



## Numerical Simulation of Indirect Cabinet Solar Dryer by Spraying of Water Droplets in Yazd Climate

Mohammad Saleh Barghi Jahromi<sup>1</sup>, Vali Kalantar<sup>2</sup>, Mohmmad Omidpanah<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Phd Student of Energy Conversion, Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 07.04.2021

**Revised:** 09.12.2021

**Accepted:** 10.04.2021

#### Keyword:

Indirect Cabinet Solar Dryer  
Natural Convection  
Water Droplets Spraying  
Dehumidifier  
Numerical Simulation  
Energy Optimization

### ABSTRACT

Using fossil fuels causes environmental problems such as greenhouse emissions and air pollution. In this study, the use of solar dryers greatly reduced fossil fuel consumption in Yazd area and reduced environmental pollution in addition to increasing the quality of dried products. This dryer operates by passing natural convection or forced convection between the products and directly depends on the solar radiation received by the collector. To simulate the performance of the dryer, its 2D dimensions were modeling in Gambit software. Using Ansys Fluent software, by applying the amount of heat flux created at different hours in July 2020 for the geographical conditions of Yazd city on the collector, air flow and outlet temperature was reported. Based on the contours and diagrams, it was concluded that with a mass flow rate of 0.16 kg / s and a temperature of approximately 35C°, the drying conditions of grains and vegetables can be provided in the sunny conditions of Yazd.

#### \*Corresponding Author:

Mohmmad Omidpanah

**Email:** [Momidpanah@tvu.ac.ir](mailto:Momidpanah@tvu.ac.ir)



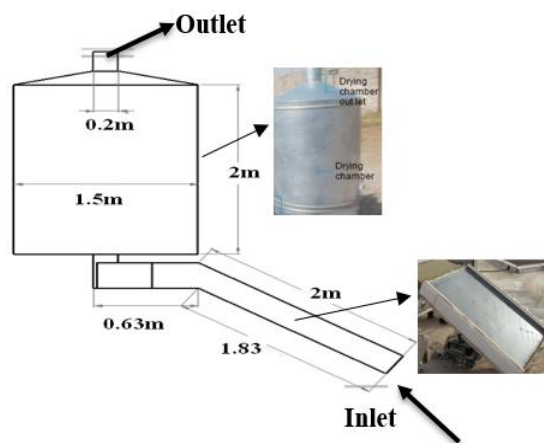
**EXTENDED ABSTRACT**

**Introduction**

One of the main axes in the field of energy is the energy efficiency of energy supply systems. Iran is a country where less attention is paid to how energy is consumed and optimized energy-consuming systems due to the abundance of fossil fuels. Therefore, designing and building systems that can use new and renewable energy independently or in combination is both important and necessary. Iran is geographically located between 25 to 40 degrees north and 43 to 55 degrees east, has an average of 300 sunny days and is one of the most prone areas to use solar radiation in various fields, particularly in drying. The use of solar dryers in agricultural production areas such as farms and gardens saves energy, optimizes the conversion of agricultural products, and reduces production costs.

**Methodology**

According to Figure (1), the indirect solar dryer consists of the following parts: 1- Flat plate solar air heater which includes glass, copper absorber; Plate 2- Dryer chamber; and 3- Interface channels. The mechanism of the dryer is such that by exposing the sunlight to the air of the flat plate solar heater, after passing through the glass layer, it reaches the copper absorber and causes the absorber to heat up. As air flows through the channel between the glass sheet and the absorber, the air heats up due to the convection, and the density of air on this plate decreases and moves upwards, and the colder air moves downwards. Finally, it moves towards the dryer chamber and exits through an outlet, which reduces the moisture in the dryer chamber in the middle of the path.



**Figure 1. Two-dimensional geometrical diagram of the solar dryer studied.**

Boundary conditions at the inlet and outlet of the inlet and outlet pressure type were selected and a heat flux of 400 w/m was applied to the glass taking into account the glass and other coefficients of 114 watts per square meter entering the control volume. The surface below the collector and the walls of the dryer were insulated. Since the Riley number in the collector was much higher than  $10^9$ , the turbulent flow regime was selected and the standard  $K - \epsilon$  model used.

## Results and discussion

Figure 2 (a) shows the pressure contour as shown in the areas of the solar dryer where there is high speed and as a result the pressure is low, and vice versa. Figure 2 (b) shows the velocity contour created in different parts of the solar dryer with a maximum of 0.983 m/s at the inlet of the air heater and in the inlet area to the dry chamber. Due to the changes in velocity, a vortex was generated. In Figure 2 (c), the contour of the streamlines in the solar collector and the drying chamber can be observed. There was a higher temperature near the absorber plate because of the absorber plate and the solar radiation intensity being directly related.

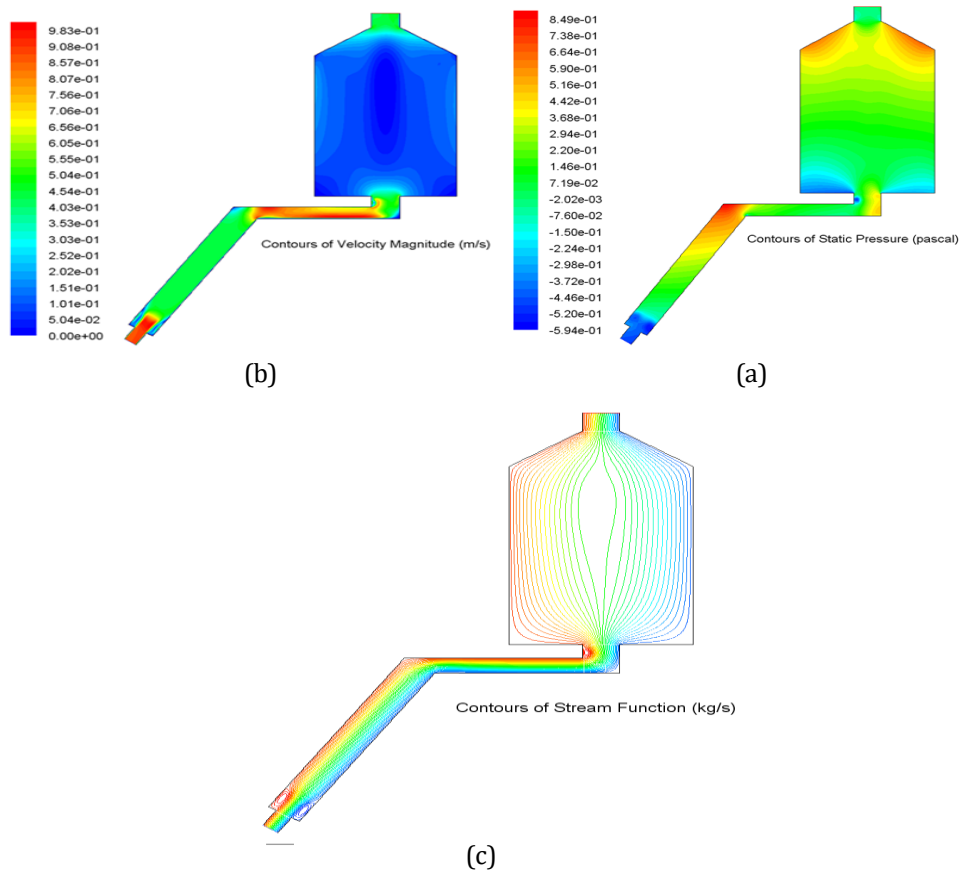


Figure 2. (a) Pressure contour; (b) velocity contour; (c) streamline contour in a solar dryer.

The temperature contour is shown in Figure 3 where the maximum temperature is 328 K and is on the absorber plate because the absorber plate behaves like a black body and has the highest absorption coefficient and the lowest emission coefficient.

