

## شبیه‌سازی جریان هوا در داخل خشک‌کن‌های خورشیدی گلخانه‌ای برای اقلیم منطقه اصفهان

محمد باقر حیدری وزنامخواستی<sup>۱</sup> و حسن غفوری ورزنده<sup>۲\*</sup>

### چکیده

خشک‌کردن گلخانه‌ای یکی از انواع روش‌های خشک کردن است که توانایی خشک کردن مقدار زیادی از محصولات کشاورزی را به صورت یکجا دارد. در تمام مدل‌های خشک‌کن گلخانه‌ای از انرژی تابشی خورشید استفاده می‌گردد. خشک‌کن‌های گلخانه‌ای از نظر شکل ظاهری کاملاً شبیه گلخانه هستند که هوای داخل آن توسط انرژی تابشی خورشیدی گرم شده و مواد خشک شدنی در داخل آن خشک می‌شوند. با توجه به اینکه بخش وسیعی از استان اصفهان را اقلیم خشک در بر گرفته و دارای ۳۰۰ روز آفتابی در سال است، پتانسیل بالایی برای استفاده از این نوع خشک‌کن در استان اصفهان وجود دارد. عمل خشک کردن در این خشک‌کن‌ها بستگی به ویژگی‌های جریان هوا و هندسه محفظه خشک‌کن دارد. لذا هدف از این تحقیق، پیش‌بینی رفتار جریان هوای داخل محفظه انواع خشک‌کن گلخانه‌ای با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای اقلیم اصفهان است. به همین منظور، اثر شدت تابش نور خورشید و هندسه بیرونی خشک‌کن روی سرعت، دما و فشار هوای داخل محفظه، توسط نرم‌افزار Ansys Fluent 18 بررسی گردید. در این تحقیق، چهار نوع هندسه رایج برای خشک‌کن گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. این چهار نوع هندسه به ترتیب شامل گلخانه با سقف محدب، گلخانه با سقف شیب‌دار یک‌طرفه، گلخانه با سقف شیب‌دار دوطرفه و گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی است. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی از طریق مقایسه با نتایج تجربی به دست آمده از سایر محققین انجام گرفت. نتایج نشان داد که گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی بهترین عملکرد را در یکنواختی سرعت جریان هوا در داخل خشک‌کن داشت. همچنین بهترین عملکرد در توزیع یکنواخت دمای هوای داخل خشک‌کن، مربوط به گلخانه با سقف شیب‌دار دوطرفه و گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی بود. کمترین فشار هوای داخل محفظه خشک‌کن مربوط به گلخانه با سقف محدب بود.

**واژه‌های کلیدی:** جریان هوا، خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی، دینامیک سیالات محاسباتی، شدت تابش خورشید، محصولات کشاورزی.

**ارجاع:** حیدری وزنامخواستی م. ب. و غفوری ورزنده ح. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی جریان هوا در داخل خشک‌کن‌های خورشیدی گلخانه‌ای برای اقلیم منطقه اصفهان. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۵: ۲۰-۱۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10164.564>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان.  
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [hasangh28@gmail.com](mailto:hasangh28@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۶

## مقدمه

خشک‌کن‌های گلخانه‌ای تقریباً ۴۰٪ زمان لازم برای خشک شدن در معرض آفتاب بوده است و محل قرارگیری ورودی هوای خشک‌کن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد خشک شدن محصولات در حال خشک شدن دارد (Etim *et al.*, 2020).

در تحقیقی با هدف بررسی انواع خشک‌کن‌های خورشیدی بر اساس مشخصات محصول خشک شده و جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی، مشخص شد که کارایی خشک‌کن خورشیدی و میزان خشک کردن عمدتاً به درجه حرارت و سرعت هوا بستگی دارد و عواملی مانند نوع محصول، میزان رطوبت اولیه و جرم کل محصول در درجه بعدی قرار دارند (Kumar & Singh, 2020).

دانستن نحوه توزیع دما در داخل خشک‌کن‌های گلخانه‌ای خورشیدی به اصلاح ساختار گلخانه و طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع آن کمک می‌کند. این کار مستلزم توصیف و مدل‌سازی فرآیندهای انتقال حرارت در خشک‌کن‌های گلخانه‌ای خورشیدی است (Boulard & Wang, 2002).

فشار داخل گلخانه نیز از عوامل مهم در خشک کردن است. با کاهش فشار داخل گلخانه، می‌توان زمان و دمای خشک‌کن را پائین آورد و این امر در مواد غذایی حساس به حرارت حائز اهمیت است و آثار تخریبی حرارت را بر روی مواد غذایی کاهش می‌دهد (Bala & Janjai, 2013). تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی کیفیت محصول و طراحی خشک‌کن‌های گلخانه‌ای خورشیدی بیشتر از طریق مدل‌سازی ریاضی انجام شده است. محققین برای مدل‌سازی ریاضی خشک‌کن خورشیدی سه روش مدل‌های مکانیکی، مدل‌های تجربی و مدل‌های دینامیک سیالات عددی یا محاسباتی (CFD) را استفاده کرده‌اند (Bala & Janjai, 2013).

در تحقیقی که به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی توزیع دقیق مکانی و زمانی محتوای رطوبت محصول و بررسی مکانیسم‌ها و پارامترهای مؤثر در خشک کردن خورشیدی انجام شد، نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای با مقادیر تجربی مطابقت داشته است (Bekkioui *et al.*, 2020).

