



شبیه‌سازی عددی گردش هوا در محفظه خشک‌کن خورشیدی تحت همرفت اجباری و بررسی تأثیر هندسه

محفظه خشک‌کن بر بازدهی آن

مهرناز روزبهانی^۱، کورس نکوفر^۲، علی عمران یزدی^۳

۱- کارشناسی ارشد، کارشناس پژوهشگاه هوافضا، ساری، مازندران، ایران

۲- استادیار، عضو هیات علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، مازندران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، مازندران، ایران

nekoufar@iauc.ac.ir

چکیده:

خشک شدن میوه‌ها و سبزیجات و همچنین، برخی مواد غذایی، یکی از فرایندهای متمرکز انرژی در صنعت غذایی و یک روش نوید بخش کاهش ضرر محصول است. افزایش قیمت‌ها و کمبود سوخت‌های محصول نفت و گاز منجر به افزایش تأکید بر استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه شده است. خشک کردن محصولات کشاورزی، مواد غذایی و سبزیجات امروزه به دو روش کلی انجام می‌شود که در خشک کردن به روش سنتی، محصول را روی یک سطح صاف در زیر نور خورشید می‌گستراند تا خشک شود و در روش دوم با استفاده از یک سیستم خشک‌کن خورشیدی از گرمای خورشیدی برای خشک کردن محصولات بهره‌برداری می‌شود. خشک‌کن‌های خورشیدی به دو گروه عمده خشک‌کن‌های خورشیدی با همرفت اجباری (فعال) و خشک‌کن‌های خورشیدی با چرخه طبیعی با همرفت طبیعی (غیرفعال) طبقه بندی می‌شوند. در این تحقیق، گردش هوا در محفظه خشک‌کن‌های خورشیدی تحت همرفت اجباری در دو هندسه مختلف شبیه‌سازی عددی شد. کارایی خشک‌کن خورشیدی کابینتی غیرمستقیم و خشک‌کن خورشیدی کابینتی تحت همرفت اجباری با استفاده از فناوری CFD برای پیش‌بینی چگونگی توزیع جریان هوا (اندازه سرعت جریان هوا) و همچنین، شار حرارتی در این خشک‌کن‌ها تجزیه و تحلیل شد. پس از تعیین اندازه سرعت و همچنین، شار حرارتی و استخراج مقادیر مربوطه، مشخص شد که خشک‌کن کابینتی تحت همرفت اجباری دارای شار حرارتی تقریباً یکنواختی در سینی‌های خشک‌کن است.

کلید واژگان: خشک‌کن خورشیدی کابینتی، سینی‌های خشک‌کن، همرفت اجباری، صفحه جاذب نور خورشید، شار حرارتی

Numerical simulation of airflow in a drying chamber under compulsory convection and investigating the effect of drying chamber geometry on its efficiency

mehrnaz Roozbahani¹, kouros nekoufar², ali omran yazdi

1- MSc Student, Aerospace Research Institute

2- Assistant Professor, Department of Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

3- MSc Student, Department of Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

†Corresponding Author Email: nekoufar@iauc.ac.ir

Abstract:

Drying fruits and vegetables, as well as some foods, is one of the central processes of energy in the food industry and a promising way of reducing product losses. The rise in prices and the shortage of oil and gas fuels has led to an increased emphasis on the use of solar energy as a source of energy, especially in developing countries. Drying of agricultural products, food and vegetables today is carried out in two ways: in the traditional drying process, the product is grown on a flat surface under the sun to dry, and in the second method using a Solar drying system uses solar heat to dry the products. Solar dryers are classified into two main groups of forced dry convection (dry) and dry natural solar (nonactive) solar dryers. In this study, the air circulation in a condenser of solar dryers under compulsory convection in two different geometries was numerical simulation. Inductive solar drying efficiency and dry solar cell drying cabinets under forced convection using CFD technology to predict how air flow distribution (air flow velocity) and also heat flux in these drying agents are analyzed. Became After determining the velocity and also the thermal flux and extraction of the respective values, it was determined that the dry cabinet under compulsory convection had a substantially uniform heat flux in drying trays.

Keywords: Numerical simulation, drying chamber, compulsory convection

۱- مقدمه

و به خارج از محفظه هدایت می‌کند و موجب یک همرفت اجباری در داخل سیستم خشک‌کن می‌شود.



خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع دوم



خشک‌کن خورشیدی کابینتی غیرمستقیم

شکل (۱) - محفظه خشک‌کن‌های خورشیدی تحت همرفت اجباری
۲- معادلات حاکم

در این پژوهش روش عددی به کاررفته براساس حجم محدود است که در قالب نرم‌افزار فلوئنت از آن استفاده شده است. در این روش با تبدیل سه معادله اساسی حاکم بر جریان سیال در مکانیک سیالات (معادله پیوستگی، بقای مومنتم و بقای انرژی) به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. عدد رینولدز حاکم در مسئله خشک‌کن‌های خورشیدی تحت همرفت اجباری حدود ۱۰۵ است. مبنای عدد رینولدز در این مسائل بیشینه سرعت جریان هوا و اندازه محفظه‌ای است که هوا در آن جریان می‌یابد. بنابراین، با توجه به عدد رینولدز و حداکثر سرعت هوا، میدان جریان در این مسئله به صورت آشفتگی و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن آشفتگی نیز از مدل K-ε استاندارد استفاده شده است [۱].

