

کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در طراحی بهینه صفحه جاذب خشک کن خورشیدی

مهرنوش متحیر رزداری^۱، اکبر عرب حسینی^{۲*}، هادی صمیمی اخیحجانی^۳، مرتضی خشه چی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران،

۲. دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه کردستان

۴. استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۸/۲۷)

چکیده

یکی از کاربردهای انرژی خورشیدی، در خشک کن خورشیدی می باشد. اما این نوع خشک کن ها دارای بازدهی پائینی هستند که برای افزایش بازده و صرفه جویی در مقدار انرژی مصرفی بهینه سازی صفحه جاذب آن ها در اولویت قرار دارد. بدین منظور، جریان هوای داخل محفظه صفحه جاذب خشک کن خورشیدی با استفاده از روش مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شبیه سازی شد سپس روند انتقال حرارت، توزیع جریان و سرعت هوای داخل محفظه تحلیل گردید و بصورت آزمایشگاهی صفحات مختلف جاذب مورد مقایسه قرار گرفتند. در این تحقیق سه حالت مختلف صفحه جاذب با ورودی یکسان و سه حالت خروجی متفاوت (دایره ای، متداول و متخلخل) بررسی شد که در صفحه با خروجی متخلخل، صفحه با ضریب تخلخل ۰/۳۱۴ استفاده شد. نتایج نشان داد که بین داده های تحلیلی و تجربی، ضریب تبیین (R^2) بالای ۹۷ درصد برقرار بود. در صفحات دایره ای و متداول انباشت حرارتی در گوشه ها وجود داشت که با تغییر در نوع خروجی و تبدیل آن به حالت خروجی متخلخل از تلفات گرمایی و انباشت حرارت جلوگیری بعمل آمد.

واژه های کلیدی: خشک کن خورشیدی، صفحه جاذب، دینامیک سیالات محاسباتی، توزیع جریان، انتقال حرارت

مقدمه

خشک شدن محصولات متاثر از شرایط آب و هوایی مانند تعداد ساعات آفتابی، میزان تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و دمای محیط و سرعت باد می باشد (Shahi et al., 2011).

برای بهبود روند خشک شدن و صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش قیمت تمام شده محصول خشک شده، نیاز به طراحی درست و بهینه دستگاه های خشک کن می باشد (Delgado et al., 2013). دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک ابزار شبیه سازی مناسبی برای نمایش پاسخ های عددی نرم افزار به شکل های مختلف از جمله گرافیکی می باشد. به همین دلیل برای محاسبه نرخ کاهش رطوبت در محصول، دانستن جریان گرما، جرم و سرعت هوای جاری در یک حجم مشخص از موارد ضروری هستند (Mirade, 2003; Selmiet et al., 2008). مدل سازی انجام شده توسط نرم افزار، با داده های حاصل از آزمایشات اعتبارسنجی می شوند (Bennamoun and Belhamri, 2003). شبیه سازی با کمک CFD با پدیده انتقال و محاسبه هندسه پیچیده در هر دو سطح میکروسکوپی و ماکروسکوپی همراه است. با توجه به محدودیت هایی که برای بدست آوردن داده های تجربی وجود دارد، نمی توان با استفاده از روش آزمایشگاهی، داده های مطلوب در هر نقطه را بدست آورد.

افزایش جمعیت جهان مستلزم تولید غذای بیشتر می باشد. از دیرباز روش های متفاوتی برای نگهداری مواد غذایی استفاده می شد. یکی از این روش های پرکاربرد، خشک کردن می باشد. خورشید بعنوان یکی از منابع مهم انرژی در جهان، با مقدار شدت تابشی برابر با ۱۳۵۳ وات بر مترمربع در حالت تابش عمودی و بدون وجود لایه اتمسفر جو زمین، منبع قابل توجهی برای انرژی می باشد (Aghanajafi and Deghani, 2007). محصولات کشاورزی را به روش های مختلفی خشک می کنند که یکی از مهمترین آن ها استفاده از انرژی خورشید می باشد. فرایند خشک کردن عبارتست از حذف مقداری از رطوبت موجود در محصول که با استفاده از حرارت تبخیر می شود (Aghbashloo et al., 2008). در خشک کن های خورشیدی محتوای رطوبتی محصول، دمای صفحه جاذب و دمای هوای جاری در خشک کن بطور همزمان با تغییر دمای محیط و افزایش شدت تابش خورشید تغییر می کند. از سوی دیگر نرخ

