



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



بهینه‌سازی طراحی خشک‌کن کابینتی انگور به روش CFD

سمیرا خزفروش^{۱*}، داریوش زارع^۲ و علی اصغر زمردیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

ایمیل مکاتبه کننده: khazforoosh89samira@gmail.com

چکیده

از میان انواع خشک‌کن‌ها، خشک‌کن‌های کابینتی برای محصولات باغی بیشتر مورد توجه هستند. مشکل اصلی این خشک‌کن‌ها غیریکنواختی رطوبت در محصول نهایی است. به منظور رفع این عیب و فراهم کردن شرایط خشک‌کردن یکنواخت، طرح‌های مختلفی برای خشک‌کن با تعداد سینی‌های متفاوت (از ۴ تا ۱۰ سینی) طراحی، ساخت و ارزیابی گردید. برای رسیدن به یک توزیع یکنواخت از جریان هوا و دما در هر یک از خشک‌کن‌ها، ۷ هندسه متفاوت نسبت به تعداد سینی‌های خشک‌کن کابینتی به صورت تئوری (با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱) بررسی و انتخاب گردید. به منظور مطالعه میزان تطابق طرح‌ها با واقعیت، خشک‌کن با ۱۰ سینی ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. در ۴۰ نقطه مشخص از خشک‌کن ساخته شده، دما و نرخ عبور جریان هوا اندازه‌گیری شد و با مقادیر به دست آمده از حل تئوری مقایسه گردید. نتایج تجربی نشان داد که داده‌های تجربی و تئوری همبستگی قابل قبولی را داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: انگور، خشک‌کن کابینتی، تحلیل عددی و تجربی.

مقدمه

خشک‌کن‌های کابینتی بصورت متداول برای خشک کردن محصولات باغی استفاده می‌شوند. در این خشک‌کن‌ها، دانه‌های میوه بر روی سینی‌های مشبک چیده می‌شود. مشکل اصلی این خشک‌کن‌ها غیریکنواختی رطوبت در محصول نهایی

^۱ - Computational Fluid Dynamics



است. این عیب موجب شده است که باغداران کمتر به استفاده از خشک‌کن‌ها علاقه مند باشند (Adams and Thompson, 1985; Mirade, 2003).

در خشک‌کن‌های کابینتی متداول، هوای داغ پس از عبور از محفظه آرامش به زیر سینی‌ها دمیده می‌شود. هوای دمیده شده از سینی اول عبور کرده و وارد سینی بالایی می‌شود. هوا وقتی به سینی دوم می‌رسد مقداری از پتانسیل خشک‌کردن خود را در اثر جذب رطوبت از سینی اول از دست می‌دهد. به همین ترتیب وقتی هوا به سینی آخر می‌رسد پتانسیل آن برای خشک‌کردن به دلیل افزایش رطوبت و کاهش سرعت و دمای آن بشدت کاهش می‌یابد. نرخ خشک‌شدن یک رابطه بسیار قوی با دمای هوا و سرعت آن دارد (Mulet et al, 1987; Karathanos and Belessiotis, 1997).

توزیع یکنواخت جریان هوا در داخل خشک‌کن‌ها یکی از پارامترهای مهم می‌باشد، زیرا کیفیت و یکنواختی محصول نهایی را تضمین می‌کند (میراده، ۲۰۰۳). کنترل کردن تمام این پارامترها در عمل بسیار سخت می‌باشد. هر چند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) نمی‌تواند کاملاً جایگزین آزمایش‌های فیزیکی شود اما به طور قابل ملاحظه‌ای زمان لازم برای آزمایش تجربی را کاهش می‌دهد.

این ابزار ارزشمند قادر است الگوی جریان هوا را در زمانی کوتاه بررسی و تحلیل کند. این مهم در روش‌های تجربی و تئوری پیشین ناممکن بود (Anderson, 1995; Yongson, 2007).

کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در صنایع کشاورزی اهمیت روزافزونی یافته است. تطبیق پذیری، دقت و کارآمد بودن این روش باعث افزایش کاربرد آن در مهندسی کشاورزی شده است. امروزه از CFD بصورت گسترده در حل مسائل مربوط به شرایط محیطی در گلخانه‌ها و دام‌داری‌ها استفاده می‌شود و استفاده از آن رو به افزایش است (and Sun 2006). کاربرد های تکنیکی در دو دهه اخیر مشاهده شده است که شامل بهتر شدن الگوریتم های عددی و تکنیک های مدل کردن می باشد (Xia & Sun, 2002).