۲-۱- معادله پیوستگی

معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = s_m \quad (1)$$

ρ و \mathbf{u} به ترتیب چگالی جریان و میدان سرعت است. منبع s_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته (مثلاً در نتیجه تبخیر قطرات مایع) از فاز گسسته دوم و هر کمیت تعریف‌شده دیگر است.

۲-۲- معادله بقای مومنتوم

معادله ناپایایی ناویر - استوکس برای جریان تراکم ناپذیر و بدون حضور نیروهای خارجی به شکل زیر است:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

ρ ، \mathbf{u}_i ، P و μ به ترتیب چگالی جریان، سرعت در جهت \mathbf{i} ، فشار استاتیکی و لزجت جریان است.

۲-۳- معادله بقای انرژی

معادله انرژی از قانون اول ترمودینامیک به دست می‌آید که بیان می‌کند نرخ تغییر انرژی ذره سیال برابر مجموع نرخ حرارت اضافه‌شده به ذره سیال و نرخ کار انجام شده روی ذره و نرخ افزایشی ناشی از منابع انرژی است. بدین ترتیب معادله انرژی عبارت است از:

خشک کردن فرایند ساده حذف آب اضافی (رطوبت) از یک محصول طبیعی یا صنعتی برای دستیابی به محتوای رطوبت استاندارد است، زیرا در اغلب موارد، مقدار رطوبت موجود در این محصولات بیشتر از مقدار مناسب برای نگهداری طولانی‌مدت است. افزایش قیمت‌ها و کمبود سوخت‌های محصول نفت و گاز منجر به افزایش تأکید بر استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی به-خصوص در کشورهای در حال توسعه شده است. خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی و سبزیجات امروزه به دو روش کلی انجام می‌شود که در خشک کردن به روش سنتی، محصول را روی یک سطح صاف در زیر نور خورشید می‌گسترانند تا خشک شود و در روش دوم با استفاده از یک سیستم خشک‌کن خورشیدی از گرمای خورشیدی برای خشک کردن محصولات بهره‌برداری می‌شود. خشک‌کن‌های خورشیدی به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند [۱-۴]:

۱- سیستم‌های خشک‌کن خورشیدی فعال (خشک‌کن‌های خورشیدی با چرخه اجباری): در این سیستم‌ها، هوا با عبور از زیر یک صفحه جاذب نور گرم می‌شود و چرخه هوای گرم از طریق یک فن دمنده یا مکنده هوا که در ابتدا یا انتهای ورودی هوا به محفظه نگهداری محصول قرار دارد از روی محصول می‌گذرد.

۲- سیستم‌های خشک‌کن خورشیدی غیرفعال (خشک‌کن‌های خورشیدی با چرخه طبیعی با همرفت طبیعی): در این سیستم، چرخه هوای گرم به صورت طبیعی و بدون حضور فن دمنده یا مکنده به سمت بالا یا پایین یا میان جرم محصول حرکت و محصول را گرم می‌کند و سبب خشک شدن آن می‌شود.

در این تحقیق، گردش هوا در محفظه خشک‌کن‌های خورشیدی تحت همرفت اجباری در دو هندسه مختلف زیر شبیه‌سازی عددی شد:

۱- خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع اول یا غیرمستقیم که دو قسمت دارد، یک قسمت برای جمع کردن اشعه آفتاب و تولید انرژی حرارتی (گرم کردن هوا) و یک قسمت برای گسترانیدن محصول که مجهز به سه سینی برای خشک کردن محصول است که از مشکل رنگ‌پریدگی محصول ناشی از تابش مستقیم نور خورشید در زیر صفحه جاذب و در یک مجموعه قرار می‌گیرد. دو فن محوری در ورودی هوا تعبیه شده است که می‌تواند نرخ زمان خشک شدن را شتاب بخشد.

۲- خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع دوم که دارای یک محفظه جدا برای قرار دادن سینی‌ها و یک واحد تولید هوای گرم توسط

انرژی خورشیدی است. هوای ورودی از زیر صفحه جاذب خورشید (کلکتور) عبور می‌کند و هوای گرم وارد قسمت محفظه خشک‌کن می‌شود که مجزاست و سینی‌ها در آن قرار دارد و با عبور از روزنه‌های روی سینی‌ها با سطح محصولات هر سینی تماس پیدا می‌کند. دو فن محوری در بالای محفظه قرار داده شده‌اند که جریان هوا را مکیده

خشک‌کن‌های خورشیدی مورد مطالعه از نوع همرفت اجباری است. در ورودی از شرط مرزی سرعت ورودی^۱ استفاده شده است. همچنین، برای استفاده از این شرط مرزی باید مقادیر دمای هوای ورودی و پارامتر توربولانس نیز وارد شود. مقدار سرعت ورودی در مدل‌های کابینتی ۰/۰۱ متر بر ثانیه و در مدل‌های تونلی ۰/۰۲ متر بر ثانیه (به دلیل ابعاد بزرگ‌تر) و همچنین، دمای هوای ورودی نیز ۳۱۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است.