تحقیقات CFD روی خشک‌کن گلخانه‌ای به روش جابجایی اجباری و جابجایی طبیعی نشان داد که تنوع در ضخامت بستر مواد و دبی جریان هوا از عوامل مهم در عملکرد خشک‌کن است. همچنین دمای داخل خشک‌کن

با توجه به اینکه محیط‌های آبی و مرطوب زمینه‌ی مناسب را برای رشد و گسترش انواع آلودگی‌ها فراهم می‌کنند و کاهش رطوبت موجب حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و افزایش طول عمر مواد غذایی می‌گردد، لذا از خشک کردن برای نگهداری محصولات غذایی استفاده می‌شود. یکی از منابع انرژی برای خشک کردن، انرژی خورشیدی است. در مناطقی که تابش خورشید از شدت مناسبی برخوردار است، خشک‌کن‌های خورشیدی بیشتر مورد توجه واقع شده‌اند. فلات مرکزی کشور ایران، به عنوان یک اقلیم گرم و خشک، دارای شدت تابش خورشیدی مناسبی بوده و پتانسیل خوبی در استفاده از این انرژی، برای خشک کردن محصولات دارد. نوعی از این خشک‌کن‌ها وجود دارد که به خشک‌کن‌های گلخانه‌ای معروف اند و نمونه‌ای از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این خشک‌کن‌ها از نظر هندسه مانند گلخانه هستند و هوای داخلی آنها توسط تابش خورشید گرم می‌گردد.



شکل ۱- نمونه‌ای از یک خشک‌کن گلخانه‌ای

از عوامل مؤثر بر کیفیت محصول خشک شده، زمان خشک شدن و میزان حرارت داده شده به محصول است. هر چه زمان خشک شدن، کوتاه‌تر باشد کیفیت محصول بهتر است. از طرفی هر چه اختلاف دمای بین منبع تولید حرارت و ماده غذایی بیشتر باشد، میزان انتقال حرارت به ماده غذایی افزایش می‌یابد و موجب بالا رفتن سرعت خشک شدن می‌گردد. از طرفی میزان حرارت نباید از حد مجاز بیشتر باشد، زیرا موجب سفت شدن پوسته خارجی محصول می‌گردد (Tomar *et al.*, 2017).

توزیع نامناسب دما در داخل خشک‌کن، نه تنها باعث عدم یکنواختی در خشک کردن می‌شود بلکه باعث ایجاد آفات و بیماری‌ها نیز می‌گردد (Baxevanou *et al.*, 2010).

بررسی عملکرد خشک‌کن‌های گلخانه‌ای در خشک کردن طبیعی میوه نشان داد که زمان خشک شدن در

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به بررسی عوامل موثر بر خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی پرداخته شده است. از آنجایی که بررسی تجربی انواع هندسه‌های موجود خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی در مقیاس واقعی منوط به احداث چندین گلخانه با اشکال مختلف است و این کار مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است، از روش شبیه‌سازی به عنوان روش جایگزین برای پیش‌بینی رفتار این خشک‌کن‌ها استفاده شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS fluent 18 انجام شد. هندسه مسأله بر اساس اندازه واقعی (جدول ۱) در قسمت New design modeler به صورت دو بعدی ترسیم گردید و سپس با تعریف بعد سوم به آن حجم داده شد. مش‌بندی به صورت منظم و از سلول‌های چهار وجهی در فضای محاسباتی انجام گردید.

جدول ۱- مشخصات هندسی خشک‌کن‌ها به صورت عمومی

| پارامتر        | اندازه                                |
|----------------|---------------------------------------|
| طول گلخانه     | ۱۰ متر                                |
| عرض گلخانه     | ۵ متر                                 |
| ارتفاع گلخانه  | ۲/۵ تا ۴ متر                          |
| سیستم حرارتی   | تابش انرژی خورشید                     |
| تعداد دریچه‌ها | یک دریچه در ابتدا و یک دریچه در انتها |
| طریقه ورود هوا | ورود هوا از ابتدای خشک‌کن             |
| طریقه خروج هوا | خروج هوا از انتهای خشک‌کن             |

به منظور بررسی عوامل موثر بر خشک کردن، اثر هندسه محفظه گلخانه در چهار سطح (شکل ۲) و شدت تابش خورشید در پنج سطح به نمایندگی از ساعات مختلف روز و ماه در شهر اصفهان (۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ وات بر متر مربع) روی سرعت، دما و فشار هوای داخل محفظه خشک‌کن به روش CFD مورد ارزیابی قرار گرفته است.

معادلات پیوستگی و مومنتم در جریان‌های تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر مطابق معادلات (۱) و (۲) است؛ با این تفاوت که چگالی جریان در جریان تراکم‌پذیر بر خلاف جریان تراکم‌ناپذیر، یک عدد ثابت نیست. از آنجایی که تراکم‌پذیری در انرژی جریان تأثیرگذار است، لذا معادلات انرژی (معادله (۴)) نیز به دستگاه معادلات اضافه شد.