* نویسنده مسئول: ahosseini@ut.ac.ir

از این روش CFD می‌تواند آن دسته از موقعیت‌های پیچیده‌ای که در روش آزمایشگاهی وجود دارد را برطرف نموده و نتایج مورد نظر را با هزینه بسیار کم در اختیار قرار دهد (Darabi et al., 2015). محققین و مهندسين طراح از روش CFD برای تحلیل، ارزیابی و محاسبه عملکرد تجهیزات لازم برای انجام فرآیندهای حرارتی مورد استفاده در صنعت و کشاورزی استفاده نموده‌اند، از این جمله می‌توان به خشک‌کن‌های پاششی (Kieviet et al., 1997)، محفظه‌های خشک‌کن خورشیدی (Adeniyi et al., 2012)، مخازن همزن (Sahu et al., 1999) و صفحات جمع‌کننده خورشیدی (Pandey and Chaurasiya, 2017) اشاره کرد. بنابراین دینامیک سیالات محاسباتی بطور عمده برای پیش‌بینی سرعت هوا و محدوده‌های گرمایی در هر منطقه از صفحه جمع‌کننده و بهینه‌سازی عملکرد صفحه جاذب استفاده می‌شود.

یکی از پرکاربردترین خشک‌کن‌های خورشیدی، نوع کابینتی می‌باشد که در این نوع، محفظه خشک‌کن و صفحه جاذب از هم جدا بوده و به همین سبب محصول در حال خشک شدن در معرض تابش مستقیم خورشید قرار نگرفته و در نتیجه کیفیت رنگ محصول حفظ می‌شود. در این نوع خشک‌کن‌ها سیال با جریان پیدا کردن در داخل صفحه جاذب گرم شده و سپس سیال گرم شده به سمت محفظه خشک‌کن منتقل می‌گردد. به همین سبب برای بهبود کارایی در این نوع خشک‌کن‌ها، تغییر در صفحه جاذب در اولویت قرار دارد (Ingle et al., 2013). در این راستا تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی صفحات جمع‌کننده خورشیدی تخت انجام شده است. برای تحلیل حرارتی لوله‌های بکار رفته در داخل جمع‌کننده خورشیدی و تحلیل اکسرژی صفحه جمع‌کننده بر اساس قانون اول ترمودینامیک تحقیقی با استفاده از روش CFD انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که داده‌های تجربی و داده‌های عددی مطابقت خوبی با هم دارند (Gunjo et al., 2017). در تحقیقی که در مورد تحلیل حرارتی و بدست آوردن مقادیر بهینه پارامترها در سیستم آبگرمکن خورشیدی صورت گرفت، نتایج حاصل از تحلیل CFD نشان داد بیشینه دما (۷۲ درجه سلسیوس) یا جریان سیال ۵/۱ لیتر بر دقیقه اتفاق می‌افتد (Zhao et al., 2010). در بررسی انجام شده در مورد یک جمع‌کننده خورشیدی، ویژگی‌های انتقال حرارت هوای در جریان به روش CFD تحلیل شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شدند. برای بدست آوردن یک ساختار بهینه از جمع‌کننده، سه نوع صفحه و چندین نسبت جریان برای کانال در نظر گرفته با هم مقایسه شده و حالت بهینه انتخاب شد

(Hung et al., 2017). در مطالعه‌ای دینامیک سیالات محاسباتی برای ارزیابی اثر زاویه شیب، پوشش دوجداره و کاهش میزان انتشار پوشش بر دمای خروجی مورد استفاده قرار گرفت (Harriss and Helwig, 2007). مطالعه در مورد ابعاد صفحات جمع‌کننده نیز یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در افزایش یا کاهش بازده حرارتی آنها می‌باشد. با استفاده از تجزیه و تحلیل عددی، دو نوع صفحه جاذب (موجدار و صاف) مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل عدد رایلی، زاویه شیب، طول موج و نسبت ابعاد می‌باشد (Varol and Oztop, 2008). یک جمع‌کننده خورشیدی با سپرهای داخلی و تهویه مکانیکی با ساختار ساده به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از آن یک مدل عددی برای پیش‌بینی جریان هوا و میزان انتقال حرارت بدست آمد. مدل بدست آمده همبستگی خوبی با داده‌های واقعی داشت (Hu et al., 2013). دوویچ و آندراسی مدل‌های عددی مختلفی برای ارزیابی تاثیر پارامترهای طراحی و عملکردی مانند انتقال حرارت بین صفحه جاذب و لوله‌ها، قطر لوله‌ها، فاصله بین پوشش شیشه و صفحه جاذب، خواص اپتیکی صفحه جاذب و میزان شدت جریان سیال بر بازده حرارتی جمع‌کننده‌ها مورد استفاده قرار دادند (Dović and Andrassy, 2012).