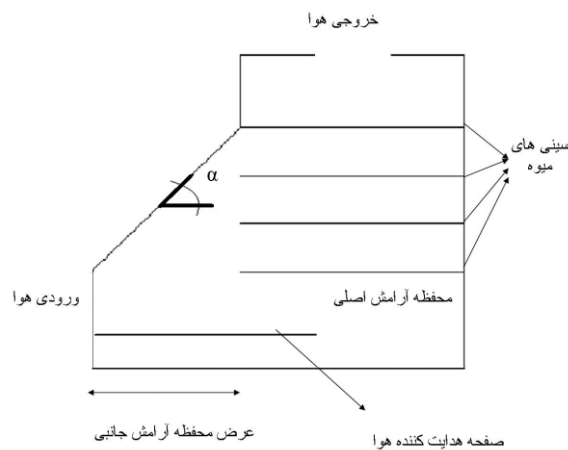
اهداف اصلی این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- ۱) شبیه‌سازی طرح‌های ابتدایی برای خشک‌کن‌ها از ۴ تا ۱۰ سینی با روش CFD و به کمک نرم‌افزار FLUENT،
- ۲) انتخاب بهینه ترین حالت از میان طرح‌های ابتدایی برای هر تعداد سینی بر اساس یکنواختی توزیع سرعت و دما هوا در داخل خشک‌کن‌ها،
- ۳) ساخت خشک‌کن با ۱۰ سینی با الگوی طرح بهینه،
- ۴) اندازه گیری دما و سرعت هوا در چندین نقطه از خشک‌کن ساخته شده در سه دما و سه سرعت مختلف هوا،
- ۵) ارزیابی مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های تجربی آزمایش.



مواد و روش‌ها

در خشک‌کن‌های کابینتی متداول هوای داغ مستقیماً به زیر محفظه آرامش دمیده می‌شود. پتانسیل خشک‌کردن هوای داغ با عبور از سینی‌ها به مرور کاهش می‌یابد. برای رفع مشکل غیریکنواختی توزیع جریان هوا در این خشک‌کن‌ها، یک طرح جدید از خشک‌کن‌های کابینتی معرفی گردید. در این طرح یک محفظه آرامش جانبی با شکل دوزنقه به ساختار قبلی خشک‌کن‌های کابینتی اضافه شد. بدین ترتیب قسمتی از هوای تازه به سینی‌های بالایی می‌رسید. با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری بهترین طرح برای این خشک‌کن‌ها با ۳ سینی انتخاب شد که در شکل ۱ نشان داده شده است (زمردیان و امانلو، ۱۳۸۸).



شکل ۱- هندسه تغییر یافته خشک‌کن، ایده اصلی برای طراحی خشک‌کن‌ها با تعداد سینی بیشتر

با ایده گرفتن از این طرح و ایجاد تغییرات هندسی لازم در ساختمان هر خشک‌کن (شامل اندازه ورودی هوا، زاویه محفظه آرامش جانبی نسبت به افق، عرض محفظه آرامش جانبی و فاصله اولین و آخرین سینی از کف و سقف) با تعداد سینی متفاوت، اثر تغییرات هندسی ساختمان خشک‌کن بر روی یکنواختی توزیع دما و سرعت هوا که دو عامل موثر بر خشک‌شدن است بوسیله روش دینامیک سیالات محاسباتی CFD با استفاده از نرم افزار FLUENT بررسی شد.

معادلات پایه حاکم بر مدل‌های طراحی شده

سه دسته از معادلات پایه وجود دارند که از قوانین پایه بقای جرم و انرژی به دست می‌آیند. بقای جرم، ممتوم و انرژی بر معادلات پیوستگی، ناویر استوک^۲ و انرژی تاثیر می‌گذارند (Norton and Sun, 2006). عدد رینولدز برای هر ۷ طرح در قسمت ورودی محاسبه شد. در تمام حالات این عدد بیشتر از ۲۰۰۰ بود که نشان می‌دهد جریان داخل خشک‌کن‌ها به حالت آشفته