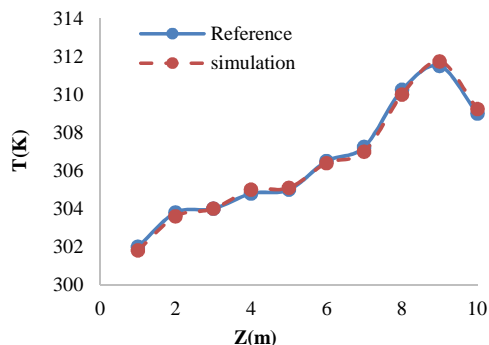
به روش جابجایی اجباری ۴۱ درصد بیشتر از جابجایی طبیعی بوده است (Purusothaman & Valarmathi, 2018).

شبیه‌سازی خشک‌کن گلخانه‌ای با دو هندسه واقعی و هندسه با ارتفاع کاهش یافته نشان داد که توزیع دمای در کل حجم گلخانه تقریباً یکنواخت بود و دمای متوسط داخل خشک‌کن، ۳۱۵ درجه کلون و گرادین دما نسبت به دمای محیط، ۱۴ درجه کلون بود. همچنین سرعت متوسط هوا در ارتفاع ۱ متر، ۰/۷۴ متر بر ثانیه بود که این مقدار نزدیک به پایین‌ترین حد خشک شدن با جابجایی اجباری (۰/۶ متر بر ثانیه) است (Roldan et al., 2019).

خشک کردن فلفل در خشک‌کن گلخانه‌ای با سقف سهموی و مساحت ۱۶۰ متر مربع توسط محققین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان رطوبت در طی ۳ روز از ۷۴٪ به ۹٪ (wb) کاهش یافت. این در حالی است که در روش خشک کردن مستقیم بدون گلخانه این زمان به ۵ روز افزایش یافت (Kaewkiew et al., 2012).

در تحقیقی عملکرد خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای با سقف سهموی از جنس صفحات پلی‌کربنات برای خشک کردن زنجبیل ارزیابی شد. برای بررسی عملکرد تجربی خشک شدن، ۳۰۰ کیلوگرم زنجبیل در خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی در دمای هوای ۳۳ تا ۵۵ درجه سلسیوس خشک شد. نتایج نشان داد که مقدار رطوبت وزنی اولیه مواد از ۹۰٪ تا رطوبت نهایی ۱۰٪ وزنی کاهش یافته است (Nimnuan & Nabnean, 2020).

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از خشک‌کن گلخانه‌ای خورشیدی روش مناسبی برای خشک کردن محصولات کشاورزی است که در کشورهای مختلف از آن استفاده می‌شود و عواملی مانند هندسه گلخانه، میزان تابش خورشید و سرعت هوای ورودی روی عملکرد آن اثر مستقیم دارند. لذا در این تحقیق مقایسه اثر انواع هندسه‌های موجود برای خشک‌کن گلخانه‌ای و اثر تابش خورشید در روزهای مختلف سال بر عملکرد این نوع خشک‌کن‌ها در اقلیم خشک شهر اصفهان به صورت شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۳- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی دمای هوای داخل گلخانه در طول گلخانه با نتایج تجربی (Patel 2020)

### بررسی اثر شدت تابش روی سرعت هوای داخل خشک‌کن

کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی سرعت هوای داخل در طول محفظه خشک‌کن نوع اول در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این‌که محفظه خشک‌کن در مقطع عرضی به صورت متقارن رسم گردیده است، کانتورها در صفحه  $Y-Z$  و در مقطع صفر عرضی ترسیم شده‌اند و قسمت‌های مستطیل شکل خاکستری رنگ، فضای قرارگیری مواد در حال خشک‌شدن هستند. مشاهده می‌شود که با افزایش تابش، گردش هوا در خشک‌کن بهتر شده است. در تابش ۴۰۰ وات بر متر مربع، نقاط ساکن بسیاری قابل مشاهده است و هر چه مقدار تابش افزایش یافته است این مناطق و نقاط ساکن کاهش یافته و یکنواختی بیشتری در سرعت هوای داخل محفظه ایجاد شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تابش شدت خورشید عامل مطلوبی در گردش هوای داخل محفظه است.

مقایسه اثر شدت تابش نور خورشید روی سرعت هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع دوم (شکل ۵) نسبت به هندسه نوع اول، نشان می‌دهد که افزایش تابش نور خورشید، عملکرد مناسبی در گردش هوا نداشته است. بیشترین منطقه تحت تأثیر در تابش ۴۰۰ وات بر متر مربع مشاهده می‌شود، ولی نقاط ساکن بسیاری نیز قابل مشاهده است و هر چه مقدار تابش افزایش یافته، این منطقه‌ی تحت تأثیر کاهش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تابش شدت خورشید عامل مطلوبی در گردش هوای داخل محفظه نوع دوم نیست.

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

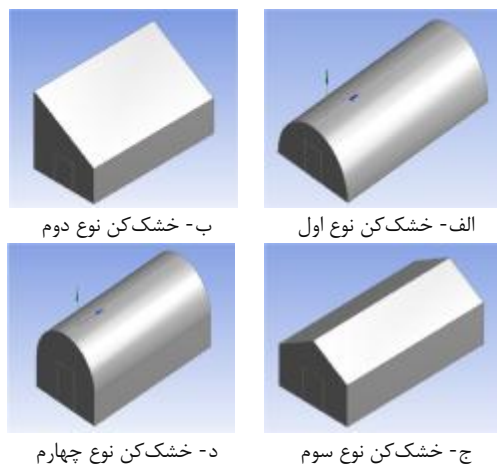
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \nabla \mathbf{p} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