۳-۲- شرط مرزی خروجی

در خروجی خشک‌کن‌ها از شرط مرزی فشار خروجی^۲ استفاده شده است. جریان توسط فن‌هایی به داخل محفظه وارد یا توسط فن‌هایی در خروجی به بیرون رانده می‌شود، بنابراین، هنگام خروج هوا از دهانه‌های خروجی فشار به وجود می‌آید که مقدار دما را نیز باید برای فشار خروجی تعریف کرد.

۳-۳- شرط مرزی کلکتور (صفحه جاذب نور خورشید)

خشک‌کن‌های خورشیدی از طریق صفحه جاذب نور خورشید (کلکتور)، گرما را به داخل محفظه خشک‌کن منتقل می‌کند. بنابراین، شرط مرزی کلکتورها را یک دیواره داغ با دمای ۳۵۰ درجه کلوین (معادل ۷۷ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است تا هوای ورودی بر اثر عبور از زیر این صفحه داغ گرم شود. دمای تعیین شده براساس میانگین دمایی است که کلکتورهای خورشیدی در خشک‌کن‌های مورد مطالعه و آزمایش دارا بوده‌اند.

۳-۴- دیگر شرایط مرزی

تمام دیواره‌های خشک‌کن‌های خورشیدی با میزان ناهمواری ۵ میلی‌متر با شرط عدم لغزش به عنوان شرط دیوار فرض و دما نیز به صورت شار گرمایی برای دیواره‌ها تعریف شده است.

۴- الگوریتم حل

بعد از گسسته‌سازی معادلات حاکم، برای حل معادلات از حل‌کننده Segregated نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. با استفاده از این حل‌کننده معادلات حاکم به طور متوالی حل می‌شوند. بعد از آن معادله بقای جرم، معادله تصحیح فشار (بقای جرم) و بعد از آن معادلات انرژی، آشفنگی و دیگر کمیت‌های اسکالر تعریف‌شده حل می‌شوند.

۴-۱- بررسی عددی شار حرارتی و اندازه سرعت در ورودی، خروجی و روی سینی‌های خشک‌کن کابینتی نوع اول

در شکل (۲) اندازه سرعت به شکل برداری در ورودی و خروجی خشک‌کن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است جریان توسط دو فن محوری به داخل وارد می‌شود و از طریق سوراخ‌هایی که در قسمت پایینی محفظه خشک‌کن تعبیه شده است به خارج هدایت می‌شود.

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(Pu_i) + \frac{\partial(u_i \tau_{ji})}{\partial x_j} + \text{div}(K \text{grad}T) + S_E \quad (3)$$

که در آن E انرژی مخصوص سیال است و به صورت مجموع انرژی داخلی i ، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل گرانشی تعریف می‌شود. K و T به ترتیب دمای جریان، ضریب انتقال حرارت هدایتی و تانسور تنش برشی می‌باشد. S_E نیز به عنوان منبع انرژی جریان در نظر گرفته شده است [۵-۶].

۲-۴- مدل آشفنگی K-ε

در این تحقیق، برای در نظر گرفتن آشفنگی جریان از مدل K-ε استاندارد استفاده شده است. در مدل آشفنگی K-ε، ترم تنش رینولدزی توسط گرادینان مقادیر متوسط جریان تقریب زده می‌شود. در این مدل تنش‌های رینولدزی با استفاده از فرضیه بوسینیسک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij} \quad (4)$$

که μ_t لزجت گردآبه و κ انرژی جنبشی آشفنگی است.

۲-۵- گسسته‌سازی معادلات

اولین گام برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال، گسسته‌سازی معادلات است. برای این منظور، از روش حجم محدود استفاده شده است. برای هر حجم کنترل اختیاری معادلات حاکم بر جریان سیال را می‌توان به شکل رابطه کلی (۵) نوشت:

$$\frac{d}{dt}(\rho u \phi) + \sum_{\text{faces}} [(\rho u_n A) \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial n} A] = S \Delta V \quad (5)$$

در این رابطه n راستای عمود بر سطح حجم کنترل است. در معادلات مومنوم سرعت (u) جایگزین پارامتر ϕ ، لزجت (μ) جایگزین Γ و نیروهای سطحی و حجمی در عبارت منبع بیان می‌شود. در معادله انرژی دما (T) جایگزین ϕ و ضریب انتقال حرارت جایگزین Γ می‌شود. همچنین، در معادله پیوستگی تابع همانی (عدد یک) جایگزین ϕ خواهد شد.

برای گسسته‌سازی معادلات مومنوم و انرژی و معادله انرژی جنبشی آشفنگی و معادله نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفنگی از روش بادسو مرتبه دوم و برای گسسته‌سازی معادله فشار از روش استاندارد استفاده شده است. همچنین، برای کوپلینگ سرعت - فشار روش سیمپل بکار برده شده است.