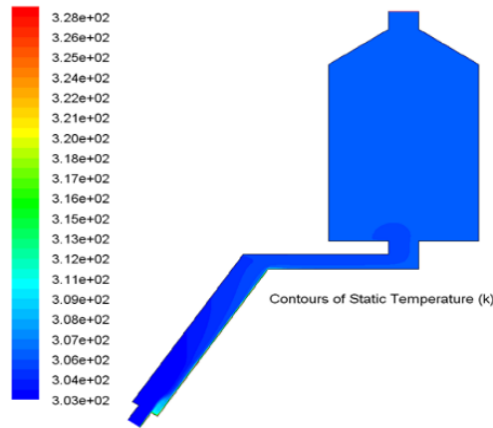


Figure 3. Static temperature contour of solar dryer.

**Conclusion**

Based on the simulation, the following results were obtained. With a mass flow rate of 0.16 kg/s and a temperature of approximately 35 ° C inside the solar dryer chamber, the drying conditions of various grains and vegetables with a lower drying temperature than agricultural products can be created in the sunny climate of Yazd city without the use of fossil fuels. Thus, it is recommended that a solar dryer be used in the process of dehumidification and drying.

## شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم کابینتی با پاشش قطرات آب در شهر یزد

محمد صالح برقی جهرمی<sup>۱</sup>، ولی کلاتر<sup>۲</sup>، محمد امیدپناه<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث به‌وجود آمدن مشکلات زیست‌محیطی نظیر نشر گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌گردد. در این بین استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی می‌تواند تا حد زیادی از مصرف سوخت‌های فسیلی در این حیطه جلوگیری کرده و علاوه بر افزایش کیفیت محصول خشک‌شده باعث کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی گردد. این خشک‌کن‌ها با عبور جریان همرفت طبیعی یا اجباری همرفت هوای گرم بین محصولات عمل می‌کنند و وابستگی مستقیمی به شدت تابش دریافتی خورشید توسط جمع‌کننده دارند. برای شبیه‌سازی عملکرد خشک‌کن، هندسه دوبعدی آن در نرم‌افزار آنسیس فلونت (ANSYS FLUENT) با اعمال میزان شار حرارتی ایجاد شده در ساعت‌های مختلف در تیرماه سال ۱۳۹۹ برای شرایط جغرافیایی شهر یزد روی جمع‌کننده، دبی هوا و در نهایت دمای خروجی گزارش شده است. نتایج با تحلیل کانتورها و نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با دبی جرمی  $0.116 \text{ kg/s}$  و دمای تقریباً  $35^\circ\text{C}$  می‌توان شرایط خشک‌کردن حبوبات و سبزیجات را در شرایط آفتابی شهر یزد فراهم کرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

### کلید واژگان:

خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم کابینتی  
جریان همرفت طبیعی  
پاشش قطرات آب  
رطوبت‌زدایی  
شبیه‌سازی عددی  
بهینه‌سازی انرژی

\*نویسنده مسئول: محمد امیدپناه

پست الکترونیکی:

Momidpanah@tvu.ac.ir

## مقدمه

یکی از محورهای اصلی در حوزه انرژی، بازده انرژی سامانه‌های تأمین انرژی می‌باشد. ایران کشوری است که به دلیل فراوانی انرژی‌های فسیلی، توجه کمتری به نحوه مصرف انرژی و بهینه‌سازی سامانه‌های مصرف‌کننده انرژی می‌شود. اما در دهه‌های اخیر با توجه به رو به پایان بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی حاصل از مصرف این نوع سوخت‌ها، در سند جامع توسعه کشور مقرر گردیده است که تا سال ۱۴۳۰، باید حداقل ۳۰ درصد از شبکه تولید برق، از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تأمین شود که از این میزان بیش از ۱۵ درصد مربوط به انرژی خورشیدی خواهد بود. بنابراین طراحی و ساخت سامانه‌هایی که بتواند به‌طور مستقل یا ترکیبی از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر بهره‌برداری کند، امری مهم و ضروری است [۱]. انرژی خورشیدی یکی از منابع مهم انرژی‌های نو می‌باشد و به دلیل فراوانی و قابل دسترس بودن بیشتر مورد توجه طراحان و مهندسان انرژی قرار گرفته است. ایران با قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۳ تا ۵۵ درجه شرقی و متوسط ۳۰۰ روز آفتابی، یکی از مستعدترین مناطق برای استفاده از تابش خورشیدی در زمینه‌های مختلف به‌خصوص خشک‌کردن است [۲]. بیش از ۳۰ درصد از انرژی تولیدی در جهان در بخش کشاورزی مصرف می‌شود که حدود ۱۲ درصد آن برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. کاربرد خشک‌کن‌های خورشیدی در محل‌های تولید محصولات کشاورزی مانند مزارع و باغ‌ها باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تبدیل بهینه محصولات کشاورزی و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

عزیزیا<sup>۱</sup> و همکاران [۴] به بررسی تجربی یک سیستم جدید خشک‌کن گلخانه‌ای در حالت ترکیبی جدید با و بدون ذخیره انرژی حرارتی برای خشک‌کردن گیاه فلفل پرداختند. سیستم خشک‌کردن شامل دو گلخانه خورشیدی، یک واحد ذخیره‌سازی و دو آب‌گرم‌کن خورشیدی یکسان است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که درجه حرارت هوا در داخل گلخانه خورشیدی با مواد تغییرفازدهنده (PCM) در تمام مدت شب حدود ۷/۵ درجه سانتی‌گراد از سایر خشک‌کن‌ها بالاتر است. رطوبت نسبی در محفظه خشک‌کن با PCM حدود ۱۸/۶ درصد نسبت به رطوبت نسبی محیط پس از غروب آفتاب کمتر است. میزان رطوبت ۹۵ درصد در ۳۰ ساعت برای خشک‌کن با PCM کاهش مؤثر دارد، در حالی که خشک‌کن بدون PCM ۷۵ ساعت، در محیط باز با آفتاب مستقیم ۵۵ ساعت طول کشید. ایرانمنش و همکاران [۳] شبیه‌سازی و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی کابینتی مجهز به کلکتور لوله خالص از نوع هیت پایپ به همراه ماده تغییرفازدهنده را بررسی کردند. این آزمایش‌ها با سه سرعت جریان هوا (۰.۰۲۵، ۰.۰۵ و ۰.۰۹ کیلوگرم در ثانیه) برای سیستم خشک‌کردن با و بدون استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای خشک‌کردن برش‌های سیب با ضخامت ۵ میلی‌متر انجام شد. تجزیه و تحلیل حرارتی نشان داد که استفاده از PCM باعث افزایش انرژی گرمایی ورودی حدود ۱.۷۲ درصد و ۵.۱۲ درصد برای میزان جریان هوا به ترتیب ۰.۰۲۵ و ۰.۰۵ کیلوگرم در ثانیه شده است اما افزایش بیش از حد در جریان هوا (تا ۰.۰۵ کیلوگرم در ثانیه) انرژی گرمایی کاهش می‌یابد. ایرانمنش و برقی [۵] به طراحی و ساخت یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم کابینتی با ماده تغییرفازدهنده پرداختند و تأثیر پارامترهای ورودی و خروجی کلکتور، محفظه خشک‌کن و محیط، رطوبت داخل محفظه خشک‌کن و رطوبت محیط، شدت تابش خورشیدی بر فرایند خشک‌کردن برای دو حالت، با استفاده از PCM و بدون استفاده از PCM در سرعت‌های مختلف جریان جابه‌جایی اجباری بررسی و مقایسه شده است. نتایج آنها نشان داد که تأثیر جریان جابه‌جایی بر سرعت بخشیدن به فرایند خشک‌کردن بیش از تأثیر استفاده از مواد ذخیره‌کننده بوده است. برقی و ایرانمنش [۶] به بررسی آزمایشگاهی کاربرد مواد تغییرفازدهنده در کلکتور خورشیدی لوله گرمایی تحت خلأ برای خشک‌کردن پسته پرداختند و این نتیجه حاصل شد که با توجه به طولانی بودن روند خشک‌شدن محصول، استفاده از ماده تغییرفازدهنده راه‌حل مناسبی برای افزایش