که  $\rho$ : جرم حجمی،  $v$ : سرعت متوسط،  $p$ : فشار استاتیکی،  $\boldsymbol{\tau}$ : تانسور تنش،  $\rho \mathbf{g}$ : نیروی جاذبه و  $\mathbf{F}$ : نیروی خارجی احتمالی وارد بر بدنه است.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{E}) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho \mathbf{E} + \mathbf{p})] = \nabla \cdot [\mathbf{k}_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j \mathbf{h}_j \mathbf{j}_j + (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v})] + \mathbf{S}_h \quad (4)$$

که  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی،  $E$ : انرژی جنبشی،  $\mathbf{k}_{\text{eff}}$ : هدایت گرمایی موثر،  $\mathbf{j}_j$ : شار انتشار،  $h$ : آنتالپی،  $T$ : دما و  $\mathbf{S}_h$ : منبع حرارتی حجمی است.

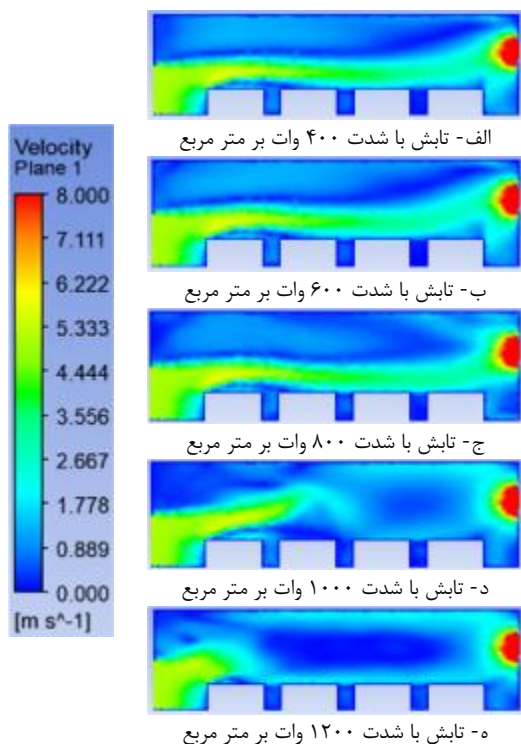


شکل ۲- انواع هندسه خشک‌کن گلخانه‌ای مورد بررسی

### نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده، نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با داده‌های تجربی به دست آمده از پژوهشی دیگر (Patel, 2020)، مقایسه گردید. میانگین دمای داخل محفظه خشک‌کن (کل حجم خشک‌کن) در فواصل مختلف طولی (راستای  $Z$ )، به صورت شبیه‌سازی و تجربی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان‌گر این است که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی برقرار است.

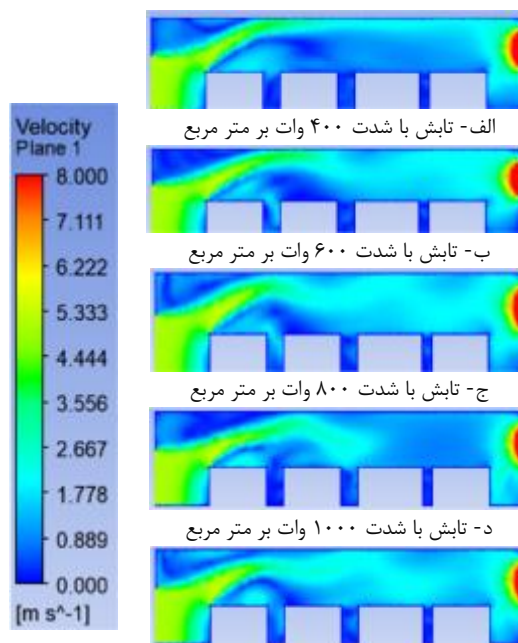
را تحت تأثیر قرار داده است. هر چه مقدار تابش افزایش یافته، این منطقه تحت تأثیر کاهش یافته است. در تابش با شدت ۲۰۰ وات بر متر مربع نقاط سکون زیادی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عدم گردش هوا در این حالت است.



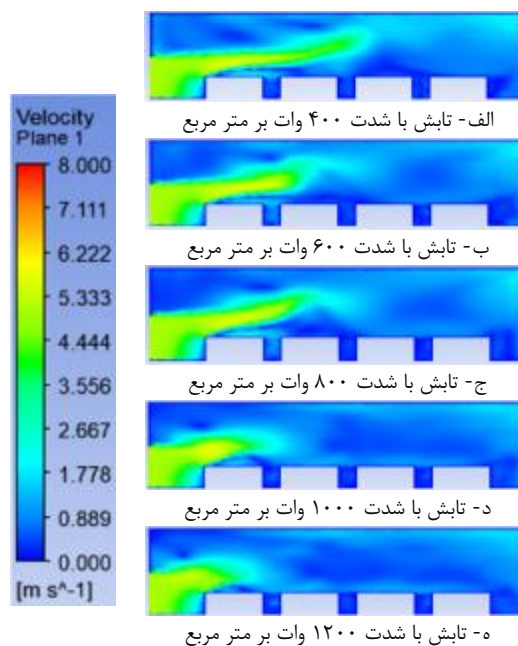
شکل ۶- کانتور سرعت هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع سوم

کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی سرعت هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع چهارم در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت هوا در بالای محفظه مواد در حال خشک شدن در تمام شدت‌های تابش به صورت یکنواخت است. این یکنواختی سرعت هوا (۴/۵ تا ۵ متر بر ثانیه) منجر به یکنواختی خشک شدن در تمام طول بستر مواد می‌شود.

