oztop و همکاران، ۲۰۰۷).

روش Taguchi همراه با آنالیز واریانس (ANOVA)، از روش‌های آماری هستند که نخستین بار توسط Genichi Taguchi برای بهبود کیفیت اجناس کارخانه‌ای، توسعه یافت. تعیین مطلوب‌ترین طراحی شرایط خشک‌شدن برای محصولات، بهترین ترکیب پارامترها برای فرآیند و بهینه سازی فرآیند طبیعتاً مفید خواهد بود. علاوه بر این با استفاده از آرایه‌های متعامد، آزمایش می‌تواند با کمترین تکرار انجام شود (Topic، ۱۹۹۵). نحوه توزیع مقادیر دما درون خشک‌کن بستر سیال بسیار با اهمیت بوده و برای محاسبه راندمان‌های انرژی و اکسرژی مورد نیاز می‌باشد. پیچیدگی مسائل دینامیک سیالات، حل دقیق معادلات مورد نظر در سیال را مشکل یا غیر ممکن می‌سازد (Mujumdar، ۲۰۰۶). CFD یک روش پیشرفته است که برای به دست آوردن چرخه‌های کوتاه‌تر فرآیند محصول، بهینه سازی انرژی مورد نیاز و بهینه سازی فرآیندهای موجود مفید می‌باشد (Jafari و همکاران، ۲۰۰۸).

مدل‌های CFD به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده و سرعت محاسبات نیز به طور زیادی بالا رفته است (Mujumdar، ۲۰۰۶). به تازگی مطالعاتی روی بهینه سازی فرآیندهای غذایی صورت گرفته است (Alamprese، ۲۰۰۷؛ Corzo، ۲۰۰۸؛ Erbay، ۲۰۰۸؛ Hodali، ۲۰۰۱؛ Simpson، ۲۰۰۸؛ Srinivasa، ۲۰۰۷؛ Syahrul، ۲۰۰۲؛ Uysal، ۲۰۰۸). اما کارهای اندکی روی شبیه سازی به روش CFD و بهینه سازی پارامترهای خشک‌کن بستر سیال به روش Taguchi صورت گرفته است. به علاوه تاثیر اندازه مواد و عمق بستر روی مصرف انرژی خشک‌کن بستر سیال برای اکثر مواد مرطوب مانند میوه‌ها و سبزی‌ها مطالعه نشده است. بنابراین، در این تحقیق خشک‌کن بستر سیال با کمک روش CFD شبیه سازی شد و بهینه سازی پارامترهای موثر با استفاده از روش Taguchi انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های خشک‌شدن، در آزمایشگاه بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران انجام شد. شکل ۱ طرح کلی دستگاه آزمایشی را نشان می‌دهد. محفظه استوانه‌ای خشک‌کن مهمترین قسمت مورد مطالعه بود که در این تحقیق شبیه سازی شد. به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه محاسبات، برش نیمه طولی محفظه متقارن و استوانه‌ای شکل خشک‌کن به عنوان هندسه محفظه خشک‌کن طراحی شد. برای تولید هندسه و شبکه از نرم افزار Gambit 2.3.16 استفاده شد.



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن بسترسیال: ۱. اینورتر ۲. فن ۳. گرم‌کن‌ها ۴. برد کنترل گرم‌کن‌ها ۵ و ۶. ترموکوپل ۷. بادسنج ۸. محفظه استوانه‌ای سیال سازی خشک‌کن ۹. محفظه

نتایج، مستقل از تعداد مش‌ها بود. برای بررسی مستقل بودن پاسخ از تعداد مش، با اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی در دمای ورودی  $50^{\circ}\text{C}$ ، اندازه مکعب  $10$  میلی‌متر و عمق بستر  $60$  میلی‌متر مقایسه بین تعداد مختلف مش-بندی انجام شد. نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقدار سرعت جریان خروجی در مش‌بندی‌های مختلف