<sup>1</sup> Azaizia<sup>2</sup> Phase change material

مدت‌زمان کارکرد خشک‌کن خورشیدی تا ۲ ساعت بعد از غروب خورشید است. الخدراوی<sup>۱</sup> و همکاران [۷] رفتار حرارتی خشک‌کن غیرمستقیم با موم پارافین به عنوان PCM مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. سیستم پیشنهادی شامل یک گرم‌کن هوای خورشیدی، یک بخاری انرژی خورشیدی با حفره مستطیلی است که با موم پارافین و محفظه خشک‌کن پر شده است. همچنین دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن در زمان تخلیه، ۴-۱۶ درجه سلسیوس، بالاتر از دمای محیط است. بنی اسدی و همکاران [۸] به بررسی تجربی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی ترکیبی با جابه‌جایی اجباری با مواد تغییرفازدهنده پارافین برای خشک‌کردن زردآلو پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش ۵۰ درصد زمان خشک‌شدن می‌گردد و بازده خشک‌کن نیز افزایش پیدا می‌کند. بهارواج<sup>۲</sup> و همکاران [۹] به بررسی تجربی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابه‌جایی اجباری با مواد تغییرفازدهنده پارافین برای خشک‌کردن گیاه دارویی (والیرینا جاتامانسی) پرداختند. مواد تغییرفازدهنده در این خشک‌کن، زمان خشک‌شدن را ۳۷/۵۰ درصد کاهش می‌دهد. مسیمی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] طراحی، تحلیل و بررسی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابه‌جایی طبیعی با کلکتور صفحه تخت از جنس چوب و ورق پلی‌کربنات برای منطقه میانه عرض جغرافیایی را انجام دادند. میوه خشک‌شده در این تحقیق، سبب می‌باشد. هدف از این تحقیق، طراحی خشک‌کن خورشیدی قابل حمل برای منطقه میانه عرض جغرافیایی است. نتایج نشان داد که رطوبت اولیه سبب که ۸۶ درصد است به رطوبت نهایی ۸۰/۱۲ درصد می‌رسد. نابین<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] به طراحی و عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی هیبریدی برای خشک‌کردن گوجه فرنگی گیلاسی پرداختند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن ۱۰۰ kg گوجه فرنگی گیلاسی با این خشک‌کن ۴ روز طول می‌کشد. این خشک‌کن برای موادی که به نور خورشید حساس هستند مناسب است. اکتاس<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] نیز به تحلیل و بررسی یک خشک‌کن خورشیدی با بازیاب حرارتی مادون قرمز<sup>۶</sup> (SHRAIRD) برای خشک‌کردن خربزه پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز، گرمای دریافتی بیشتر و زمان خشک‌کردن محصول کمتر می‌شود. علاوه بر این در این آزمایش، شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد که نتایج، شبیه‌سازی نشان داد که دمای سطح خربزه بین ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوا ۰/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. شلبی‌ویک<sup>۷</sup> [۱۳] به بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابه‌جایی اجباری<sup>۸</sup> و استفاده از مواد تغییرفازدهنده پارافین و اکس برای خشک‌کردن گیاه دارویی (خرزهره) پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده، زمان خشک‌شدن خرزهره به ۱۴ ساعت می‌رسد و همچنین استفاده کردن از مواد تغییرفازدهنده باعث بهبود عملکرد حرارتی خشک‌کن می‌شود. در این پژوهش، شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با هم‌رفت طبیعی انجام شده است. این خشک‌کن‌ها با عبور جریان طبیعی هوا بین محصولات که به‌واسطه اختلاف دما و چگالی ایجاد می‌شود، کار می‌کنند و برای شبیه‌سازی تبخیر آب موجود در مواد غذایی روش پاشش آب ارائه شده است و پارامترهای دبی جرمی و دمای صفحه جاذب بررسی شده است. نوآوری این پژوهش، دایره‌ای بودن محفظه خشک‌کن می‌باشد که شدت تابش خورشیدی به کل محفظه خشک‌کن می‌رسد و این نتیجه حاصل می‌شود که با دبی جرمی ۱۶۰ کیلوگرم بر ثانیه و دمای تقریباً ۳۵ درجه سانتی‌گراد داخل محفظه خشک‌کن خورشیدی می‌توان شرایط خشک‌کردن انواع حبوبات و سبزیجات که دمای خشک‌کردن آن‌ها کمتر از محصولات کشاورزی است را در

<sup>1</sup> El Khadraoui

<sup>2</sup> Bhardwaj

<sup>3</sup> Musembi

<sup>4</sup> Nabnean

<sup>5</sup> Aktaş

<sup>6</sup> Solar heat recovery assisted infrared dryer

<sup>7</sup> Shalaby and Bek

<sup>8</sup> Indirect solar dryer

شرایط آفتابی شهر یزد فراهم کرد بدون آن که از سوخت‌های فسیلی استفاده شود؛ بنابراین توصیه می‌شود که در فرایند رطوبت‌گیری و خشک‌کردن از دستگاه خشک‌کن خورشیدی استفاده گردد.

### شرح مسئله

مطابق شکل ۱، خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم شامل قسمت‌های زیر می‌باشد: ۱- هواگرمن خورشیدی صفحه تخت شامل شیشه، صفحه جاذب مسی ۲- محفظه خشک‌کن خورشیدی و ۳- کانال‌های رابط. مکانیزم خشک‌کن موردنظر به این صورت است که با تابش نور خورشید به هواگرمن خورشیدی صفحه تخت، پس از عبور از لایه شیشه به جاذب مس می‌رسد و سبب گرم شدن این جاذب می‌شود. با عبور جریان هوا از کانال بین ورق شیشه‌ای و جاذب در اثر جابه‌جایی هوا گرم می‌شود و چگالی هوای این صفحه کم می‌گردد و به سمت بالا حرکت می‌کند و هوای سردتر به سمت پایین حرکت می‌کند. این هوای گرم در نهایت به سمت محفظه خشک‌کن حرکت می‌کند و از خروجی آن خارج می‌شود که در بین راه رطوبت موجود در محفظه خشک‌کن را کاهش می‌دهد. زمانی که سیال گرم شود، چگالی آن با دما تغییر می‌کند و این خود باعث القای جریان می‌شود که به این جریان، جابه‌جایی طبیعی گفته می‌شود. توان ناشی از شناوری در جابه‌جایی طبیعی را به‌وسیله عدد رایلی اندازه می‌گیرند [۱۴].

$$R_a = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (1)$$

$g$  شتاب جاذبه،  $\Delta T$  اختلاف دمای سطح و دمای محیط اطراف،  $L$  طول مشخصه،  $\alpha$  ضریب نفوذ گرمایی،  $\nu$  لزجت سینماتیکی و  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{-1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \quad (3)$$

$\alpha$  نفوذ گرمایی و  $K$  ضریب انتقال حرارت و  $C_p$  ظرفیت گرمایی در فشار ثابت است. اعداد رایلی کمتر از  $10^8$  نشان‌دهنده جریان طبیعی و عدد رایلی بالاتر از  $10^{10}$  بیانگر جریان آشفته است و در این شرایط شاهد جریان آشفته هستیم.