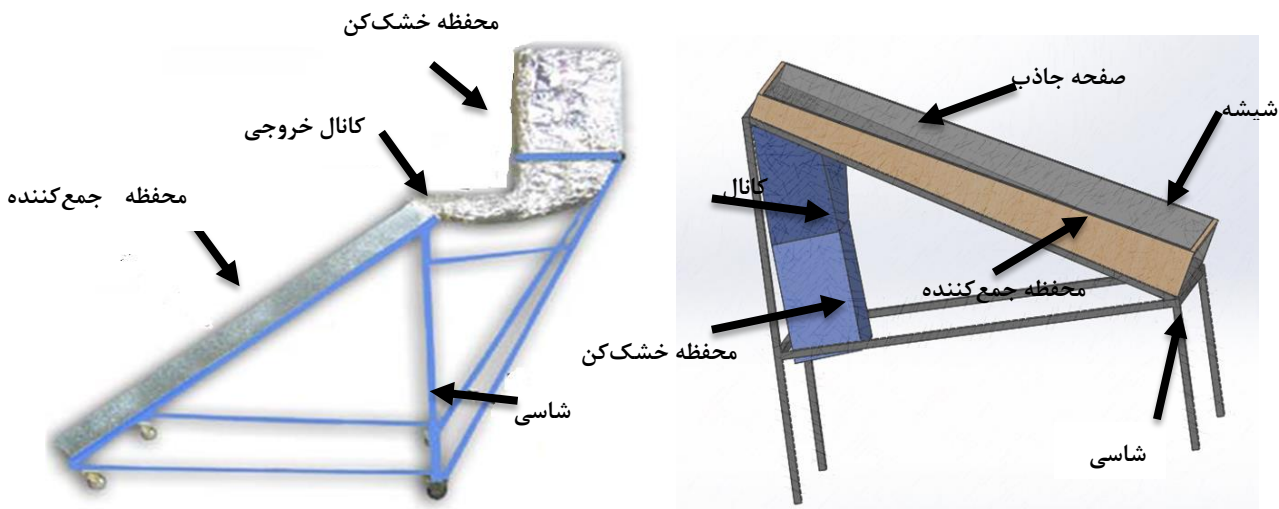
در تحقیقی اثر دو نوع پوشش شیشه‌ای بر روی راندمان صفحه جاذب مورد ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش از یک صفحه جاذب آلومنیوم متخلخل با ضریب تخلخل ۰/۳۱۴ و دو نوع پوشش شیشه‌ای در شش دبی مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش شیشه‌ای به صورت پله‌ای عملکرد بهتری نسبت به نوع معمولی دارد (Zamanian and Zomorodian, 2013). تاکنون صفحات جاذب زیادی با هزینه کم و با قابلیت جمع‌آوری و ذخیره‌سازی بالای انرژی ساخته و استفاده شده‌اند. با توجه به تحقیقات اخیر به علت گزارش برخی از محققان ناشی از تلفات حرارتی در انتهای صفحه جاذب و وجود مانده انرژی در آن (Zamanian and Zomorodian, 2013; Samimi, 2015) در این تحقیق سعی شده است با ارائه یک طرح هندسی از جمع‌کننده و یک ساختار تغییر یافته در صفحه جاذب جمع‌کننده، میزان بازده حرارتی صفحه جمع‌کننده افزایش یابد. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی عددی جریان در صفحه جاذب خشک‌کن خورشیدی، چگونگی انتقال حرارت و توزیع دمایی هوای جریان یافته در داخل صفحات جاذب خورشیدی مختلف با استفاده از CFD و مقایسه آن‌ها با یکدیگر و بهبود ساختار آنها برای بدست آوردن بهینه‌ترین صفحه جاذب می‌باشد.