مش‌بندی	۱	۲	۳
تعداد المان‌ها	$3 \times 10^4$	$3 \times 10^5$	$5.3 \times 10^5$
تعداد گره‌ها	$1.2 \times 10^4$	$8.7 \times 10^4$	$1.4 \times 10^5$
(متر بر ثانیه) سرعت خروجی	۲.۳۸	۳.۶۳	۳.۶۴

از آنجائیکه تفاوت بین نتایج عددی در مش‌بندی ۲ و ۳ کمتر از  $0.1\%$  بود، برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان، مش-بندی ۲ برای تمام آزمایش‌ها انتخاب شد. معادلات حاکم بر مساله به قرار زیر می‌باشند. معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

که  $\rho$  و  $\vec{v}$  به ترتیب سرعت و چگالی سیال می‌باشند. بقای اندازه حرکت به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

که  $\rho \vec{g}$ ،  $\bar{\tau}$ ،  $p$  به ترتیب نیروی میدانی گرانش، تانسور تنش و فشار استاتیکی می‌باشد. تانسور تنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

که  $\mu$  گرانروی دینامیکی،  $I$  تانسور واحد و قسمت دوم در سمت راست معادله تاثیر انبساط حجم را نشان می‌دهد. معادله انرژی عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{\theta}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{v}_{eff} \cdot \vec{\theta}) \right] + S_h \quad (4)$$

که  $k_{eff}$  رسانایی موثر می‌باشد ( $k + k_\varepsilon$ )، که در آن  $k_\varepsilon$  رسانایی جریان متلاطم است که طبق مدل آشفتگی استفاده شده تعریف می‌شود).  $J_j$  جریان پخش  $j$  می‌باشد. سه قسمت اول سمت راست معادله ۴ به ترتیب انتقال انرژی ناشی از رسانایی، پخش گونه‌ها و اتلاف لزجت را نشان می‌دهد.  $S_h$  شامل گرمای واکنش شیمیایی و هر منبع گرمایی دیگری است. در این تحقیق هیچ منبع گرمایی وجود نداشت بنابراین  $S_h$  صفر بود. در معادله ۴ داریم:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\theta^2}{2} \quad (5)$$

که آنتالپی  $h$ ، برای گاز ایده‌آل به صورت زیر است:

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (6)$$

در معادله ۶،  $Y_j$  کسر جرمی گونه  $j$  می‌باشد و:

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (7)$$

که  $T_{ref}$ ، ۲۷۳ درجه کلونین می‌باشد. مدل  $k - \varepsilon$  به عنوان مدل آشفتگی انتخاب شد. معادلات انتقال برای  $k$  و  $\varepsilon$  عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

و

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (9)$$

که در آن:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (10)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (12)$$

در معادلات بالا  $G_k$ ، تولید توربولانس (آشفتگی) انرژی جنبشی به سبب گرادیان سرعت میانگین را بیان می‌کند.

$C_{2E}$ ، تولید توربولانس انرژی جنبشی به سبب نیروی شناوری می‌باشد.  $Y_M$  سهم انبساط نوسانی در توربولانس تراکم پذیر را نسبت به نرخ اتلاف کلی نشان می‌دهد.  $C_2 = 1.9$  و  $C_{1E} = 1.44$  ثابت می‌باشند و برای اطمینان از اینکه مدل اجرا شده برای جریان استاندارد مناسب است، مبنا قرار داده می‌شوند.  $C_{2E}$  و  $C_{1E}$  عبارات منبع می‌باشند که در این تحقیق صفر در نظر گرفته شدند. درجه‌ای که  $\varepsilon$  تحت تاثیر نیروی شناوری قرار می‌گیرد بوسیله ثابت  $C_{2E}$  تعیین می‌شود.

$$C_{2E} = \tanh \left| \frac{\vartheta}{u} \right| \quad (13)$$

$\vartheta$ ، مولفه سرعت جریان هوا در جهت موازی با بردار گرانش و  $u$ ، مولفه سرعت جریان در جهت عمود بر بردار گرانش است.