۳- شرایط مرزی

به دلیل اینکه این خشک‌کن‌ها، دارای ساختمان مشابه می‌باشند و کار یکسانی انجام می‌دهند، دارای شرایط مرزی یکسانی نیز خواهند بود.

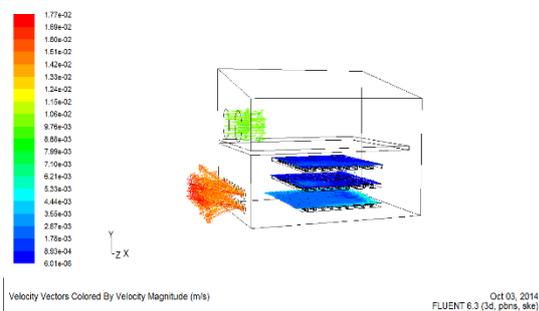
۳-۱- شرایط مرزی ورودی

¹- velocity-inlet

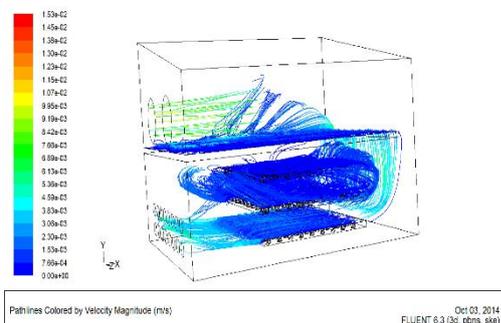
²- pressure-outlet

است. یعنی دمای هوای ورودی در محدوده $310 \times 10^3 \text{ K}$ تا $370 \times 10^3 \text{ K}$ قرار دارد که تقریباً معادل 310 K است (دمای ورودی هوا در شرط مرزی). همچنین، دمای صفحه جاذب 350 K است که به عنوان داغ‌ترین جسم در خشک‌کن در نظر گرفته می‌شود که جریان هوا از روی این صفحه عبور می‌کند. در حالت دما ثابت دمای سینی‌های ۱، ۲ و ۳ معادل 290 K است که سردترین جسم در خشک‌کن است.

با توجه به شکل (۵) شار حرارتی (تبادل حرارت بین هوا، صفحه جاذب و سینی‌ها) بررسی می‌شود. هوای عبوری به دلیل دارا بودن دمای پایین‌تر از دمای صفحه جاذب سبب می‌شود که دمای بیشتر قسمت‌های سطح صفحه جاذب به حدود 324 K برسد که نشان می‌دهد حرارت صفحه جاذب به هوا منتقل و در نتیجه، صفحه جاذب خنک‌تر شده است. همچنین، با توجه به شکل (۶) دمای سطح سینی ۳ که در معرض بیشترین مقدار جریان هوا قرار دارد به دمای حدود 322 K افزایش می‌یابد در حالی که سینی‌های ۱ و ۲ دارای دمایی در محدوده 302 تا 307 درجه کلوین است که مشاهده می‌شود در سینی‌های ۱ و ۲ (سینی بالایی و وسطی)، دما در ابتدای سینی‌ها یعنی در قسمت‌هایی که نزدیک‌تر به داکت است، کمتر و در قسمت‌های انتهایی و لبه‌های جلوی سینی که نزدیک به سوراخ‌های خروجی است، سردتر است. پس با توجه به مقادیر دما در سینی‌های خشک‌کن خورشیدی کابینتی غیرمستقیم نوع اول، سینی ۳ گرم‌ترین سینی نسبت به سینی‌های ۱ و ۲ است.



شکل (۲) - اندازه سرعت در ورودی، خروجی و روی سینی‌های خشک‌کن کابینتی نوع اول



شکل (۳) - انتشار جریان و سرعت هوا در خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع اول

نحوه انتشار جریان و سرعت هوا در خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع اول در شکل (۳) نمایش داده شده است که جریان پس از مکیده شدن توسط دو فن به داخل جریان هوا از روی صفحه جاذب عبور کرده، سپس از طریق مجرای تعبیه‌شده (داکت) بین صفحه جاذب و دیواره خشک‌کن، جریان روی سینی‌های محفظه خشک‌کن دمیده و سپس به سوراخ‌های خروجی هدایت می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود بردار اندازه سرعت هوا بعد از عبور از روی صفحه جاذب و خارج شدن از دهانه (داکت)، بیشترین مقدار جریان روی سطح سینی ۳ بوده است که نشان می‌دهد سینی‌های ۱ و ۲ (سینی وسط و بالایی) کمترین مقدار سرعت عبوری را نسبت به سینی ۳ دارند.