برای مدل‌سازی عددی سامانه خشک‌کن شامل کابینت از روش CFD استفاده گردید که براساس سه معادله کلی مطالعه می‌شود. این معادلات عبارتند از: معادله پیوستگی، معادلات مومنوم در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، معادله انرژی. معادله پیوستگی و معادلات مومنوم به‌ترتیب با روابط ۴ و ۵ نمایش داده می‌شوند [۴؛ ۳]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (4)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \rho g Z$$

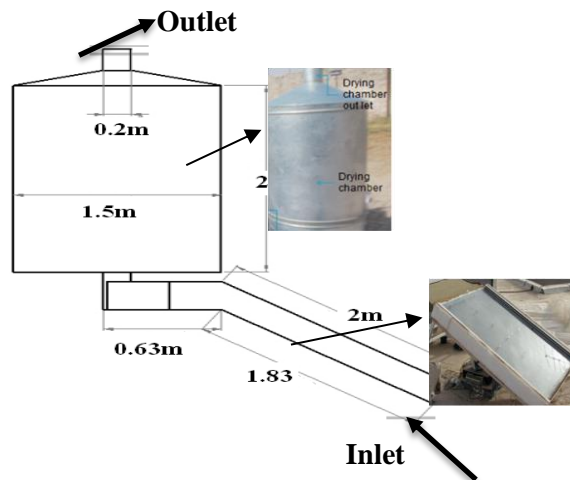
که در آن  $\rho$  چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )،  $p$  فشار در خروجی ( $\text{N/m}^2$ )،  $\mu$  ویسکوزیته ( $\text{N.s/m}^2$ )،  $g$  شتاب ثقل ( $\text{m/s}^2$ )،  $Z$  اختلاف ارتفاع ( $\text{m}$ )،  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب نشان‌دهنده سرعت سیال در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشد. معادله انرژی به صورت رابطه ۶ لحاظ می‌گردد:

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c_p w \frac{\partial T}{\partial z} = K \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (6)$$

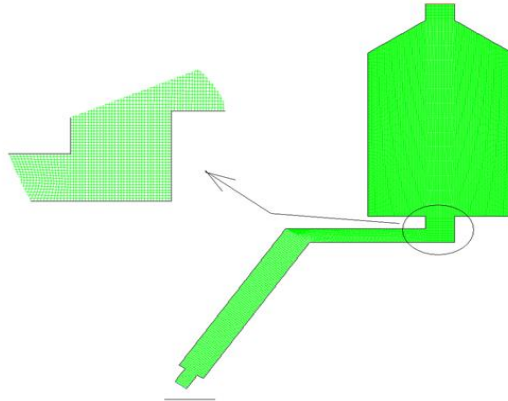
### هندسه مسئله و شبکه‌بندی

در این پژوهش هندسه خشک‌کن در نرم‌افزار کتیا رسم و سپس با نرم‌افزار ۲.۴.۶ GAMBIT شبکه‌بندی شده است که برای این کار از شبکه با سازمان استفاده شده است. تعداد گره‌ها با انتخاب شبکه‌های مختلف از درشت تا ریز سرانجام به گونه‌ای انتخاب شده است تا حل معادلات مستقل از شبکه شود. برای شبیه‌سازی هندسه موردنظر از نرم‌افزار ۶.۳.۲۶ ANSYS Fluent استفاده شده است.

هندسه در نظر گرفته شده شامل یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم غیرفعال است که جریان هم‌رفت طبیعی بر اثر تغییرات دما و چگالی هوا در آن جریان پیدا کرده است.



شکل ۱. طرح‌واره هندسه دوبعدی خشک‌کن خورشیدی مورد مطالعه.



شکل ۲. شبکه با سازمان خشک کن دوبعدی.

بهبودسازی تعداد مش و مشخص کردن میزان ریز بودن شبکه، اهمیت بسیاری دارد. در این مرحله از پژوهش، مشی باید انتخاب شود که هم خشک کن غیرمستقیم مورد نظر به طور صحیح مدل شود و نتایج قابل اطمینان باشد و هم حجم محاسبات در کمترین میزان خود باشد. بدین منظور در تعداد مش‌های متفاوت، علاوه بر پارامتر سرعت، پارامتر دما در نقاطی در وسط محفظه خشک کن بررسی شد. سرانجام برای ادامه بررسی‌ها طبق شبکه‌ای با  $460.3$  گره انتخاب شد که پروفیل دما بسیار نزدیک به شبیه‌سازی دمای داخل محفظه خشک کن می‌باشد. این موضوع در این پژوهش طبق جدول ۱ انجام گرفته و شبکه مناسب انتخاب شده است.

جدول ۱. انتخاب شبکه مناسب برای حل.

| تعداد گره | سرعت در ورودی (m/s) | سرعت در خروجی (m/s) | دبی جرمی (kg/s) |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------------|
| ۳۱۳۰۰     | ۰/۷۹۳               | ۰/۴۰۱               | ۰/۱۶۰           |
| ۴۶۰۰۳     | ۰/۸۲                | ۰/۴۳                | ۰/۱۶۱           |
| ۶۷۹۰۳     | ۰/۸۳                | ۰/۴۳۵               | ۰/۱۶۲           |

### اعمال شرایط مرزی

شرایط مرزی در محل ورودی و محل خروجی از نوع فشار ورودی و خروجی<sup>۱</sup> انتخاب گردید و شار تابشی معادل  $40 \frac{W}{m^2}$  روی شیشه اعمال شد. البته با در نظر گرفتن ضریب عبور شیشه و سایر ضرایب مقدار  $114$  وات به‌ازای هر مترمربع سرانجام وارد حجم کنترل می‌گردد. سطح زیر کلکتور و دیواره‌های خشک کن عایق در نظر گرفته شد. از آنجایی که عدد رایلی در کلکتور خیلی از  $10^9$  بیشتر می‌باشد رژیم جریان مغشوش انتخاب گردید و مدل K-epsilon استاندارد استفاده شد. مدل K-epsilon استاندارد یک مدل نیمه تجربی براساس معادلات انتقال مدل برای انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اتلاف آن (ε) است. انرژی جنبشی متلاطم، k و نرخ اتلاف آن ε، از طریق روابط انتقال (۷) و (۸) به‌دست

<sup>1</sup> Pressure inlet and pressure outlet

می‌آید. چون اهمیت انتقال حرارت تشعشی در این پژوهش زیاد می‌باشد بخش تشعشع نرم‌افزار نیز فعال و از مدل DO<sup>۱</sup> استفاده شده است.

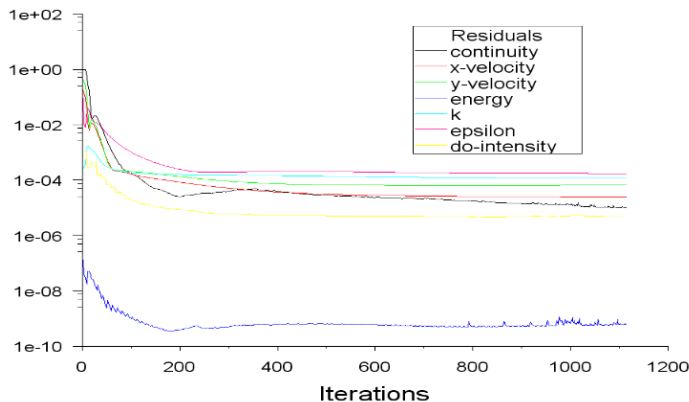
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M - S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

که در آن  $G_k$  انرژی جنبشی تولیدی در جریان مغشوش به دلیل گرادیان سرعت،  $G_b$  انرژی جنبشی تولیدی به دلیل تغییر شرایط،  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  پارامترهای اضافی برای  $k$  و  $\varepsilon$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  اعداد پراوتل برای  $k$  و  $\varepsilon$ ،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$ ،  $C_{3\varepsilon}$  ثابت‌های معادله جریان مغشوش،  $u_i$  میانگین سرعت سیال می‌باشند.

### بررسی و تحلیل نتایج

با اجرای برنامه، نحوه همگرایی و رسیدن به دقت تعیین شده  $10^{-5}$  طبق شکل ۳ می‌باشد و پس از رسیدن به دقت تعیین شده، دبی جرمی هوای عبوری از خشک‌کن خورشیدی  $0.16 \frac{kg}{s}$  و نرخ انتقال حرارت کل و تشعشی در قسمت‌های مختلف لحاظ شده است.