تحلیل ترمودینامیکی برای بهینه سازی و طراحی سیستم‌های حرارتی ابزاری ضروری می‌باشد. مصرف انرژی، با انرژی فراهم شده برای محفظه سیال سازی خشک‌کن مواد مرطوب متناسب می‌باشد. نسبت مصرف انرژی به عنوان کسری از مصرف انرژی نسبت به انرژی مفید داده شده توسط هیتر تعریف می‌شود (Aghbashlo و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین نسبت مصرف انرژی یک عبارت بی‌بعد مناسب بوده و به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی سیستم مورد استفاده قرار گرفت. مصرف انرژی با بکارگیری قانون اول ترمودینامیک محاسبه شد (Tasirin و همکاران، ۲۰۰۷):

$$Eu = \dot{m}_{da}(h_{da1} - h_{da0}) \quad (14)$$

که در آن  $h_{da0}$  و  $h_{da1}$ ، به ترتیب آنتالپی هوای ورودی و خروجی خشک‌کن هستند. دبی جرمی هوا  $\dot{m}_{da}$  از فرمول زیر محاسبه شد (Aghbashlo و همکاران، ۲۰۰۸; Ceylan و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\dot{m}_{da} = \rho_a V_a A_{dc} \quad (15)$$

که  $V_a$ ، سرعت هوا و  $A_{dc}$  مساحت سطح محفظه خشک‌کن است. آنتالپی هوای خشک‌کن را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸):

$$h_{da} = C_{pda}(T - T_{\infty}) + h_{fg}w \quad (16)$$

که  $T$  و  $T_{\infty}$  به ترتیب دمای خشک‌کن و دمای محیط می‌باشند. گرمای ویژه هوای ورودی و خروجی،  $C_{pda}$  توسط (Corzo et al., 2008) محاسبه شد.

$$C_{pda} = 1.004 + 1.88w \quad (17)$$

از معادله پایین می‌توان برای تبدیل رطوبت نسبی به نسبت رطوبت هوا استفاده کرد (Aghbashlo، ۲۰۰۸).

$$w = 0.622 \frac{\varphi P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (18)$$

$\varphi$  رطوبت نسبی هوا،  $P$  فشار اتمسفر و  $P_{vs}$  فشار اشباع می‌باشد. نسبت رطوبت هوای خروجی توسط (Akpınar, 2004) محاسبه شد:

$$w_{dso} = w_{doi} + \frac{DR}{\dot{m}_{da}} \quad (19)$$

$$DR = \frac{W_t - W_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (20)$$

که در آن  $W$ ، وزن هویج است. نسبت مصرف انرژی محفظه خشک‌کن ( $EUR$ ) از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Corzo و همکاران، ۲۰۰۸):

$$EUR = \frac{\dot{m}_{da}(h_{doi} - h_{dso})}{\dot{m}_{da}(h_{doi} - h_g)} \quad (21)$$

که  $h_g$  آنتالپی ویژه محیط می‌باشد.

محاسبات توسط نرم افزار Fluent انجام شد. گسسته‌سازی بالا دست مرتبه دوم (upwind second order) برای پیوستگی معادلات انرژی و اندازه حرکت استفاده شد. کوپلینگ سرعت - فشار از الگوریتم SIMPLE به دست آمد. دمای اولیه در سیستم برابر دمای محیط، ۲۹۸ درجه کلوین تنظیم شد. در شرایط مرزی، دبی جرمی هوا برای ورودی (mass flow inlet) و فشار خروجی (pressure outlet) برای خروجی خشک‌کن به کار گرفته شد. دیواره های اطراف عایق و سرعت نسبی صفر در نظر گرفته شد. پیش‌بینی آشفته‌گی برای سیستم با استفاده از مدل  $k - \epsilon$  به دست آمد.