از مقایسه کانتورهای سرعت هوای مربوط به چهار نوع هندسه خشک‌کن می‌توان نتیجه گرفت که هندسه نوع چهارم که دارای دیواره‌های عمودی و سقفی سهموی است، بهترین عملکرد را در جریان یکنواخت هوا در داخل خشک‌کن داشته است. این مهم می‌تواند به خشک شدن یکنواخت مواد در طول بستر خشک‌کن کمک نماید.



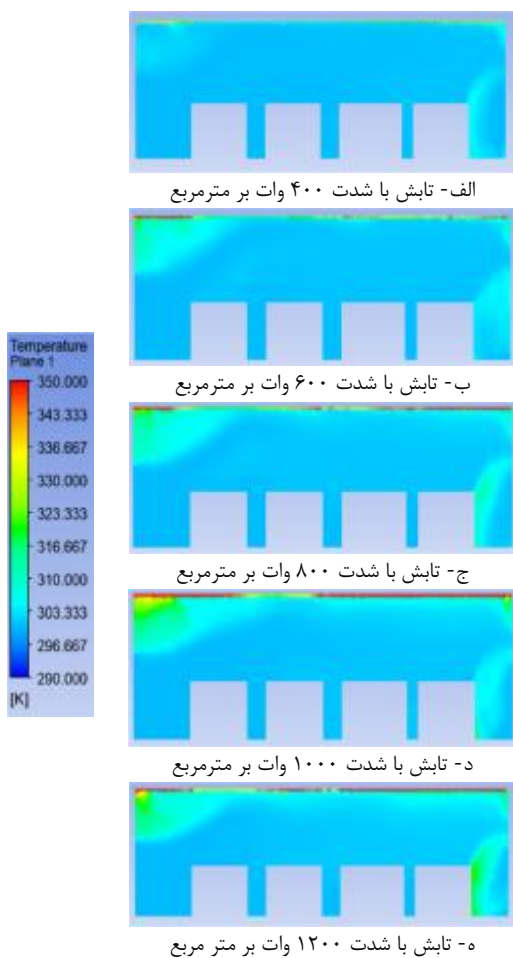
شکل ۴- کانتور سرعت هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع اول



شکل ۵- کانتور سرعت هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع دوم

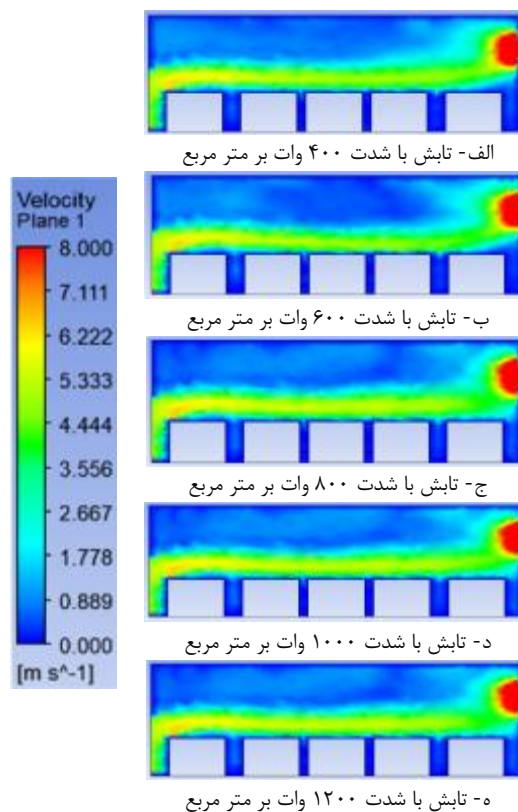
شکل ۶، کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی سرعت هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع سوم را نشان می‌دهد. افزایش تابش از ۴۰۰ تا ۸۰۰ وات بر متر مربع، عملکرد مناسبی در گردش هوا داشته است و تمام طول خشک‌کن

نسبت به حالت قبل کمتر است. در تحقیقی مشابه، دمای تجربی به دست آمده برای این نوع گلخانه حدود ۳۲۳ درجه کلوین بوده که کمتر از گلخانه‌های نوع اول و دوم است و نتایج این تحقیق را تأیید می‌کند (Adu *et al.*, 2012).



شکل ۸- کانتور دمای هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع اول

در شکل ۹، کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع دوم، نشان داده شده است. این هندسه به گونه‌ای است که بیشترین میزان سطح خشک‌کن در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار دارد. نسبت به حالت اول، انتشار حرارت به لایه‌های پایین‌تر در کلیه شدت‌های تابش، بهتر صورت گرفته است.