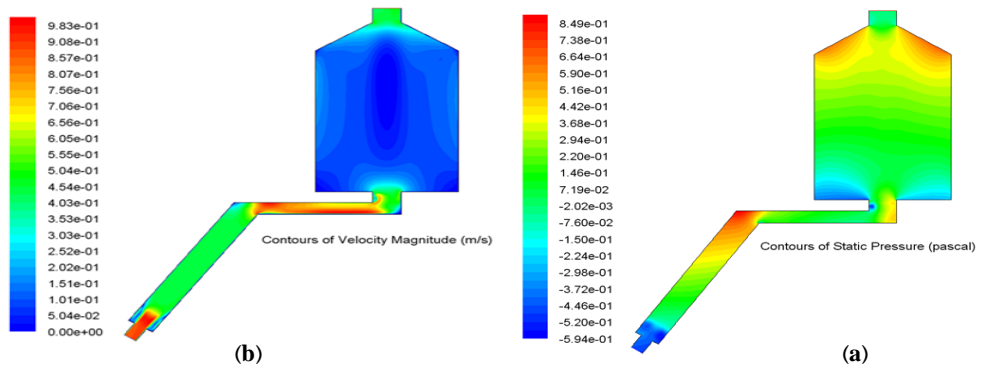


شکل ۳. نمودار همگرایی در حین حل به روش تکرار.

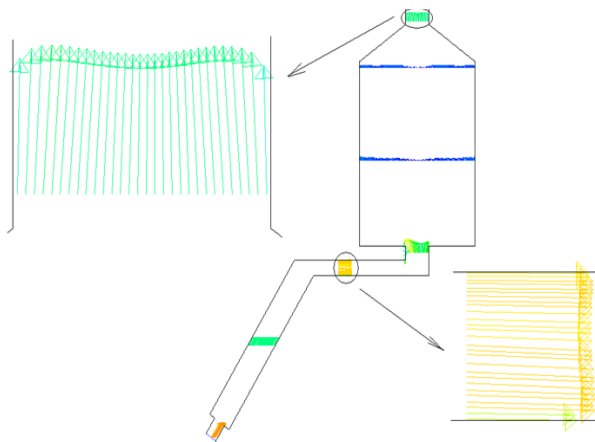
در شکل ۴ (a) کانتور فشار مشاهده می‌شود. مطابق شکل در محلهایی از خشک‌کن خورشیدی که سرعت بالایی وجود دارد پس فشار پایین می‌باشد و برعکس این قضیه هم وجود دارد. در شکل ۴ (b) کانتور سرعت‌های ایجاد شده در قسمت‌های مختلف دستگاه خشک‌کن خورشیدی مشاهده می‌گردد که حداکثر آن  $0.983$  متر بر ثانیه در قسمت ورودی هواگرم‌کن و در ناحیه ورودی به محفظه خشک‌کن خورشیدی به علت تغییرات سرعت ایجاد شده، گردابه تولید خواهد شد. چون در جریان متلاطم شیب در نزدیک صفحه بیشتر از شیب در نزدیک صفحه در جریان آرام است به دلیل اینکه در جریان آرام فقط تنش برشی ویسکوز داریم ولی در جریان متلاطم هم تنش ویسکوز و هم تنش رینولدز داریم؛ بنابراین باید پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف به صورت تخت باشد که در شکل ۵ این نتیجه به‌خوبی مشاهده

<sup>1</sup> Discrete ordinate

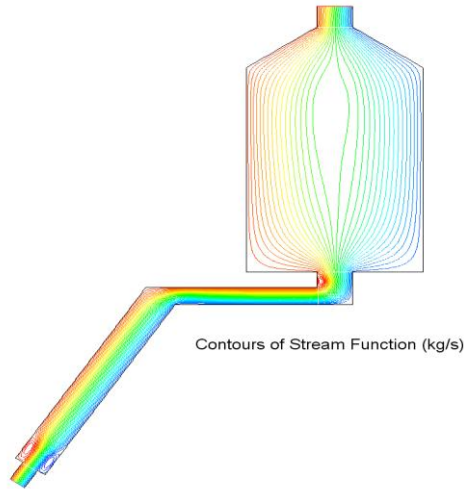
می‌شود. در شکل ۶ کانتور خطوط جریان در کلکتور خورشیدی و محفظه خشک‌کن قابل مشاهده است و همچنین مشاهده می‌شود که نزدیک به صفحه جاذب، دمای بیشتری داریم؛ زیرا صفحه جاذب و شدت تابش خورشیدی، رابطه مستقیمی دارند و بعد از صفحه جاذب، دما کمتر می‌شود.



شکل ۴. (a) کانتور فشار و (b) کانتور سرعت در خشک‌کن خورشیدی.

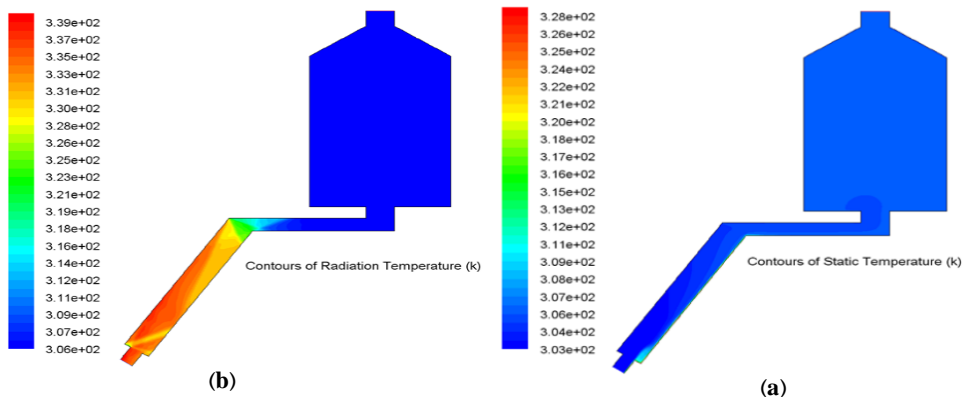


شکل ۵. نمایش بردارهای سرعت در محل‌های مختلف دستگاه خشک‌کن خورشیدی.



شکل ۶. خطوط جریان سیال عبوری از داخل خشک‌کن.

کانتور دما در شکل ۷ (a) ارائه شده است که بیشترین مقدار دما ۳۲۸ کلوین می‌باشد و در روی سطح جاذب می‌باشد؛ چون صفحه جاذب مثل یک جسم سیاه رفتار می‌کند و دارای بیشترین ضریب جذب و کمترین ضریب صدور است، همچنین کانتور دمای تشعشعی در شکل ۷ (b) آورده شده است که در قسمت‌های کلکتور به علت عبور امواج تابشی خورشید بالا می‌باشد؛ زیرا مغشوش بودن جریان در داخل ناحیه محاسباتی محرز می‌گردد.



شکل ۷. (a) کانتور دمای استاتیک و (b) کانتور دمای تشعشعی در خشک‌کن خورشیدی.

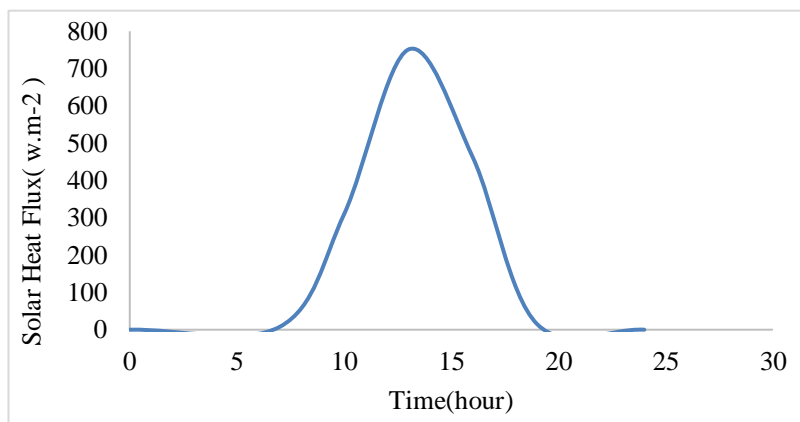
برای آنکه عملکرد حرارتی دستگاه بررسی شود برای اولین روز تابستان در ساعت‌های مختلف روز، متوسط شار تابش خورشید روی سطح شیشه اعمال گردید. مطابق جدول ۲ و دمایی که روی صفحه مسی (صفحه جاذب) حاصل شده در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است نتیجه‌ای که حاصل شد این حقیقت را بیان می‌کند که افزایش دما و سایر کارایی

خشک کن خورشیدی، ارتباط مستقیم با میزان تابش خورشید دارد. از طرفی افزایش دما و دبی جرمی هوا در داخل خشک کن خورشیدی در حدی می باشد که بتوان عمل رطوبت گیری و خشک کردن را انجام داد.