در شکل (۴) اندازه سرعت بررسی عددی شده است. برای مشاهده بهتر کانتور اندازه سرعت هوا یک صفحه عمود بر محور x ساخته شده است تا تغییرات اندازه سرعت در داخل محفظه خشک‌کن و روی صفحه جاذب و سینی‌ها واضح‌تر باشد. همان‌طور که مشخص است در قسمت ورودی که همان فن‌های محوری هستند در مرکز فن مقدار اندازه سرعت برابر $1.07 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و اندازه سرعت در مرکز سوراخ‌های خروجی بین $1/45 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و $1/53 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ است. مقدار اندازه سرعت روی صفحه جاذب (تقریباً در اواسط و اواخر صفحه جاذب، قبل از داکت بین $3/83 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و $4/59 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ قرار دارد. مقدار اندازه سرعت در ابتدای ورودی داکت (بین صفحه جاذب و دیواره خشک‌کن) تا قبل از سینی ۳ (پایین‌ترین سینی در خشک‌کن، حدود $6/13 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ تا $8/42 \times 10^{-2} \text{ m/s}$) تا $4/59 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ است.

طبق شکل (۴) مقدار اندازه سرعت هوا روی سینی ۳ حدود $3/6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ تا $4/59 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ روی سینی‌های ۱ و ۲ تقریباً برابر $7/66 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ است.

بیشترین مقدار اندازه سرعت هوا به ترتیب در مرکز دهانه فن‌های محوری $1/07 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و در مرکز دهانه خروجی $1/45 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و سپس، در ابتدای داکت تا ابتدای سینی ۳ با مقدار سرعت در محدوده $6/13 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ و $8/42 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ تا $4/59 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ در انتها روی سطح سینی ۳ مقدار اندازه سرعت در محدوده $3/83 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ تا $4/59 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ قرار دارد.

۴-۱-۱- بررسی شار حرارتی

پیش از بررسی شار حرارتی در خشک‌کن کابینتی نوع اول، مسیر جریان هوا و همچنین، صفحه جاذب و سینی‌هایی بررسی می‌شود که در حالت دما ثابت^۴ است. شایان ذکر است که در حالت دما ثابت که در شکل (۵) مشخص شده است، حرارت بین هوا و صفحه جاذب انرژی خورشید^۵ و سینی‌ها مبادله نشده و متغیر هوا و صفحه جاذب و همچنین، سینی‌ها در حالت دما ثابت یا دمای متعلق به خودشان

³ - Duct

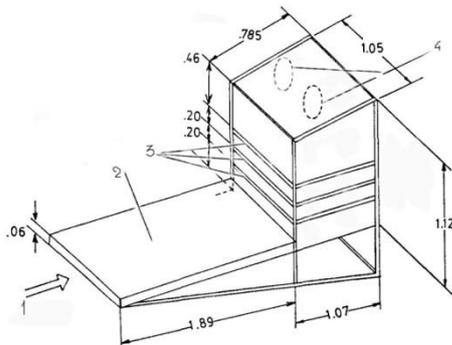
⁴ - Static temperature

⁵ - Absorber plate

۴-۲- خشک کن کابینتی غیرمستقیم تحت همرفت اجباری

نوع دوم

مطابق شکل (۷) این خشک کن دارای یک محفظه جدا برای قرار دادن سینی‌ها و یک واحد تولید هوای گرم توسط انرژی خورشیدی است. هوای ورودی از زیر صفحه جاذب خورشید (کلکتور) عبور می‌کند و هوای گرم وارد قسمت محفظه خشک کن می‌شود که به صورت جداست و سینی‌ها در آن قرار دارند (از این رو، خشک کن کابینتی نوع دوم نامیده می‌شود). سپس، هوای گرم به زیر سینی ۱ وارد خواهد شد و با عبور از سینی ۱ از طریق روزنه‌های سینی به سینی ۲ و در نهایت به سینی ۳ می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو فن محوری در بالای محفظه قرار داده شده‌اند که جریان هوا را می‌مکد و به خارج از محفظه هدایت می‌کند که سبب یک همرفت اجباری در داخل سیستم خشک کن می‌شود.



شکل (۷) - خشک کن کابینتی نوع دوم، (۱) هوای ورودی، (۲) کلکتور (صفحه جاذب)، (۳) سینی‌های محفظه خشک کن، (۴) دو عدد فن dc

در این مدل مقادیر دمای کلکتور 350°C درجه کلون برای تمام مدل‌ها) و سرعت جریان هوا 0.1 متر بر ثانیه برای خشک کن‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

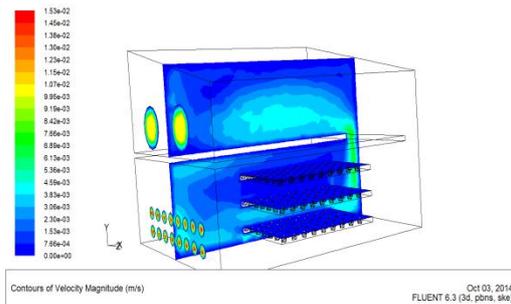
۴-۲-۱- بررسی عددی شار حرارتی و اندازه سرعت در ورودی،

خروجی و روی سینی‌های خشک کن کابینتی نوع دوم

با توجه به شکل (۸) که مسیر اندازه سرعت نشان داده شده است، می‌توان دریافت که اندازه سرعت هوا در زیر صفحه جاذب و در قسمت ورودی هوا تا انتهای صفحه جاذب و فصل مشترک واحد گرم-کننده هوا و قسمت محفظه خشک کن یکسان است. البته بلافاصله سرعت هوا پس از خروج از محفظه گرمکن هوا و به محض وارد شدن به زیر سینی ۱ اندکی تغییر می‌کند و در ادامه، مقدار اندازه سرعت در بالای سینی‌های ۱، ۲، و ۳ یکنواخت است تا اینکه در نهایت مقدار آن در دهانه خروجی (فن‌ها) بیشینه می‌شود.