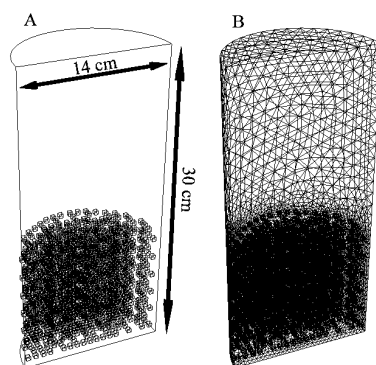
برای طرح Taguchi و تحلیل آن، از نرم افزار Qualitek-4 (Version 4.82.0) استفاده شد. آرایه متعامد L9، بوسیله نرم افزار برای شبیه سازی انتخاب شد. نه آزمایش شبیه سازی با ترکیبات مختلف فاکتورها برای مطالعه انجام شد (جدول ۲). در این تحقیق تاثیر سه پارامتر روی نسبت مصرف انرژی در سه سطح مطالعه شد. آرایه متعامد Taguchi L9 برای شبیه سازی‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- طرح آرایه متعامد Taguchi L9

شماره شبیه سازی	A	B	C	جدول ۲- پارامترهای مختلف انتخاب شده و سطوح آن
۱	۱	۱	۱	سطح ۱ سطح ۲ سطح ۳ فاکتور
۲	۱	۲	۲	عمق بستر (A) ۳cm ۶cm ۹cm
۳	۱	۳	۳	اندازه مکعب (B) ۴mm ۷mm ۱۰mm
۴	۲	۱	۲	دمای هوای ورودی (C) ۵۰°C ۶۰°C ۷۰°C
۵	۲	۲	۳	
۶	۲	۳	۱	
۷	۳	۱	۳	
۸	۳	۲	۱	
۹	۳	۳	۲	

## نتایج و بحث

هندسه مساله و مشبندی مورد استفاده در شبیه سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود مکعب های هویج به طور تصادفی روی کل ارتفاع بستر پخش شده است. در آزمایش های انجام گرفته Taguchi نسبت مصرف انرژی محاسبه شد. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

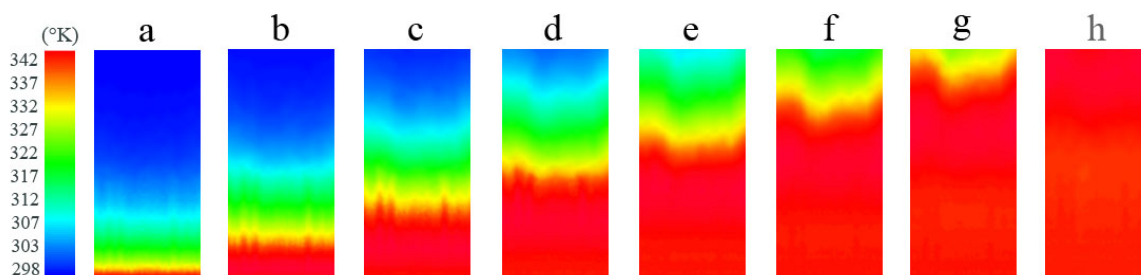


شکل ۲- A) طرح کلی هندسه مورد استفاده، عمق بستر و اندازه مکعب های هویج ۹۰ و ۴ میلی متر، B) مشبندی بوسیله تابع اندازه

جدول ۴- نسبت مصرف انرژی در آزمایش Taguchi

شماره شبیه سازی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۶	۸	۹
نسبت مصرف انرژی	۰/۱۱۳	۰/۰۹۸	۰/۰۷۳	۰/۱۶۴	۰/۱۱۶	۰/۰۴۷	۰/۲۱۴	۰/۱۱۱	۰/۰۶۶

طبق معادلات ۱۴ و ۱۶، دما مهمترین پارامتری است که می تواند در هر نقطه درون محفظه خشک کن برای محاسبه مصرف انرژی در آن نقاط اندازه گیری شود. شکل ۳ کانتورهای دما را در محفظه خشک کن در زمان های مختلف نشان می دهد. دمای هوا در بالای محفظه استوانه ای خشک کن به دلیل انتقال حرارت از هوا به مکعب های هویج، کمتر از دمای هوا در پایین محفظه است. همه شبیه سازی ها تا رسیدن به شرایط پایدار انجام شدند، بنابراین در انتهای فرآیند دمای کل استوانه نزدیک به دمای ورودی هوا بود.