² -Navier-Stokes equation



است (Fluent user guide, 2005). در کدهای CFD تعداد زیادی مدل برای بررسی این نوع جریان وجود دارد که کاربر با توجه به شرایط مسئله یکی از آن‌ها را انتخاب می‌کند (Norton and Sun, 2006). در بین مدل‌های تلاطم، مدل k-ε استاندارد همچنان در استانداردهای صنعتی باقی مانده است و عملکرد موفق آن در پژوهش‌های اخیر گزارش شده است (Foster et al., 2005; Margaris and Ghiaus, 2006). مدل k-ε استاندارد یک مدل نیمه تجربی است که بر پایه معادلات جابجایی برای انرژی جنبشی جریانات آشفته^۳ و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته^۴ پارامترهای ذکر شده از معادلات جابجایی زیر به دست می‌آیند:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_j \right]_j + G + B - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_j = \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_j \right]_j + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 \times (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

که در آن C_1 و C_2 و C_3 ضرایب تجربی بوده و σ_k و σ_ε نیز بترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفتگی می‌باشند.

شبیه سازی سینی‌ها

سینی‌های حاوی میوه یک محیط متخلخل^۵ برای جریان هوا به حساب می‌آیند. فلوئنت محیط متخلخل را منطقه ای از سیال به حساب می‌آورد که می‌توان آن را از پانل سیال انتخاب کرد. همچنین افت فشار جریان در محیط متخلخل باید توسط کاربر تعریف شود. محیط متخلخل از طریق اضافه کردن یک معادله جانبی به معادله اصلی ممتوم بدست می‌آید. این معادله از دو ترم اصلی تشکیل شده است: ۱- افت فشار در اثر لزجت (قانون داریسی)، ۲- افت اینرسی.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i \right) \quad (3)$$

این ترم ممتوم سبب افت فشار در سلول‌های متخلخل می‌شود که با سرعت سیال (یا توان دوم آن) متناسب است. همچنین Fluent 6.3.26 این امکان را فراهم کرده است که معادله را بصورت توانی بیان کرد:

$$S_i = -C_0 |v|^{c_1} = -C |v|^{(c_1-1)} v_i \quad (4)$$

³ - Turbulent kinetic energy

⁴ - Turbulent dissipation rate of turbulent kinetic energy

⁵ - Porous jump



که در آن C_0 و C_1 ضرایب تجربی هستند که به افت فشار بستر محیط متخلخل برمی‌گردد و توسط کاربر تأیید می‌شود (Fluent 6.3.26 user's guide, 2013). در این پژوهش برای محاسبه این ضرایب یک شرایط آزمایشگاهی طراحی و ایجاد شد که در آن افت فشار بستر انگور محاسبه گردید. این شرایط آزمایشگاهی از یک استوانه PVC با سطح صاف به قطر داخلی ۴۰ سانتی‌متر ساخته شده بود. سرعت و دمای هوا قابل تنظیم بود. افت فشار حالت لایه نازک (به عمق ۳ سانتی‌متر) انگور (با رطوبت ۷۶ درصد بر پایه خشک) اندازه‌گیری گردید. تخلخل بستر انگور ۴۴/۶۷٪ محاسبه گردید. مقادیر محاسبه شده برای ضرایب C_0 و C_1 به ترتیب برابر با ۱/۷۲۸ و ۰/۶۷۴ شد.

جزئیات طراحی

برای حل معادلات حاکم، باید شرایط اولیه و مرزی برای مرزهای سیستم تعیین می‌گردید. از آنجا که نرم افزار فلوئنت تنها یک نرم افزار محاسباتی می‌باشد، لازم است از نرم افزارهای پشتیبانی کننده آن برای ایجاد شبکه استفاده کرد. نرم افزار گمبیت بهترین انتخاب برای ساختن فایل های ورودی فلوئنت است. از این نرم افزار برای مدل سازی، تولید شبکه محاسباتی و تعیین شرایط مرزی استفاده می‌شود (سلطانی و همکاران ۱۳۸۳). نسخه گمبیت مورد استفاده در شبه سازی های این تحقیق ۲،۲،۳۰ می‌باشد. شبکه های مورد محاسبه (فایل های با پسوند cas) توسط نرم افزار گمبیت، ابتدا در یک کامپیوتر با CPU ۲/۴ GHz و RAM ۴ GB ساخته شد. سپس فایل های ساخته شده در نرم افزار فلوئنت نسخه ۶،۳،۲۶ مورد مطالعه قرار گرفت.