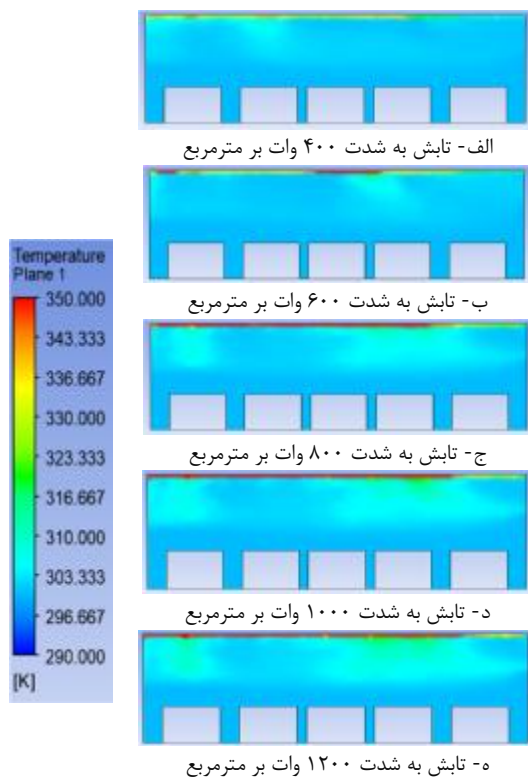
شکل ۷- کانتور سرعت هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع چهارم

### بررسی اثر شدت تابش روی دمای هوای داخل خشک‌کن

کانتور دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع اول در شدت‌های مختلف تابش نور خورشید در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش تابش، میانگین دمای هوای خشک‌کن از ۳۰۰ درجه کلوین به ۳۲۰ درجه کلوین افزایش یافته است. افزایش دما، بیشتر در قسمت فوقانی محفظه رخ داده است. نتایج تجربی به دست آمده توسط سایر محققین برای این نوع خشک‌کن، دمای بین ۳۲۵ تا ۳۳۰ درجه کلوین را نشان داده است که مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد (Janjai *et al.*, 2009).

کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع سوم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از نظر یکنواختی دما مشاهده می‌شود که دما تقریباً در محفظه، یکنواخت است و اثری از پرش‌های دمایی و نقاط با دمای بالا در داخل محفظه وجود ندارد. همچنین نسبت به هندسه نوع دوم به دلیل سطح کمتری که در معرض تابش قرار دارد، دمای داخل محفظه در این حالت

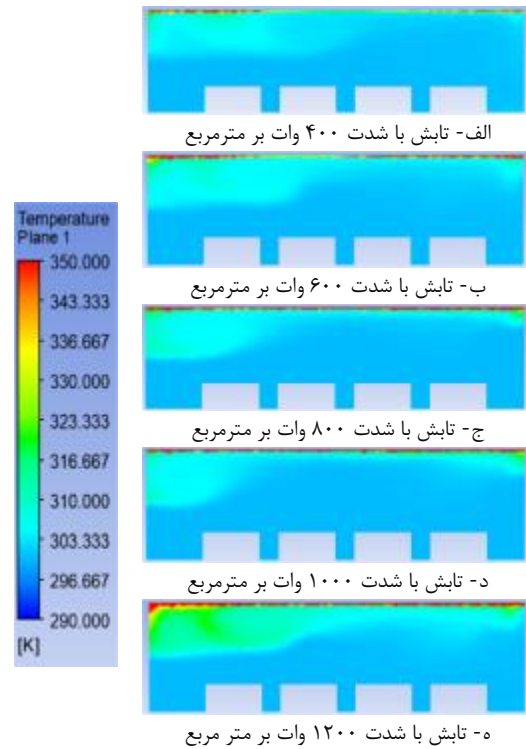
شکل ۱۱، کانتور شدت تابش نور خورشید روی دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن نوع چهارم را نشان می‌دهد. بررسی کانتورها از نظر یکنواختی دما نشان می‌دهد که همانند هندسه نوع سوم، دمای تقریباً یکنواختی در محفظه وجود دارد و اثری از پرش‌های دمایی و نقاط با دمای بالا در داخل محفظه وجود ندارد. از مقایسه کانتورهای دمای هوای مربوط به چهار نوع هندسه خشک‌کن می‌توان نتیجه گرفت که هندسه نوع سوم و چهارم بهترین عملکرد را در توزیع دمای یکنواخت هوا (۳۱۰ تا ۳۱۵ کلوین) در داخل خشک‌کن داشته‌اند. این مهم می‌تواند به خشک شدن یکنواخت مواد در طول بستر خشک‌کن کمک نماید.



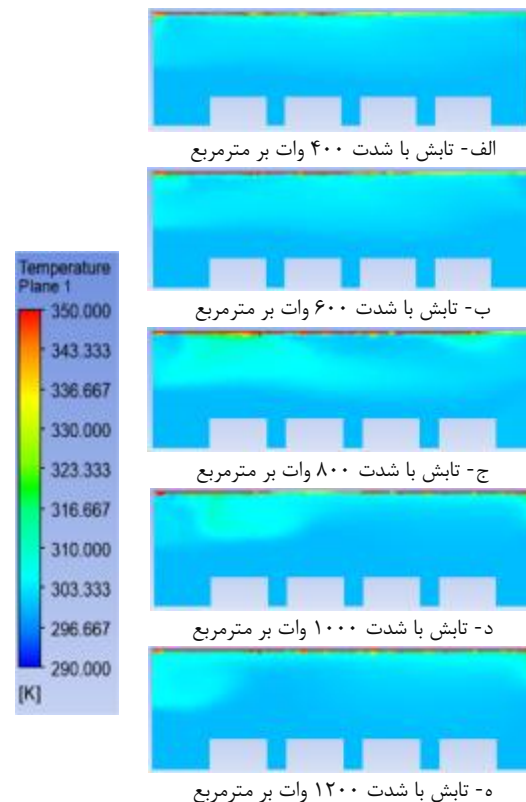
شکل ۱۱- کانتور دمای هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع چهارم