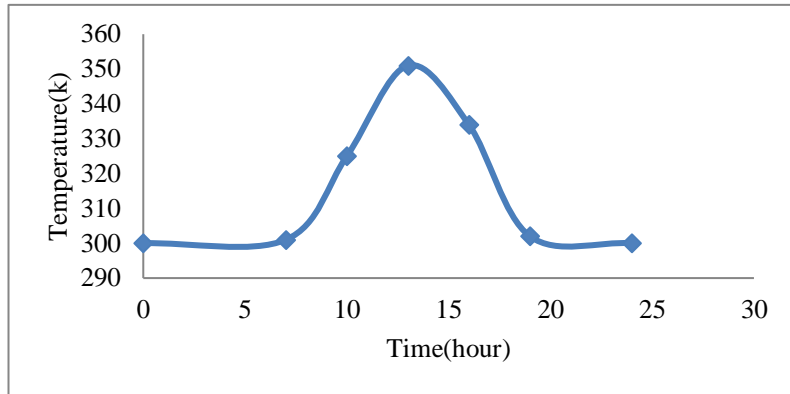
جدول ۲. دمای متوسط صفحه جاذب براساس شدت تابش خورشیدی.

| زمان (s) | دمای متوسط صفحه جاذب مسی (دیوار تابشی) (K) | شدت تابش خورشیدی ( $W/m^2$ ) |
|----------|--|------------------------------|
| ۷        | ۳۰۱  | ۷۸                           |
| ۱۰       | ۳۲۵  | ۳۱۰                          |
| ۱۳       | ۳۵۱  | ۷۵۱                          |
| ۱۶       | ۳۳۴  | ۴۶۲                          |
| ۱۹       | ۳۰۲  | ۱۵                           |

مطابق شکل ۸ خشک کن خورشیدی در میانه روز حدود ساعت ۱۳ بهترین کارایی را دارد و در این ساعت بیشترین دبی جرمی هوای عبوری را داریم. اطلاعات شدت تابش خورشیدی مربوط به شرایط جغرافیایی شهر یزد از نرم افزار Meteonorm استخراج شده است [۱۵].

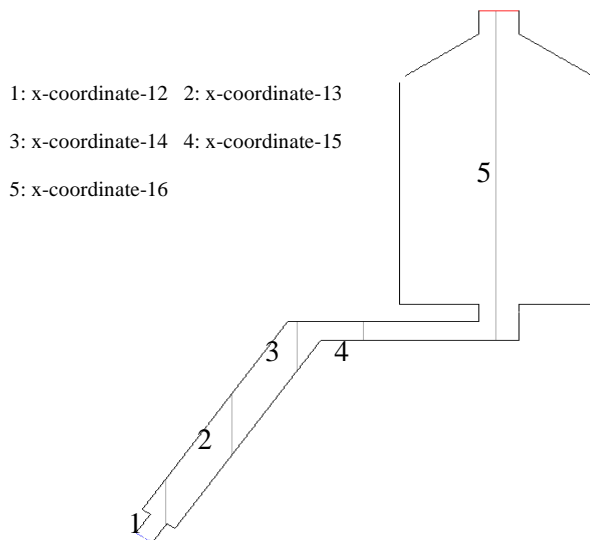


شکل ۸. تابش ساعت های مختلف روز اول تابستان در شهر یزد.

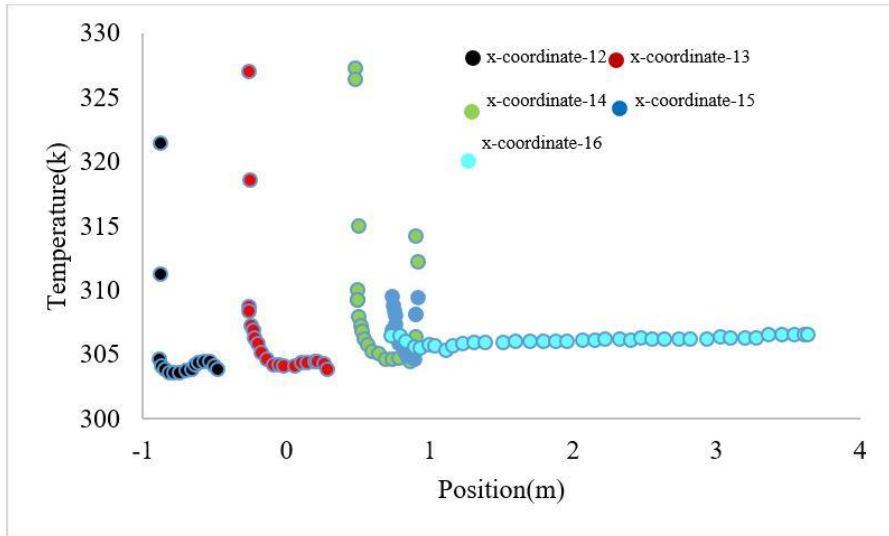


شکل ۹. دمای صفحه جاذب استخراج شده از نرم‌افزار در ساعات مختلف روز اول تابستان در شهر یزد.

برای آن که اطلاعات بیشتری از دستگاه خشک‌کن به دست آید، تعدادی خطوط قائم مطابق شکل ۱۰ تعریف می‌کنیم و در امتداد این خطوط، کمیت‌های مختلف بررسی می‌شود. خطوط قائم را در Xهای مختلف در نظر می‌گیریم. در شکل ۱۱ دما در امتداد این خطوط مشاهده می‌گردد. ابتدای این خطوط که روی صفحه جاذب قرار دارند دمای بالاتری دارد و انتهای آن‌ها که به شیشه وصل است دمای پایینی دارند.



شکل ۱۰. در نظر گرفتن خطوط قائم در داخل ناحیه محاسباتی.

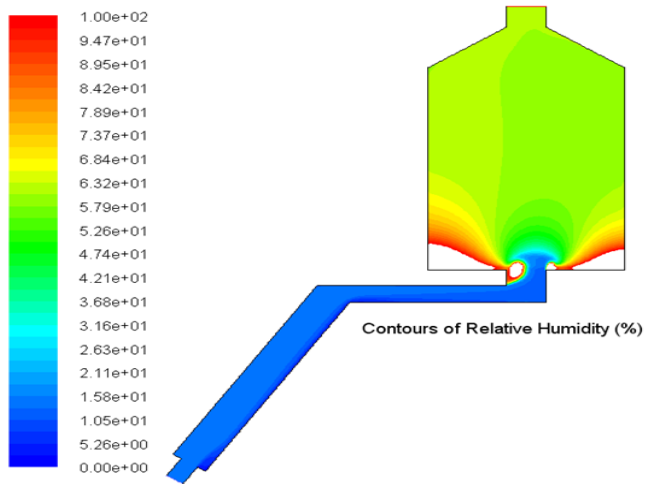


شکل ۱۱. توزیع دما در امتداد خطوط قائم در xهای مختلف.