در این تحقیق برای شبکه بندی محفظه خشک کن بدلیل وجود یک قسمت دوزنقه ای شکل با زاویه تند از شبکه بندی دو بعدی بی‌سازمان استفاده شده است. اما برای شبکه بندی سینی های خشک کن که دارای تصویر مستطیلی شکل است از المان های با سازمان استفاده شده است.

در این پژوهش شرایط مرزی مختلفی به شرح زیر تعیین گردید:

(۱) ورودی: سه سرعت هوا (۱، ۲ و ۳ m/s) و دمای هوا (۳۰، ۴۰ و ۵۰ $^{\circ}C$) انتخاب گردید. جهت جریان هوا عمود

بر ورودی بود.

(۲) خروجی: فلوئنت با توجه به شرایط داخلی خشک کن اطلاعات مورد نیاز برای خروجی را پیش بینی می‌کند.

(۳) محیط متخلخل: پارامترهای تجربی از معادله افت فشار و تخلخل بستر انگور تعیین گردید.

(۴) دیوار: ضریب انتقال حرارت دیوارهای محفظه خشک کن و شرایط محیطی تعیین گردید. هدایت گرمایی، گرمای

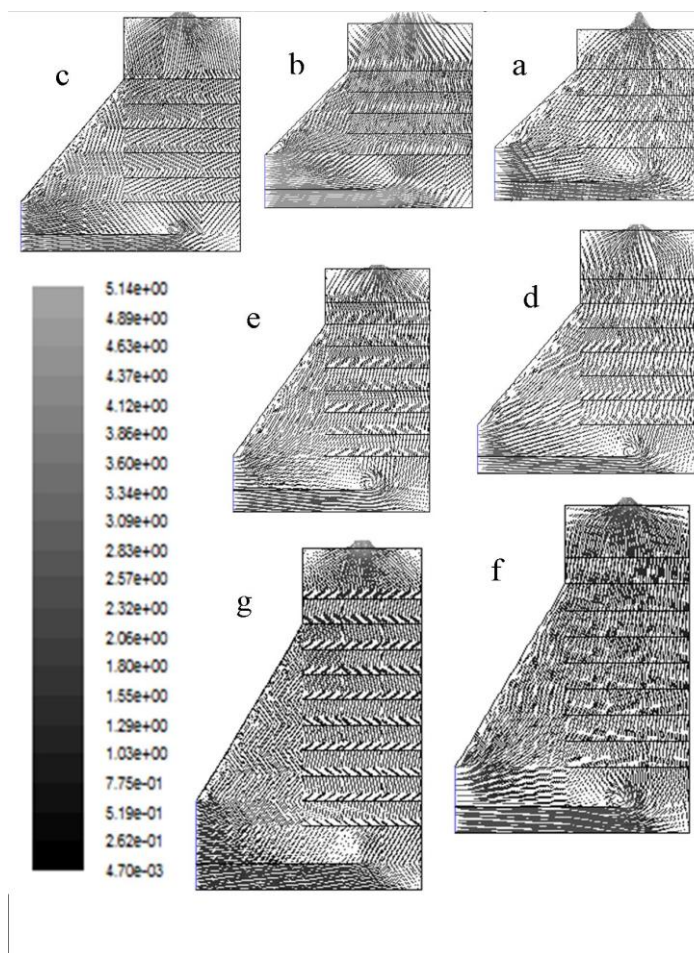
ویژه و چگالی دیوارهای محفظه خشک کن به ترتیب برابر است با: $0.16 (W/mK)$ ، $1225 (J/kgK)$ و

$720 (kg/m^3)$. دمای محیط و رطوبت نسبی به ترتیب برابر است با $1 \pm 14^{\circ}C$ و 3 ± 36 .