شکل ۳- کانتور دمای کل در عمق بستر ۹ سانتی متر، اندازه مکعب ۴ میلی متر و دمای ورودی  $70^{\circ}\text{C}$  در فواصل زمانی a)  $t=0.1\text{s}$ , b)  $t=0.2\text{s}$ , c)  $t=0.3\text{s}$ , d)  $t=0.4\text{s}$ , e)  $t=0.5\text{s}$ , f)  $t=0.6\text{s}$ , g)  $t=0.7\text{s}$ , h)  $t=0.8\text{s}$

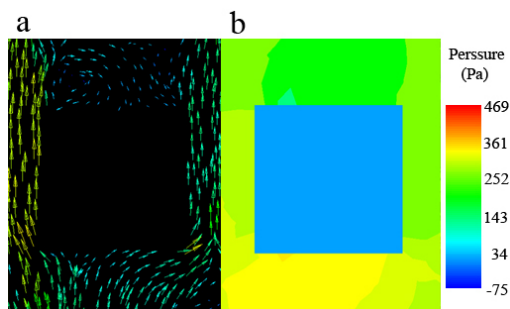
برای بررسی دقیق تر توزیع دما در امتداد استوانه، ارتفاع محفظه خشک کن به چند لایه تقسیم شد، (شکل ۴) و دما در هر لایه تخمین زده شد. شکل ۵ تغییرات دما نسبت به زمان و موقعیت صفحه را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود دمای صفحه اول در کف محفظه خشک کن در فاصله زمانی اول برابر دمای هوای ورودی

است. دمای صفحه‌ها با افزایش ارتفاع صفحه در امتداد محفظه خشک‌کن کاهش یافت و در بالای محفظه خشک‌کن با دمای محیط برابر شد. با گذشت زمان دمای صفحات پایینی با دمای هوای ورودی برابر شد و دمای صفحات بالایی گرم‌تر از دمای محیط شدند تا زمانیکه در انتهای فرآیند کل محفظه به حالت پایدار رسید.



شکل ۴- تقسیم بندی محفظه خشک‌کن توسط iso-surfaces به ۵ صفحه  
 شکل ۵- تغییرات دما نسبت به زمان و موقعیت صفحه در عمق بستر ۹ سانتی‌متر، اندازه مکعب ۴ میلی‌متر و دمای هوای ورودی  $70^{\circ}\text{C}$

در شرایط حداقل سیالسازی، افت فشار بستر معادل وزن مواد تقسیم بر سطح مقطع محفظه، شد. به عبارت دیگر نیروی اصطکاکی بین مواد و هوا، وزن مواد را خنثی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود در اطراف مکعب هویج در بستر سیال، لایه مرزی نزدیک به سطح بالایی مکعب هویج به دلیل ویسکوزیته هوا ضخیم‌تر شده و سپس از صفحه جدا شد. این جدایش لایه مرزی گرداب‌های متلاطمی ایجاد کرد و در آن انرژی تلف شده و یک نیروی کششی رو به بالا (form drag) روی مواد ایجاد شد. کل نیروی عمل‌کننده روی مواد مجموع viscous drag و form drag به دلیل جریان هوا روی سطوح مکعب می‌باشد. شکل (a) ۶، بردارهای سرعت هوا و viscous drag را در اطراف یک هویج مکعبی در یک بستر سیال و گرداب‌های متلاطم را در بالای هویج نشان می‌دهد. شکل (b) ۶، کانتور فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود یک افت فشار در امتداد ارتفاع هویج به دلیل ایجاد گرداب‌ها وجود دارد.