با خروجی دایره‌ای، قطر خروجی برابر ۱۲ سانتی متر لحاظ شد و در مدل با خروجی متخلخل، صفحه دارای ابعاد مشابه با دو مدل دیگر می‌باشد با این تفاوت که در خروجی ارتفاع شیشه از صفحه ۱۳ سانتی متر می‌باشد تا افت فشار حاصله را جبران نماید. سوراخ‌های ایجاد شده در این مدل نیز دارای قطر شش میلی متر و با فاصله ۲/۵ سانتی متر از هم رسم شده‌اند. عمل داده‌گیری از خشک‌کن‌ها در شرایط محیطی با رطوبت نسبی ۲۳-۱۷ درصد و دمای ۲۳-۲۸ درجه سلسیوس انجام شد. برای محاسبه میزان دما در نقاط مختلف صفحه جاذب از ترموکوپل نوع T استفاده شد که با استفاده از ثبت کننده داده DL-9601A, Lutron، با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس هر ۱۰ دقیقه، عمل داده‌گیری انجام شد. برای اندازه‌گیری میزان تابش دریافتی از خورشید به صفحه جمع‌کننده از سولاریمتر TES-1333R, Taiwan با دقت یک وات بر مترمربع استفاده شد. سولاریمتر مورد نظر به صورت موازی در کنار صفحات جاذب قرار داده شد تا تغییرات تابش خورشید را در طول زمان ثبت نماید.

مواد و روش‌ها

الف) آماده‌سازی دستگاه

برای انجام آزمایشات و تحلیل CFD صفحات جاذب و مقایسه آنها از دو نوع خشک‌کن استفاده شد (شکل ۱). خشک‌کن‌های مورد نظر شامل یک جمع‌کننده به طول و عرض و ارتفاع ۲۰۰×۹۵×۲۰۰ میلی‌متر می‌باشند. با استفاده از پمپ پیستوله، رنگ سیاه بر روی سطح صفحه جمع‌کننده پاشیده شد تا بیشترین میزان ضریب جذب را داشته باشد. برای انتقال گرما از صفحه به خشک‌کن از یک کانال از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت یک میلی‌متر که با پشم شیشه عایق شده بود استفاده شد. سطح صفحه جاذب نیز با یک شیشه به ضخامت چهار میلی‌متر پوشانده شده و هوا نیز توسط یک دمنده الکتریکی DC ۱۲ ولت به مدل Sunnon در داخل خشک‌کن جریان می‌یابد. در این تحقیق سه مدل متفاوت از صفحه جاذب با خروجی‌های متفاوت (با خروجی معمولی، با خروجی دایره‌ای و با خروجی متخلخل در کف صفحه) شبیه‌سازی شد. در مدل



ب) خشک‌کن با خروجی معمولی و دایره‌ای (Bagheri, 2008)

الف) خشک‌کن با خروجی متخلخل

شکل ۱. شماتیک خشک‌کن‌های مورد استفاده با صفحات جاذب مختلف

خورشیدی از یک دستگاه سرعت‌سنج باد Lutron مدل AM-4206 با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه استفاده شد. مقادیر سرعت و دمای هوا در نقاط مختلف صفحه جاذب در شکل ۲ با داده‌های خروجی از تحلیل سه‌بعدی CFD مقایسه شدند و بر این اساس اعتبارسنجی داده‌های تحلیلی صورت پذیرفت که مبنا در این تحقیق، دمای خروجی از صفحه جاذب بود. مدل‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار، با داده‌های حاصل از آزمایشات اعتبارسنجی شدند (Bennamoun and Belhamri, 2003).

برای محاسبه دما در نقاط مختلف خشک‌کن‌ها، صفحه جاذب را به سه قسمت مساوی تقسیم نموده و در هر قسمت یک عدد ترموکوپل (از نوع K) قرار داده شد. برای کنترل دمای هوای محیط نیز از یک ترموکوپل استفاده گردید که در کنار خشک‌کن‌ها نصب شده تا دمای محیط را اندازه‌گیری نماید. برای محاسبه میزان رطوبت هوا نیز از یک عدد دستگاه رطوبت-سنج HT.3006, Taiwan با دقت سه درصد استفاده شد. برای محاسبه سرعت جریان هوای جاری در داخل صفحه جمع‌کننده

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + U \cdot \nabla \rho U = -\nabla P \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در روابط بالا ρ چگالی (kg.m^{-3})، t زمان (s)، U سرعت هوای جریان یافته در صفحه جمع کننده (m.s^{-1}) و P فشار (Pa) می باشد.