برای بررسی عددی اندازه سرعت شکل (۹) در نظر گرفته می‌شود که برای بررسی لایه‌های سرعت هوا در داخل خشک کن صفحه‌ای عمود بر محور X ساخته شده است (در راستای محور Z).

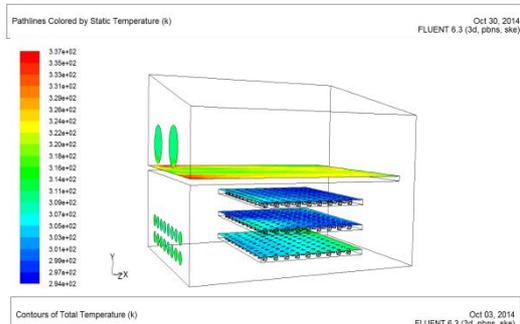
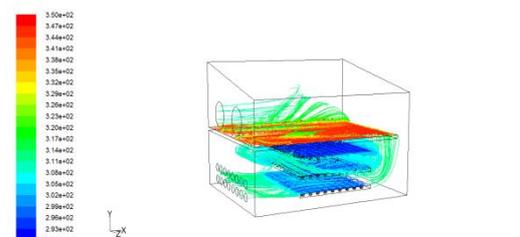
با توجه به شکل (۸) اندازه سرعت هوا وقتی از زیر صفحه گرمکن هوا خارج می‌شود و در لایه‌های مرکزی به حداکثر خود یعنی $2.13 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ می‌رسد و هرچه به سمت بالاتر و روی سینی‌های ۱، ۲، و ۳



شکل (۴) - بررسی عددی اندازه سرعت در خشک کن خورشیدی کابینتی نوع اول در حضور صفحه عمود بر محور X

با توجه به شکل (۵) شار حرارتی (تبادل حرارت بین هوا، صفحه جاذب و سینی‌ها) بررسی می‌شود. هوای عبوری به دلیل دارا بودن دمای پایین‌تر از دمای صفحه جاذب سبب می‌شود که دمای بیشتر قسمت‌های سطح صفحه جاذب به حدود 324°K برسد که نشان می‌دهد حرارت صفحه جاذب به هوا منتقل و در نتیجه، صفحه جاذب خنک‌تر شده است. همچنین، با توجه به شکل (۶) دمای سطح سینی ۳ که در معرض بیشترین مقدار حال با توجه به مفاهیم انتقال جرم و انتقال حرارت و مطالعاتی که بیشتر درباره خشک شدن و انتقال جرم انجام شده است [۱] و براساس نتایجی حاصله می‌توان گفت که با توجه به شار حرارتی سینی ۳، این سینی در حال دریافت انرژی از هواست زیرا سینی ۳ بیشتر در معرض جریان هوای گرم قرار گرفته است و همین‌طور گرمای این سینی به محصول روی آن منتقل (به دلیل حضور رطوبت در محصول) و در نتیجه محصول روی آن زودتر و بهتر خشک خواهد شد.

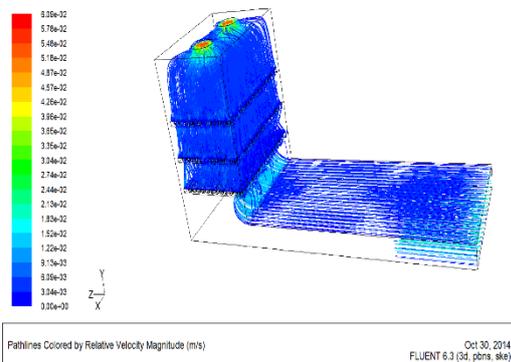
شکل (۵) - مسیر جریان هوا و صفحه جاذب و سینی‌ها در حالت دما ثابت



شکل (۶) - بررسی شار حرارتی در خشک کن خورشیدی کابینتی نوع اول

میان‌ه سطح سینی و لبه‌های کناری (لبه‌های کناری چسبیده به دیواره بیرونی) به حدود $3/07 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/09 \times 10^3 \text{ K}$ می‌رسد و در سطح سینی ۳ و لبه‌های کناری و چسبیده به دیواره‌های بیرونی دما حدود $3/05 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/07 \times 10^3 \text{ K}$ خواهد بود.