### بررسی اثر شدت تابش روی فشار هوای داخل خشک‌کن

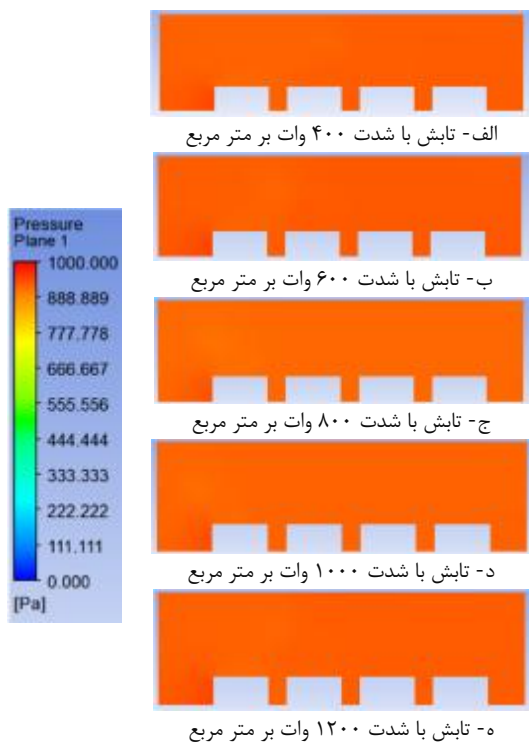
کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی فشار داخل محفظه خشک‌کن نوع اول در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با افزایش تابش، میانگین فشار هوای خشک‌کن، کمی نسبت به فشار هوای آزاد افزایش یافته است.



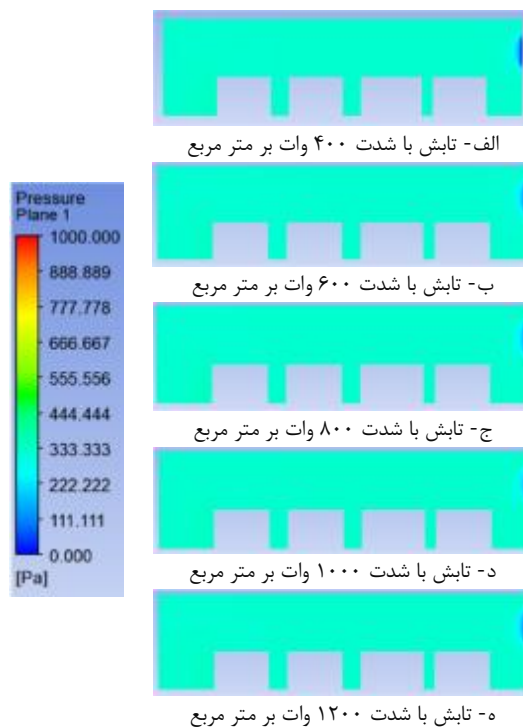
شکل ۹- کانتور دمای هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع دوم



شکل ۱۰- کانتور دمای هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع سوم

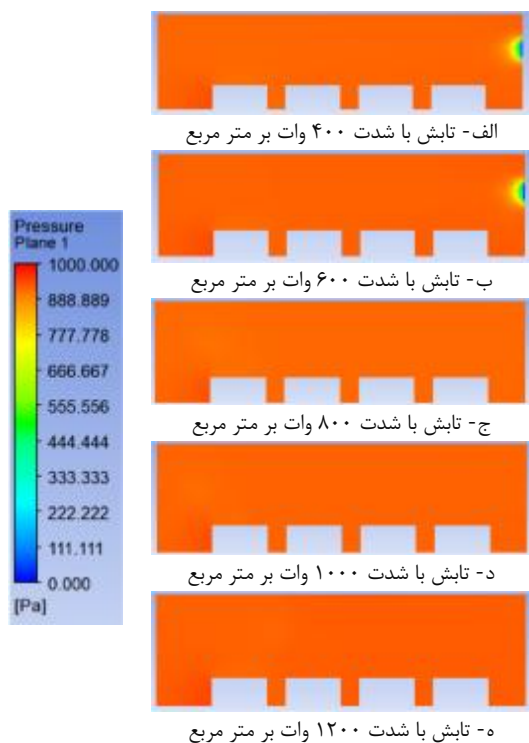


شکل ۱۳- کانتور فشار هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع دوم



شکل ۱۲- کانتور فشار هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع اول

شکل ۱۳ کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی فشار داخل محفظه خشک‌کن نوع دوم را نشان می‌دهد. فشار هوای خشک‌کن، با افزایش تابش، افزایش یافته است. این افزایش فشار، بیشتر از هندسه نوع اول بوده است. با توجه به اینکه دمای داخل خشک‌کن نوع دوم نسبت به نوع اول بیشتر بود، لذا انتظار افزایش فشار هم وجود داشت. کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی فشار داخل محفظه خشک‌کن نوع سوم در شکل ۱۴ نشان داده شده است. از مقایسه شکل ۱۴ با شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که فشار داخل محفظه کمتر از هندسه نوع دوم بوده است. کانتور اثر شدت تابش نور خورشید روی فشار داخل محفظه خشک‌کن نوع چهارم در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با افزایش تابش، فشار هوای خشک‌کن، به شدت افزایش یافته است. فشار بالای محفظه عمل مناسبی برای خشک کردن نیست.