د) مدل سازی صفحات جاذب خورشیدی

مدل سه بعدی صفحات جمع کننده در نرم افزار سالیدورکس با جزئیات کامل و با ابعاد ۲۰۰۰ میلیمتر طول و ۹۵۰ میلیمتر عرض ترسیم شد (شکل ۲) و پس از ذخیره آن در پوشه جداگانه به صورت یک قطعه مستقل هر کدام به طور جداگانه به نرم افزار انسیس و زیر مجموعه فلونت (Fluent) فراخوانی شدند. پس از آن مرحله مش بندی مدل ها انجام شد که مش بندی در نرم افزار انسیس به روش های مختلفی صورت می گیرد. با توجه به نوع ساختار و شکل مدل، نرم افزار بهترین نوع مش بندی را انتخاب کرده تا هیچ گونه تداخلی در خطوط مش بندی صورت نگیرد. در این تحقیق از مش بندی مثلثی که خطوط مش شبکه های مثلثی شکلی ایجاد می کنند استفاده شد. پس از امان بندی و تعیین نوع مواد استفاده شده در صفحات مورد نظر، شرایط مرزی بر روی مدل ها اعمال شده و مسئله با شرایط آرام برای صفحه جمع کننده با خروجی معمولی و شرایط آشفته گی برای دو صفحه (با خروجی دایره ای و با خروجی متخلخل از کف صفحه) حل گردید.

در این تحقیق شرایط مرزی به صورت زیر تعریف گردید: الگوی جریان هوا در طول فرآیند خشک شدن بسیار مهم می باشد و از آنجائیکه شرایط در تمام فرآیند تغییر شرایط بسیار جزئی و قابل صرف نظر کردن است و تاثیری بر حرکت هوا در درون صفحه جاذب ندارد، بنابراین شبیه سازی به صورت پایدار، با معادله انرژی و ویسکوزیته مدل آرام برای صفحه جاذب با خروجی معمولی انتخاب گردید و برای دو صفحه جاذب دیگر (با خروجی دایره ای و با خروجی متخلخل از کف صفحه) K-epsilon در نظر گرفته شد. مدل K-epsilon استاندارد یک مدل نیمه تجربی بر اساس معادلات انتقال مدل برای انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اتلاف آن (e) است.

انرژی جنبشی متلاطم، k و نرخ اتلاف آن e، از طریق روابط انتقال انرژی و اتلاف (۷) و (۸) بدست می آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{رابطه ۷})$$

ب) توسعه و هندسه مدل

در تمامی موارد شبیه سازی، نخستین مرحله توسعه و تشکیل مدل می باشد که برای این منظور، ابتدا باید حالت های مناسب برای مدل در نظر گرفته شود. برای این منظور در تحقیق فعلی ابتدا حالت انتقال جرم و انتقال حرارت در مدل در نظر گرفته شد و سپس مدل سه بعدی از صفحه جاذب با اجزای آن به تفکیک در نرم افزار سالیدورک رسم شد و به نرم افزار انسیس فراخوانی شد.

ج) مبانی تئوری روش CFD

میزان گرمای تولیدی در اثر تابش خورشید بر روی یک سطح با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می گردد:

$$Q_{rad} = A_e \sigma (T_c^4 - T_a^4) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Q_{rad} توان حرارتی تابش (W)، A_e سطح تابش (m^2)، σ ثابت بولتزمن $5.67 \times 10^{-8} (W.m^{-2}.K^{-4})$ ، T_a و T_c به ترتیب دما روی صفحه جمع کننده و دمای محیط (کلوین) می باشند (Holman, 2002).