شکل ۶- (a) کانتور فشار کل (b) بردارهای سرعت در اطراف یک هویج در خشک‌کن بستر سیال

نتایج با استفاده از روش Taguchi، برای رتبه بندی فاکتورهای موثر در نسبت مصرف انرژی در خشک‌کن بستر سیال، تحلیل شدند. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، بین فاکتورهای لیست شده در جدول ۲، عمق بستر و



دمای هوای ورودی بیشترین اثر متقابل را داشتند. اندازه مکعب با دمای هوای ورودی و عمق بستر با اندازه مکعب دو جفت دیگر هستند که برهم کنش بین آنها حائز اهمیت بود.

جدول ۵: برهم کنش بین فاکتورها

برهم کنش جفت فاکتورها	A-C	B-C	A-B
شاخص شدت برهم کنش	۳۸/۹۸	۱۹/۰۴	۱۰/۱۱

ارائه جدول ANOVA روشی است که به طور گسترده برای تعیین میزان اثرگذاری پارامترها روی پاسخ و برای تحلیل تغییرات کل نسبت به مولفه های مناسب آن و اندازه گیری اثرات نسبی آنها مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج ANOVA در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- تحلیل ANOVA

فاکتور	درجه آزادی (DOF)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	F-ratio (F)	Pure sum (S')	Percent P (%)
عمق بستر	۲	۰/۰۰۱	.	۲/۴۴۵	۰/۰۰۱	۵/۵۴۲
اندازه مکعب	۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۱۹/۱۳۵	۰/۰۱۴	۶۹/۰۴۸
دمای ورودی	۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۳/۶۷۳	۰/۰۰۲	۱۰/۱۷۹
Other/error	۲	۰/۰۰۳				۱۵/۲۳۱
جمع	۸	۰/۰۲۱				۱۰۰

درجه آزادی (DOF) برای فاکتورها در ستون دوم جدول ANOVA نشان داده شده است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$DOF = n - 1 \quad (22)$$

که  $n$  تعداد کل سطوح برای هر فاکتور را نشان می دهد. مجموع مربعات (S) در ستون سوم جدول ۶ برای هر فاکتور به صورت زیر تعریف می شود:

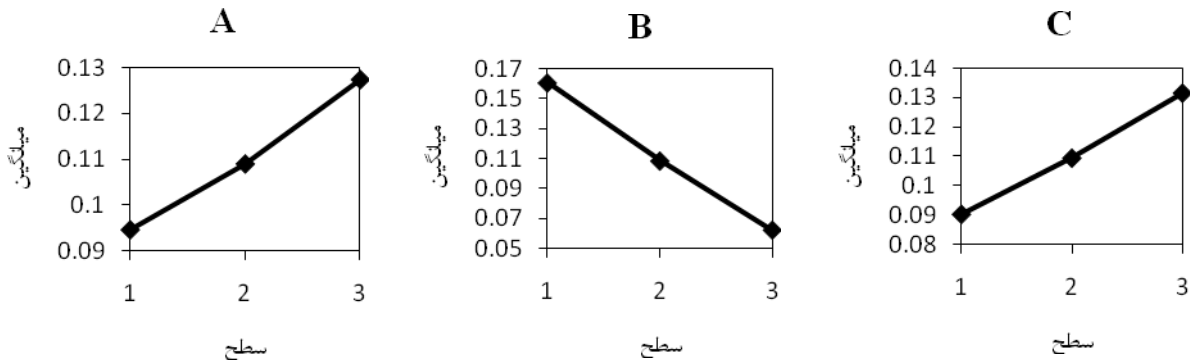
$$S = \sum_{j=1}^{n_i} n_i (m_j - m_{\bar{.}})^2 \quad (23)$$

$m_j$  و  $m_{\bar{.}}$  به ترتیب میانگین استاندارد مصرف انرژی در سطح  $j$  برای هر فاکتور (جدول ۳) و میانگین استاندارد کل (grand average) می باشند. واریانس و درصد نسبت هر فاکتور به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V = \frac{S}{DOF} \quad (24)$$

$$\text{Percent} = \frac{S}{DOF \times \sum_{i=1}^N \frac{S}{DOF}} \times 100 \quad (25)$$

$N$ ، تعداد فاکتورها می باشد. مطالعه ستون درصد نشان می دهد که سهم فاکتور اندازه مکعب بیشترین درصد تاثیر فاکتور است.