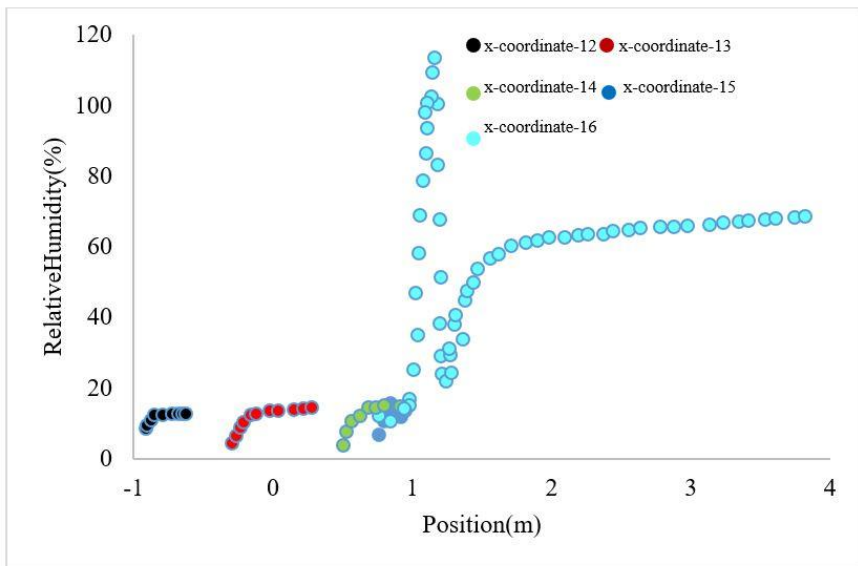
فرایند رطوبت‌زدایی و خشک‌کردن در صنعت کاربرد زیادی دارد و مستلزم انرژی زیادی می‌باشد. برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌توان از شدت تابش خورشید برای این کار استفاده کرد. در شکل ۱۳ در مسیر حرکت هوای خشک و گرم، آب به میزان  $0.001$  کیلوگرم بر ثانیه که طبق شکل ۱۲ پاشیده می‌شود، ملاحظه می‌گردد که آب بلافاصله تبخیر می‌شود به طوری که رطوبت نسبی افزایش می‌یابد اما به جز در محل پاشش در سایر جاها پایین است و در محل خروجی حدود  $60\%$  درصد می‌باشد یعنی به حالت اشباع نمی‌رسد؛ بنابراین در شکل ۱۴ این نتیجه حاصل می‌شود که دستگاه قدرت دارد در هر ساعت حدود  $3/6$  لیتر یا کیلوگرم آب را از دستگاه خارج کند؛ بنابراین خشک‌کردن میوه‌های آبدار نیز امکان‌پذیر می‌باشد. طبق شکل ۱۵ دما بعد از فرایند تبخیر آب کاهش می‌یابد؛ زیرا پدیده تبخیر یک پدیده گرماگیر است. برای یک روز تابستانی اگر طول روز را  $8$  ساعت در نظر بگیریم دستگاه قادر است  $8 \times 3/6 = 28/8$  کیلوگرم آب را تبخیر و از دستگاه خارج کند. اگر میوه‌ای نظیر توت  $50\%$  درصد آن آب باشد در طول یک روز می‌توانیم حدود  $60$  کیلوگرم توت تر را خشک کنیم. برای آنکه بتوانیم مقدار بیشتری میوه را خشک کنیم باید دستگاه در ابعاد بزرگ‌تری ساخته شود یا آنکه چندین دستگاه در کنار هم قرار داده شود تا توان خشک‌کردن افزایش یابد.

| Mass Flow Rate | (kg/s)        |
|----------------|---------------|
| in             | 0.18563625    |
| out            | -0.18663627   |
| Net            | -0.0010000239 |

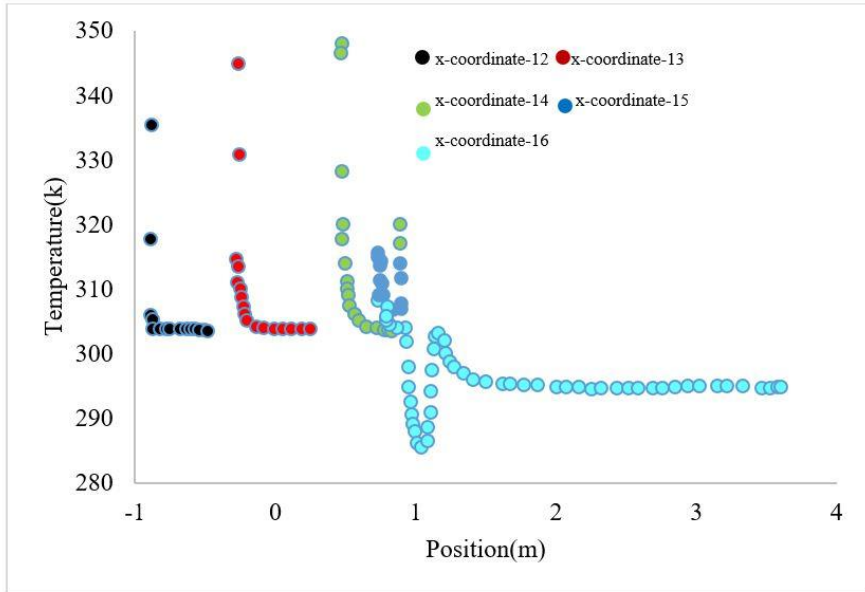
شکل ۱۲. میزان پاشش آب معادل  $0.001$  کیلوگرم بر ثانیه.



شکل ۱۳. کانتور رطوبت نسبی در داخل خشک‌کن هم‌زمان با تبخیر آب.



شکل ۱۴. رطوبت نسبی در محل‌های مختلف دستگاه خشک‌کن خورشیدی.



شکل ۱۵. دمای استاتیک در محل‌های مختلف دستگاه خشک‌کن خورشیدی.

شبیه‌سازی انجام شده برای زمانی است که محصول در خشک‌کن قرار ندارد؛ بنابراین بحث انتقال جرم در نظر گرفته نشده است. اگر میوه‌ها داخل خشک‌کن قرار داشت به دلیل وجود دیفیوژن و رطوبت، الگوی جریان حرارت تغییر می‌کرد. زمانی که هوای گرم از روی یک جسم مرطوب عبور می‌کند گرما به سطح آن منتقل می‌شود و گرمای نهان تبخیر باعث بخار شدن آب می‌گردد. بخار آب در فیلم نازکی از هوا پخش می‌شود و با حرکت هوا به خارج از سطح جسم هدایت می‌شود. این واقعه باعث به‌وجود آمدن فشار بخار کمتر در سطح جسم می‌شود و یک گرادیان فشار بخار در سطح جسم و رطوبت داخلی آن به‌وجود می‌آید. این گرادیان به‌منزله یک نیروی جلو برنده برای حذف آب از جسم عمل می‌کند. آب با مکانیزم‌های زیر به سطح می‌آید:

- ۱- نیروی موینگی
  - ۲- پخش مایعات به سبب اختلاف غلظت در نقاط مختلف جامد
  - ۳- پخش مایعات در لایه‌های سطحی جامدات
- قانون دوم فیک مطابق رابطه زیر به‌طور وسیعی به‌منظور توصیف فرایند خشک کردن برای بیشتر مواد بیولوژیکی استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_l (\nabla M)] \quad (9)$$

که در آن:

$D_l$ : ضریب نفوذ رطوبت موثر  $m^2/s$

$M$ : محتوی رطوبت  $kg \text{ water}/kg \text{ dry solid}$

$T$ : زمان  $s$

ضريب نفوذ با استفاده از داده‌هاى تجربى تعيين مى‌شود. فرض اصلى در تعيين اين پارامتر اين است كه خشك‌كردن فقط به انتقال جرم محدود مى‌گردد و نيز فرايند خشك‌كردن به‌صورت هم‌دما در تمام نمونه انجام مى‌شود.