وقتی هوای گرم به سینی ۱ در این مدل می‌رسد طبیعتاً دارای رطوبت کمتری است و هوای عبوری از زیر سطح صفحه جاذب نیز داغ‌تر است و لذا پس از عبور از سینی ۱ و گرم کردن محصول در سینی ۱ مقداری از رطوبت محصول در این سینی از محصول جدا شده و به هوا انتقال می‌یابد که سبب می‌شود هوا کمی خنک‌تر شود (نسبت به هوایی که به سینی ۱ رسیده است). سپس هوای خنک‌شده وارد سینی ۲ می‌شود و مقداری از رطوبت محصول از سینی ۲ را همراه خود می‌برد که در نتیجه هوا خنک‌تر خواهد شد. مبادله حرارتی بین هوا و سینی رخ می‌دهد که در نتیجه سبب خنک‌تر شدن سینی ۳ می‌شود. در نتیجه همان‌طور که بررسی عددی تغییرات دما نشان می‌دهد می‌توان دریافت که راندمان خشک کردن در سینی ۱ بیشترین است و به تدریج در سینی ۳ کاهش می‌یابد؛ اما این کاهش جزئی خواهد بود. زیرا تغییرات دمای سطح سینی ۱ ($3/13 \times 10^3 \text{ K}$) تا سطح سینی ۳ ($3/07 \times 10^3 \text{ K}$) که نشان می‌دهد حدود $0/06$ درجه کلین کاهش دما داشته است که این تغییرات در کل ناچیز است. همچنین، در مقایسه با خشک‌کن خورشیدی نوع اول نسبت خشک شدن تقریباً، نسبت بهتری است [۱].



شکل (۸) - مسیر اندازه سرعت در ورودی، خروجی و روی سینی‌های خشک‌کن کلینتی نوع دوم



شکل (۹) - بررسی عددی اندازه سرعت در خشک‌کن خورشیدی کلینتی نوع دوم در حضور صفحه عمود بر محور X

و همچنین نزدیک به دیواره‌های محفظه خشک‌کن اندازه سرعت به کمترین مقدار خود و حدود $3/05 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ می‌رسد.

با توجه به شکل‌ها و با توجه به دهانه خروجی (فن‌های خروجی) مشاهده می‌شود که هرچه به سمت خروجی و مرکز فن پیش می‌رود، اندازه سرعت بیشتر می‌شود و قبل از رسیدن به مرکز فن اندازه سرعت در محدوده $3/96 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ تا $4/26 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ خواهد بود تا اینکه بیشینه سرعت در مرکز فن (مرکز دهانه فن) به $5/79 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ می‌رسد.

با توجه به مقادیر اندازه سرعت، بیشینه آن در خروجی (هنگام خروج جریان هوا از فن) است و سپس لایه‌های میانی جریان هوا در زیر صفحه گرمکن هوا و همچنین، لایه‌های میانی دهانه ورودی دارای اندازه سرعت $2/13 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ تا $2/44 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ است.

در قسمت محفظه خشک‌کن و روی سینی‌های ۱، ۲ و ۳ و همچنین، دیواره‌های محفظه خشک‌کن اندازه سرعت جریان هوا در کمترین مقدار خود یعنی $3/05 \times 10^{-3}$ است. ولی تغییرات اندازه سرعت روی سینی‌های ۱، ۲ و ۳ تقریباً یکنواخت است. شایان ذکر است که فقط قبل از سینی ۱ مقدار اندازه سرعت حدود $3/13 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ است که نشان می‌دهد اندازه سرعت در قبل از سینی ۱ نسبت به بالای سینی ۱، ۲ و ۳ بیشتر است.

۴-۲-۲- اندازه شار حرارتی

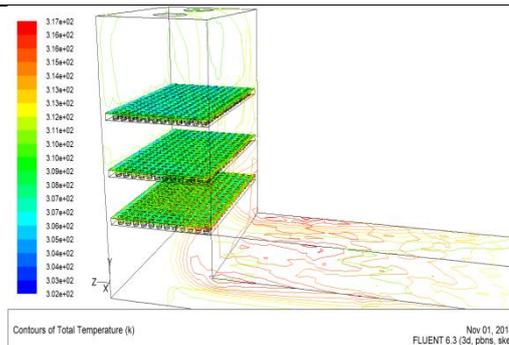
در بررسی شار حرارتی خشک‌کن خورشیدی تحت همرفتی نوع دوم با توجه شکل (۱۰) دمای هوای ورودی حدود 310 K است که وقتی از زیر کلکتور خورشیدی با دمای 350 درجه کلین عبور می‌کند سبب تغییراتی در دمای صفحه جاذب خورشیدی می‌شود. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که دمای بخش‌های ابتدایی کلکتور در دامنه $3/11 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/13 \times 10^3 \text{ K}$ قرار دارد که نشان می‌دهد که دمای صفحه جاذب در ابتدای صفحه جاذب کاهش می‌یابد و همچنین، دمای انتشار صفحه جاذب و همین‌طور دمای هوای عبوری از زیر این صفحه در انتهای صفحه و نزدیک به ورودی محفظه خشک‌کن و حتی دمای هوای لایه‌های نزدیک به دیواره، خشک و زیر سینی اول (دمای هوای لایه‌های نزدیک به صفحه جاذب) حدود $3/17 \times 10^3 \text{ K}$ است که نشان می‌دهد هوای عبوری از زیر سطح صفحه جاذب داغ‌تر شده است. در حالی که هوای لایه‌های داخلی و میانی (هرچه از صفحه جاذب دورتر می‌شود) دمای هوا به حدود $3/13 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/11 \times 10^3 \text{ K}$ می‌رسد، در نتیجه با وارد شدن این جریان هوا با دمایی بین $3/11 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/17 \times 10^3 \text{ K}$ سینی‌های ۱، ۲ و ۳ سبب بروز تغییراتی در درجه حرارت این سینی‌ها خواهد شد که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود.