شکل ۱۴- کانتور فشار هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع سوم



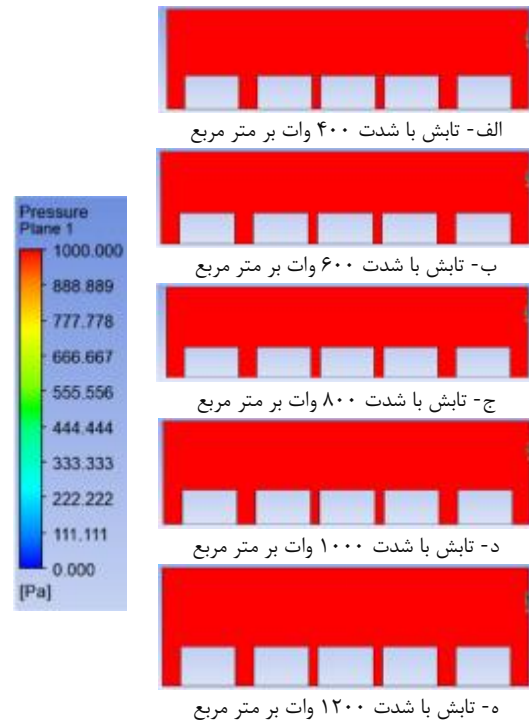
۲- بهترین عملکرد در توزیع یکنواخت دمای هوای داخل خشک‌کن (۳۱۰ تا ۳۱۵ کلوین) مربوط به گلخانه با سقف شیب‌دار دوطرفه و گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های بوده است.

۳- کمترین و بیشترین فشار هوای داخل خشک‌کن، به ترتیب  $330 \text{ Pa}$  و  $890 \text{ Pa}$  مربوط به گلخانه با سقف محدب و گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی بوده است.

۴- در مجموع، گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی بهترین عملکرد را در خشک شدن یکنواخت مواد در طول بستر خشک‌کن داشت.

#### منابع

- Adu, E. A., Bodunde, A. A., Awagu, E. F., & Olayemi, F. F. (2012). Design, construction and performance evaluation of a solar agricultural drying tent. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1: 1-11.
- Bala, B. K., & Janjai, S. (2013). Solar drying of agricultural products. *Stewart Postharvest Review*, 9(2): 1- 8.
- Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12: 48- 67.
- Bekkioui, N., El, S., Rachadi, A., & Ezzahraouy, H. (2020). One-year simulation of a solar wood dryer with glazed walls in a Moroccan climate. *Renewable Energy*, 155: 770-782.
- Boulard, T., & Wang, S. (2002). Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34: 173-190.
- Etim, P. J., Eke, A. B., & Joshua, K. (2020). Design and development of an active indirect solar dryer for cooking banana. *Scientific African*, 8: e00463.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, BK., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a pv-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83: 1550-65.
- Kaewkiew, J., Nabnean, S., & Janjai, S. (2012). Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering*, 32: 433-9.



شکل ۱۵- کانتور فشار هوای داخل محفظه در تابش‌های مختلف در هندسه نوع چهارم

از مقایسه کانتورهای فشار هوای مربوط به چهار نوع هندسه خشک‌کن می‌توان نتیجه گرفت که هندسه نوع اول کمترین فشار هوای داخل خشک‌کن ( $330 \text{ Pa}$ ) و هندسه نوع چهارم بیشترین فشار هوای داخل خشک‌کن ( $390 \text{ Pa}$ ) را دارد. با توجه به اینکه هرچه فشار داخل محفظه کمتر باشد، تخییر در دمای پایین‌تری انجام می‌شود، می‌توان دریافت که خشک‌کن نوع چهارم با وجود عملکرد مناسب در ایجاد سرعت جریان هوای و توزیع دمای یکنواخت در محفظه خشک شدن، عملکرد خوبی در فشار داخل محفظه ندارد.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر هندسه محفظه خشک‌کن در چهار سطح و شدت تابش خورشید در پنج سطح روی سرعت، دما و فشار هوای داخل محفظه خشک‌کن به روش CFD ارزیابی گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که:

۱- گلخانه با سقف محدب و دیواره‌های عمودی بهترین عملکرد را در یکنواختی سرعت جریان هوا ( $4/5$  تا  $5$  متر بر ثانیه) بر روی مواد در حال خشک شدن داشته است.

- Kumar, P., & Singh, D. (2020). Advanced technologies and performance investigations of solar dryers: A review. *Renewable Energy Focus*, 35: 148- 158.
- Patel, H. A. (2020). Experimental conditions to identify the ideal shape of dryer investigation of six shapes of solar greenhouse dryer in no load. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 9(4): 206-210.
- Purusothaman, M. & Valarmathi, T. N. (2018). Computational fluid dynamics analysis of greenhouse solar dryer. *International Journal of Ambient Energy*, 40(8): 894-900.
- Roldan, N. I. R., Ortiz, A. L., Yudonago, J. F. I., Valladares, O. G., & Figueroa, I. P. (2019). Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer “chapel-type” coupled to an air solar heating system. *Energy Science & Engineering*, 7(4): 1123-1139.
- Tomar, V., Tiwari, G. N., & Norton, B. (2017). Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components. *Solar Energy*, 154: 2-13.
- Nimnuan, P., & Nabnean, S. (2020). Experimental and simulated investigations of the performance of the solar greenhouse dryer for drying cassumunar ginger (*Zingiber cassumunar Roxb.*). *Case Studies in Thermal Engineering*, 22: 100745.