شکل ۷- تاثیرات میانگین فاکتورها برای هر سطح، (A) عمق بستر، (B) اندازه مکعب و (C) دمای هوای ورودی

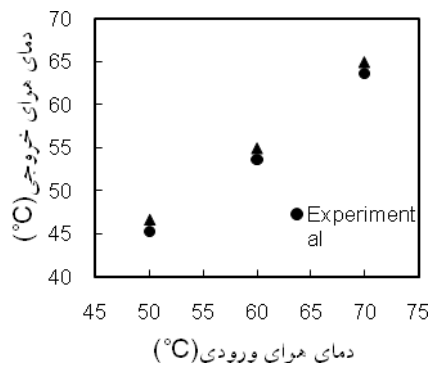
میانگین نسبت مصرف انرژی برای همه فاکتورها در هر سطح در شکل ۷ نشان داده شده است. از مقدار بیشینه تاثیرات میانگین برای هر فاکتور، بهترین سطح را می توان انتخاب کرد. با توجه به شکل ها، سطح ۳ عمق بستر، سطح ۱ اندازه مکعب ها و سطح ۳ دمای هوای ورودی به عنوان شرایط بهینه به دست آمد. سطوحی که ماکزیمم نسبت مصرف انرژی را نتیجه می دهند در جدول ۷ آمده است. بر اساس روش Taguchi، نسبت مصرف انرژی مورد انتظار که برابر مجموع سهم تمام فاکتورها و مقدار میانگین بزرگ (grand average) است، ۰.۲۰۴ می باشد. اختلاف بین مقدار میانگین بزرگ و تاثیر میانگین هر فاکتور، نمایانگر سطح بهینه آن فاکتور می باشد. زمانیکه شرایط بهینه بکار گرفته می شود باید مقدار مورد انتظار به دست آید.

جدول ۷- تخمین شرایط بهینه (نسبت مصرف انرژی بیشینه)

فاکتور	سطح	سهم
عمق بستر	۳	۰/۰۱۹
اندازه مکعب	۱	۰/۰۵۲
دمای خشک کردن	۳	۰/۰۲۳
سهم کل فاکتورها		۰/۰۹۴
میانگین بزرگ درست عملکرد		۰/۱۱
نتایج مورد انتظار در شرایط بهینه		۰/۲۰۴

تایید نتایج بدست آمده مرحله نهایی و بحرانی است که برای بازبینی نتایج توسط Taguchi بسیار مهم است. در مرحله تایید آزمایش، یک شبیه سازی اضافی با استفاده از شرایط بهینه انجام شد و نتایج بدست آمده با نتایج مورد انتظار در شرایط بهینه مقایسه شد (جدول ۷). فاصله اطمینان نسبت مصرف انرژی برای این شبیه سازی  $\pm 0.033$  بود و در سطح اطمینان ۹۵٪ مقدار بهینه پیش بینی شده قرار داشت و در نتیجه روش Taguchi مورد استفاده معتبر بود. برای تایید نتایج شبیه سازی، دمای هوای خروجی در سه آزمایش با نتایج عددی مقایسه شد. این آزمایش ها برای

مکعب‌های هویج ۷ میلی‌متر، عمق بستر ۶۰ میلی‌متر و دماهای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C انجام شد که با نتایج عددی در شرایط یکسان مقایسه شده و مقادیر آن در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸- مقایسه داده‌های تجربی و شبیه سازی شده در عمق بستر ۶ سانتی‌متر، اندازه مکعب ۷ میلی‌متر و دماهای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C.