ساخت دستگاه

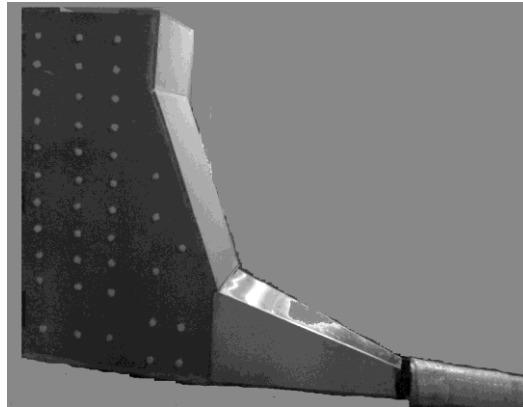
بعد از انتخاب و قطعی شدن هر طرح برای هر خشک‌کن (انتخاب بر اساس یکنواختی توزیع بردارهای سرعت هوا و کانتورهای دمای هوا در محدوده سینی‌ها در هر طرح، شکل ۲)، برای بررسی میزان نزدیکی شبیه‌سازی CFD با واقعیت، طرح خشک‌کن با ۱۰ سینی ساخته شد و تحت شرایط مختلف ارزیابی گردید. از یک فن گریز از مرکز با دور ثابت (۱۴۰۰ rpm و ۵۰ Hz) استفاده شد. برای ایجاد نرخ هوای متغیر در آزمایش‌ها از یک صفحه دایره‌ای در داخل لوله خروجی فن استفاده شد. برای اندازه‌گیری سرعت هوا از یک دستگاه سرعت سنج هوا با سیم داغ استفاده شد. دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن توسط یک ترموستات با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری و کنترل می‌شد. کانال حرارتی از پنج المنت حرارتی یک و نیم کیلوواتی تشکیل شده بود که در بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی موجود بود. برای اتصال لوله ورود هوا به دهانه ورودی خشک‌کن یک تبدیل دایره به مستطیل ساخته شد.



شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی CFD برای پروفایل توزیع سرعت هوا در، سرعت ورودی ۳ m/s



دیواره‌های خشک‌کن از نئوپان با ضخامت ۱۱ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳). انگور رقم ریش‌بابا انتخاب شد و به صورت تصادفی و یکنواخت بر روی سینی‌های توری شکل پخش شد (به ضخامت ۳ سانتی‌متر). هر ۱۰ سینی طوری در محفظه خشک‌کن قرار گرفت که هیچ فاصله‌ای بین آنها و دیواره نباشد.

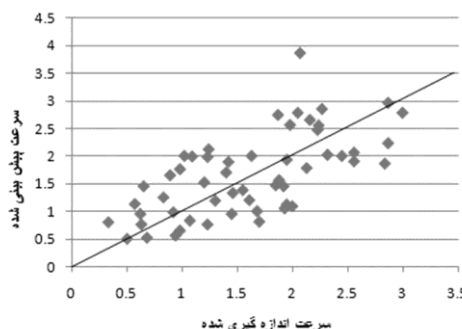
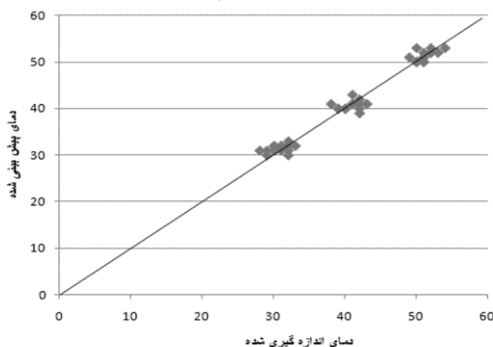


شکل ۳- خشک‌کن ساخته شده با ۱۰ سینی

آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ورودی (۳۰، ۴۰ و ۵۰ °C) و سه سطح سرعت هوای (۱، ۲ و ۳ m/s) انجام شد. هر آزمایش سه بار تکرار شد. برای اندازه‌گیری همزمان دما و سرعت هوا از دستگاه سرعت سنج هوا با سیم داغ استفاده شد به منظور فراهم کردن امکان ورود حسگر این دستگاه به داخل محفظه خشک‌کن، در یکی از وجوه خشک‌کن ۴۰ سوراخ‌های ایجاد شد (شکل ۳). برای پر کردن این فضا و جلوگیری از خروج هوا از داخل خشک‌کن از یک واشر مخروطی شکل استفاده شد. در هر یک از این نقاط، حسگر دستگاه سرعت سنج در عرض دستگاه خشک‌کن حرکت داده می‌شد تا از سه محل با فواصل مساوی داده برداری شود. میانگین هر سه قرائت با سه تکرار به عنوان داده تجربی به دست آمده از هر نقطه در نظر گرفته شد. مقادیر متناظر دما و سرعت هوای ۴۰ نقطه از تحلیل CFD استخراج گردید و با داده‌های تجربی مقایسه شد. از سه معیار آماری ضریب تعیین، RMSE و P% برای بررسی میزان همبستگی داده‌های شبیه‌سازی CFD و داده‌های تجربی استفاده شد.