با ورود هوای گرم به محفظه خشک‌کن و سینی‌ها مشاهده می‌شود دمای هوای گرم ابتدا به سینی ۱ می‌رسد که موجب می‌شود سینی ۱ (سطح سینی ۱) به‌خصوص در لبه کناری و مجاور به صفحه جاذب به دمایی حدود $3/10 \times 10^3 \text{ K}$ تا $3/13 \times 10^3 \text{ K}$ برسد. در ادامه در سینی ۲ مشاهده می‌شود که دمای سطح سینی ۲ به خصوص در

است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که در خشک کن کابینتی نوع دوم راندمان خشک کن بهتر از راندمان خشک کن کابینتی نوع اول است.

۷- منابع

- رضایی نوایی، سیده روجا، مطالعه فرایند خشک کردن سبزیجات با اندازه‌گیری ضریب انتقال جرمی، دانشگاه آزاد شاهرود، ۱۳۹۱.
- sreekumar.A, Manikantan.P.E , Vijayakumar .K.P, "Performance Of Indirect Solar Cabinet Dryer", India, kochi 682 022, 2008
- chirattananon.S,Chinporncharoenpong.C,Chirattananon. R , " Seedy-State Model For The Forced Convection Solar Cabinet Dryer", Bangkok,Thailand,1998.
- Srisittipokakun. N , Kirdsiri.K, Kaewkhao . J , " Solar Drying Of Andrographis Paniculata Using A Parabolic-Shaped Solar Tunnel Dryer", Bangkok 10400, Thailand, 2010
- Bala.B.K , Mondol.M.R.A , Biswas.B.K ,Daschowdury.B.L , Janjai.S,"Solar Drying Of Pineapple Using Solar Tunnel Drier", Thailand, Bangladesh, 2001-2002.
- Belessiotis.V,Delyannis.E,"Solar Drying,Greece ", 153-10 Aghia paraskevi, 2010.



شکل (۱۰)- شار حرارتی خشک کن کابینتی نوع دوم

در جدول (۱) نرخ انتقال حرارت خشک کن کابینتی نوع اول برای هر سینی فهرست شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سینی ۳ (پایین‌ترین سینی) دارای انرژی ۱۶۸۰/۷۶۲W یا ۱/۶۸۱kW است که نشان می‌دهد، سینی ۳ بیشترین انرژی را از هوای گرم ورودی به محفظه خشک کن دریافت می‌کند. لذا محصول روی سینی ۳ (پایین‌ترین سینی) زودتر و بیشتر خشک خواهد شد. به علاوه، مشاهده می‌شود که سینی ۱ از سینی ۲ انرژی بیشتری دریافت می‌کند زیرا سینی ۱ (بالا‌ترین سینی) نزدیک به صفحه جاذب است.

جدول (۱)- خشک کن خورشیدی کابینتی غیرمستقیم تحت همرفت

اجباری نوع اول

شماره سینی	نرخ انتقال حرارت کلی (W)
سینی ۱	-۹۹۴/۱۷۴
سینی ۲	-۹۱۱/۳۲
سینی ۳	-۱۶۸۰/۷۶۲

در جدول (۲) نرخ انتقال حرارت خشک کن کابینتی نوع دوم برای هر سینی فهرست شده است. مشاهده می‌شود که سینی ۱ (پایین‌ترین سینی) در حال دریافت بیشترین انرژی از هوای گرم است (۹۴۶/۵۵ وات یا ۰/۹۵ کیلووات) و در سینی ۲ مقدار انرژی حرارتی دریافتی از هوا برابر است با ۸۸۳/۰۰۴۲۱W. همچنین، در سینی ۳ (بالا‌ترین سینی) مقدار انرژی حرارتی دریافتی از هوا برابر است با ۸۴۲/۵۳۲۴۷W که نشان می‌دهد هرچه هوای گرم بالاتر می‌رود انرژی بیشتری را از دست می‌دهد، لذا محصول روی سینی ۱ بیشتر و سریع‌تر از سینی ۳ خشک می‌شود.

جدول (۲)- خشک کن خورشیدی کابینتی غیرمستقیم تحت همرفت

اجباری نوع دوم

شماره سینی	نرخ انتقال حرارت کلی (W)
سینی ۱	-۹۴۶/۵۵۹۲۷
سینی ۲	-۸۸۳/۰۰۴۲۱
سینی ۳	-۸۴۲/۵۳۲۴۷

۶- نتیجه‌گیری

در خشک کن‌های خورشیدی کابینتی تحت همرفت اجباری، خشک کن کابینتی نوع دوم به دلیل اینکه نرخ انتقال حرارت در سینی‌های خشک کن به تدریج تغییر می‌کند، در مقایسه با نوع اول که میزان نرخ انتقال حرارت در یک سینی بیشتر از دو سینی دیگر