#### منابع و مأخذ

1. Aghbashlo, M., M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini. 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Drying Technology*. 26: 1501–1508.
2. Akpınar, E. K. 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in convective type dryer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 31(8): 1165–1176.
۳. Alamprese, C., Datei, L., Semeraro, Q. (2007). Optimization of processing parameters of a ball mill refiner for chocolate. *Journal of Food Engineering*. 83, 629–636.
۴. Białobrzewski, I., Zielin'ska, M., Mujumdar, A. S., Markowski, M. (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51, 4704–4716.
۵. Ceylan, I., M. Aktas, and H. Dogan. 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering*. 27: 216–222.
۶. Corzo, O., Bracho, N., Va'squez, A., Pereira, A. (2008). Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. *Journal of Food Engineering*. 85, 372–380.
۷. Corzo, O., N. Bracho, A. Vasquez, and A. Pereira. 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering*. 86: 151–161.
۸. Erbay, Z., Icier, F. (2008). Optimization of Hot Air Drying of Olive Leaves Using Response Surface. *Journal of Food Engineering*.
۹. Hatamipour, M. S., Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*. 55, 247–252.
1۰. Hodali, R. & Bougard, J. (2001). Integration of desiccant unit in crops solar drying installation: optimization by numerical simulation. *Energy conversion and management*. 42, 1543-1558.
1۱. Jafari, A., Zamankhan, P., Mousavi, S.M., Pietarinen, K. (2008b). Modeling and CFD simulation of flow behavior and dispersivity through randomly packed bed reactors. *Chemical Engineering Journal*. 144, 476–482.
1۲. Mujumdar, A.S. (2006). *Hand Book of Industrial Drying*. 3<sup>rd</sup> Ed. Marcel Dekker: New York.
- ۱۳ Oztop, M. H., Sahin, S., Sumnu, G. (2007). Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering*. 79, 83–91.

١٤. Simpson, R., S. Almonacid, D. López, A. Abakarov. (2008). Optimum design and operating conditions of multiple effect evaporators: tomato Paste. *Journal of Food Engineering*. Accepted manuscript.
١٥. Smith, P. G. (2007). *Applications of fluidization to food processing*. Blackwell science, University of Lincoln, UK.
١٦. Srinivasa Rao, P., Bal, B., Goswami, T.K. (2007). Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. *Journal of Food Engineering*. 78, 480–487.
١٧. Syahrul, S., F. Hamdullahpur, and I. Dincer. (2002). exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*. 2, 87–98.
١٨. Taguchi, G., Yokoyama, Y., Wu, Y. (1993). *Taguchi methods/design of experiments*. Tokyo, Japan: American supplier institute (ASI) Press
١٩. Tasirin, S.M., Kamarudin, S.K., Ghani, J.A., Lee, K.F. (2007). Optimization of drying parameters of bird's eye chilli in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*. 80, 695–700.
٢٠. Topic, R. 1995. Mathematical model for exergy analysis of drying plants. *Drying Technology*. 13(1–2): 437–445.
٢١. Uysal, N., Sumnu, G., Sahin, S. (2008). Optimization of microwave-infrared roasting of hazelnut. *Journal of Food Engineering*.

## **Abstract**

In this study, a laboratorial fluidized bed dryer of carrot cubes was simulated using computational fluid dynamic (CFD) and the system has been optimized using Taguchi technique. The simulations were planned based on L<sub>9</sub> orthogonal array of Taguchi, and they were conducted at inlet air temperatures 50, 60 and 70 °C, bed depths 3, 6 and 9 cm and carrot cube dimensions 4, 7 and 10 mm. Results show that cube size and bed depth have the maximum and minimum contribution on the energy utilization ratio, respectively. According to the results inlet air temperature 70°C, cube size 4mm and bed depth 9cm were obtained as optimum conditions. Finally, a verification test was performed to confirm the validity of the used statistical method.

Keywords: CFD simulation, Fluidized bed dryer, Optimization, Taguchi technique