نتایج و بحث

داده‌های تجربی دما و سرعت هوای به دست آمده از ۴۰ نقطه ایجاد شده در محفظه خشک‌کن با ۱۰ سینی با نتایج استخراج شده از تحلیل CFD مقایسه شد. نتایج تا حد مطلوبی قابل قبول بود (شکل ۴).



شکل ۴- مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده مدل CFD برای دمای خشک‌کن بر حسب $^{\circ}\text{C}$ و برای سرعت هوا بر حسب m/s

نتایج تحلیل آماری همبستگی قابل قبولی بین داده‌های پیش‌بینی شده مدل CFD و تجربی نشان می‌دهد. این نتایج با مشاهده بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE و P% برای دماها و سرعت‌های متفاوت اثبات شد. همچنین استفاده از مدل k-ε استاندارد در تبیین شرایط داخل خشک‌کن کاملاً توانا بوده است. اضافه کردن یک ترم محیط متخلخل به معادله ممنتوم به شبیه‌سازی صحیح محفظه خشک‌کن کمک کرده است. تحلیل داده‌های تجربی در جهت عرضی محفظه خشک‌کن تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان نداده است، در نتیجه مدل دو بعدی CFD برای این پژوهش مناسب بوده است. همچنین اضافه کردن یک هدایت‌کننده جریان در ورودی خشک‌کن سبب بهبود جریان هوا در ناحیه انتهایی سینی‌ها شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصله از مدل سازی خشک‌کن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سینی‌ها و بلندتر شدن ارتفاع خشک‌کن به دلیل میل به بالا رفتن هوای گرم، توزیع یکنواخت بردارهای سرعت در سینی‌های بالایی بهتر رخ می‌دهد (شکل ۲). پس در مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود که با بررسی امکان‌های دیگر توزیع سرعت در سینی‌های پایینی به میزان بیشتری یکنواخت گردد. همچنین اضافه کرده یک صفحه منحرف‌کننده جریان ورودی هوا باعث شد که توزیع بردارهای سرعت در انتهای سینی‌ها بهبود یابد.

منابع و مآخذ

- ۱- ادیب‌زاده، و. ۱۳۸۲. بررسی آلودگی و تهویه زیر گذر زند شیراز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. مجله علوم و پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز.
- ۲- امانلو، ی. ۱۳۸۶. بهینه سازی خشک‌کن کابینتی خورشیدی به منظور خشک کردن یکنواخت انجیر سبز استهبان. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز.
- ۳- دارابی، ح. ۱۳۸۸. طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد خشک‌کن کابینتی جدید لیمو ترش با دو ترکیب هندسی با استفاده از روش CFD. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز.

4. Anderson, D. 1995. Computational Fluid Dynamics. First edition.



5. Adams, R. & Thampson, J. 1985. Improving drying uniformity in concurrent flow tunnel dehydrators. Transaction of ASAE. Vol 28 (3), 890-892.
6. Amanlou, Y. & Zomorodian, A. 2010. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. Journal of Food Engineering. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.06.001.
7. Foster, A. & Madge, M. 2005. The use of CFD to improve the performance of a chilled multi-deck retail display cabinet. International Journal of Refrigeration. Vol 28, 698-705.
8. Norton, T. & Sun, D. 2006. Computational fluid dynamics- an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. Trends in Food Science and Technology. Vol 17, 600-620.
9. Yangson, P. & Narayana, A. 2007. Airflow analysis in an air conditioning room. Building and Environment. Vol 42, 1531-1537.
10. Xia, B. & Sun, W. 2002. Application of computational fluid dynamics in the food industry: a review. Computer and Electronics in Agriculture. Vol 34, 5-24.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Design modification of a grapes cabinet dryer using CFD method

Abstract

Cabinet dryers are the most popular equipments for fruit drying. One of the drawbacks of these dryers is non-uniformity of moisture content during drying process. In order to solve this problem and obtain a uniform distribution of drying air flow and temperature throughout the drying bed seven different geometries having 4 to 10 trays were simulated using computational fluid dynamics (CFD). To validate the simulation model a ten-tray dryer was fabricated and evaluated under different drying conditions. The experimental results showed the proposed cabinet dryer with ten trays has a uniform distribution of air velocity and temperature throughout the dryer chamber. Comparing the experimental and predicted values revealed a suitability of the CFD model in prediction of drying parameters.

Keywords : Grapes, Cabinet dryer, Computational and Experimental analysis.