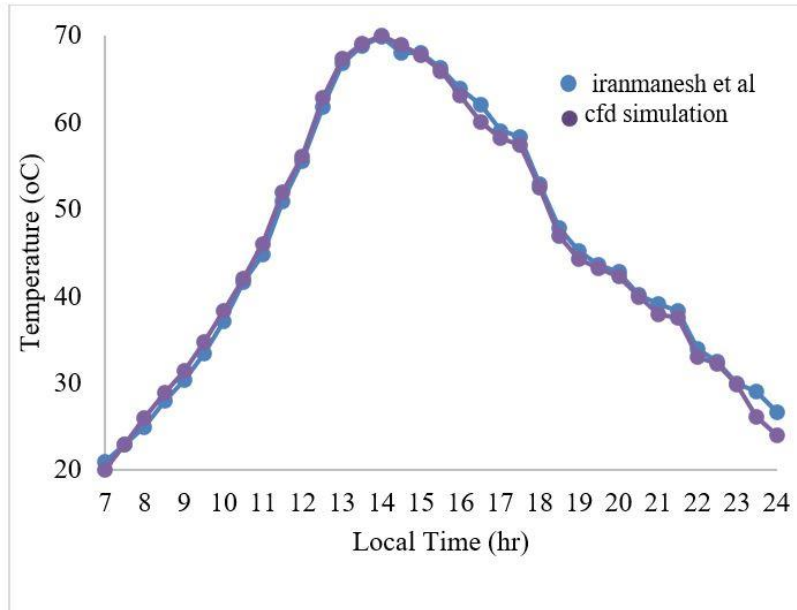
### اعتبارسنجى

براي اطمينان از داده‌هاى استخراج شده از نتايج نرم‌افزار در پژوهش حاضر براي خشك‌كن موردنظر، اعتبارسنجى محفظه خشك‌كن با مقاله ايرانمنش و همكاران [۳] صورت گرفت. خصوصيات مش ايجاد شده براي محفظه خشك‌كن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. خصوصيات مش ايجاد شده براي محفظه خشك‌كن.

| ويژگى               | كيفيت يا مقدار |
|---------------------|----------------|
| نوع مش              | ريز            |
| حداقل اندازه        | ۰/۰۰۰۱ متر     |
| حداكثر اندازه       | ۰/۰۰۱ متر      |
| تعداد گره           | ۲۳۱۶۵۴         |
| تعداد المان         | ۹۷۳۴۵۲         |
| حداقل زاويه         | ۱۸/۲ درجه      |
| حداكثر زاويه        | ۱۴۰ درجه       |
| Pinch tolerance     | ۰/۰۰۱۲         |
| Inflation algorithm | Pre            |
| Mesh metric         | چولگى          |
| انحراف معيار        | ۰/۱۷۲۳         |

در شكل ۱۶ تغييرات دماى خروجى محفظه خشك‌كن نشان داده مى‌شود. طبق شبيهه‌سازى انجام شده و اعتبارسنجى صورت گرفته، درصد خطا كمتر از ۲ درصد مى‌باشد.



شکل ۱۶. تغییرات دمای خروجی محفظه خشک‌کن.

### نتیجه گیری

به منظور فراهم کردن سامانه‌ای برای خشک کردن بهینه محصولات کشاورزی کم‌حجم و با ارزش اقتصادی بالا، خشک‌کن‌های خورشیدی ساخته شد تا با ایجاد جریان هوای بسته، ضمن صرفه‌جویی در مصرف انرژی فسیلی، کیفیت محصول خشک‌شده نیز افزایش یابد. با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: این نتیجه حاصل می‌شود که با دبی جرمی ۰/۱۶ کیلوگرم بر ثانیه و دمای تقریباً ۳۵ درجه سانتی‌گراد داخل محفظه خشک‌کن خورشیدی می‌توان شرایط خشک کردن انواع حبوبات و سبزیجات که دمای خشک کردن آن‌ها کمتر از محصولات کشاورزی است را در شرایط آفتابی شهر یزد فراهم کرد بدون آن‌که از سوخت‌های فسیلی استفاده شود؛ بنابراین توصیه می‌شود که در فرایند رطوبت‌گیری و خشک کردن از دستگاه خشک‌کن خورشیدی استفاده گردد. دستگاه مورد نظر قدرت دارد در هر ساعت حدود ۳/۶ لیتر یا کیلوگرم آب را از دستگاه خارج کند؛ بنابراین خشک کردن میوه‌های آبدار نیز امکان‌پذیر می‌باشد؛ زیرا دمای داخل محفظه خشک‌کن خورشیدی پس از فرایند تبخیر آب کاهش می‌یابد.

### References

- [1] Barghi Jahromi, M., Kalantar, V., & Abdolrezaie, M. (2020). Experimental Study of Effect of Storage Phase Change Materials (PCM) on the Function of a Passive Solar Ventilator. *Modares Mechanical Engineering*, 20(7), 1709-1717. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-38118-en.html><http://mme.modares.ac.ir/article-15-38118-en.pdf>
- [2] Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., & Kalbasi Ashtari, A. (2017). Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 75(12), 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.056>

- [3] Iranmanesh, M., Samimi Akhijahani, H., & Barghi Jahromi, M. S. (2020). CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*, 145(2), 1192-1213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>
- [4] Azaizia, Z., Kooli, S., Hamdi, I., Elkhal, W., & Guizani, A. A. (2020). Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper. *Renewable Energy*, 145, 1972-1984. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.055>
- [5] Iranmanesh, M., & Barghi Jahromi, M. S. (2019). Effect of Forced Convection and PCM Materials on an Indirect Solar Dryer Equipped with Evacuated Heat Pipe Collector. *Modares Mechanical Engineering*, 19(11), 2607-2614. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-25587-en.html><http://mme.modares.ac.ir/article-15-25587-en.pdf>
- [6] Barghi Jahromi, M. S., & Iranmanesh, M. (2019). Experimental Investigation on the Use of PCM in a Pistachio Solar Dryer by the Evacuated Heat Pipe solar Collector. *Journal of Pistachio Science and Technology*, 3(6), 73-87. [http://pistachio.vru.ac.ir/article\\_102651\\_e2a47af5dd81a9a6d57d747a21c1b79b.pdf](http://pistachio.vru.ac.ir/article_102651_e2a47af5dd81a9a6d57d747a21c1b79b.pdf)
- [7] El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of Cleaner Production*, 148, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149>
- [8] Baniasadi, E., Ranjbar, S., & Boostanipour, O. (2017). Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 112, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.043>
- [9] Bhardwaj, A. K., Chauhan, R., Kumar, R., Sethi, M., & Rana, A. (2017). Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb). *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 302-314. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.07.009>
- [10] Musembi, M. N., Kiptoo, K. S., & Yuichi, N. (2016). Design and Analysis of Solar Dryer for Mid-Latitude Region. *Energy Procedia*, 100, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.145>
- [11] Nabnean, S., Janjai, S., Thepa, S., Sudaprasert, K., Songprakorp, R., & Bala, B. K. (2016). Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. *Renewable Energy*, 94, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.013>
- [12] Aktaş, M., Şevik, S., Amini, A., & Khanlari, A. (2016). Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Solar Energy*, 137, 500-515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>
- [13] Shalaby, S., & Bek, M. (2015). Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 176-180. <http://jocet.org/papers/191-R035.pdf>
- [14] Fluent, I. (2006). *Fluent 6.3 Users Guide (2006)*. Fluent, INC. <https://romeo.univ-reims.fr/documents/fluent/fluentUserGuide.pdf>
- [15] Barghi Jahromi, M. S., Iranmanesh, M., & Samimi akhijahani, H. (2021). Thermo-Economic evaluation of a solar dryer with evacuated heat pipe collector and energy storage. *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 32(1), 39-58. <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56640.0>

## فهرست علائم

| فهرست نمادها<br>nomenclature  |                |                        |
|---|----------------|------------------------|
| شرح<br>Explanation  | نماد<br>Symbol | واحد<br>Unit           |
| شتاب گرانشی<br>Gravitational acceleration                                     | $g$            | $\frac{m}{s^2}$        |
| اختلاف دما<br>Temperature difference  | $\Delta T$     | $K$                    |
| طول مشخصه<br>Characteristic length  | $L$            | $m$                    |
| ضریب نفوذ گرمایی<br>Thermal diffusivity coefficient                           | $\alpha$       | $\frac{m^2}{s}$        |
| لزجت سینماتیکی<br>Kinematic viscosity   | $\nu$          | $\frac{m^2}{s}$        |
| ضریب انبساط حجمی<br>Volume expansion coefficient                              | $\beta$        | $\frac{1}{^\circ C}$   |
| ضریب انتقال حرارت<br>Thermal conductivity coefficient                         | $K$            | $\frac{w}{m^2 k}$      |
| ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت<br>Specific heat capacity at constant pressure | $C_p$          | $\frac{j}{kg \cdot k}$ |
| ضریب نفوذ رطوبت موثر<br>Effective moisture diffusivity coefficient            |                |                        |
| محتوی رطوبت<br>Moisture content   | Dl             | $\frac{m^2}{s}$        |
| زمان<br>Time  | M              | -                      |
|   | T              | S                      |