حال با توجه به شرایط حاکم بر صفحه جاذب، رابطه تابشی و جذبی برای صفحه جمع کننده از رابطه (۲) بدست می آید:

$$\theta + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن θ ضریب بازتابش، α ضریب جذب و τ ضریب انتشار می باشند. بیشتر اجسام استفاده شده در طبیعت تابش خورشیدی و حرارتی را انتشار نمی دهند، بنابراین مقدار آن صفر در نظر گرفته می شود.

برای مدلسازی سیستم های خورشیدی نیاز به محاسبه ضریب طیفی می باشد که از رابطه (۳) حاصل می شود:

$$SF = \frac{I_{visible}}{I_{visible} + I_{IR}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که $I_{visible}$ شار پرتوهای مرئی برخورد کننده به سطح و I_{IR} شار پرتوهای مادون قرمز می باشد.

با در نظر گرفتن بازتابش و جذب در موقعیت r و جهت s می توان از رابطه (۴) برای محاسبه معادله انتقال حرارت تابشی استفاده کرد.

$$\frac{dI_{[r,s]}}{ds} + (\alpha + \theta) I_{[r,s]} = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\theta}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_{[r,s]'} \varphi_{[s,s']} d\Omega' \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن n شاخص انکسار نور، φ توابع فازی نور و Ω' زاویه جامد کروی حرکت خورشید می باشد.

با نادیده گرفتن تاثیر شتاب گرانش، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت روابط (۵) و (۶) حل می شوند.

در روابط ۷ تا ۹ ρ چگالی مایع، k انرژی جنبشی آشفته، u مقدار سرعت، μ ویسکوزیته دینامیکی، σ_k آشفستگی عدد پرانتل برای k ، G_k تولید انرژی سینتیکی آشفته با توجه به شیب متوسط سرعت، G_b تولید انرژی سینتیکی آشفته به دلیل شناوری، Y_M سهم انحطاط نوسان در آشفستگی فشرده به میزان کلی تخلیه، S_k ، S_z اصطلاحات منبع تعریف شده توسط کاربر، C_p ظرفیت گرمای ویژه، C_{1e} ، C_{2e} ، C_{3e} ثابت‌های استفاده شده در مدل آشفته، $(\tau_{ij})_{eff}$ تانسور استرس انحرافی، E انرژی کل، ε نسبت اتلاف می‌باشند.

(رابطه ۸)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

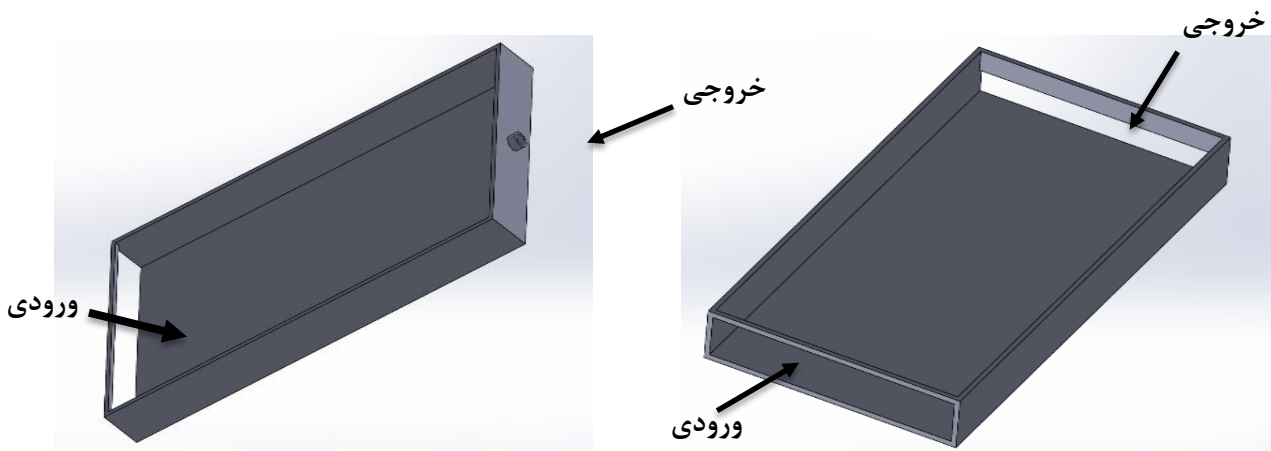
$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

حال با توجه به روابط بالا معادله انتقال گرما و جرم در

معادله K-e به صورت رابطه (۹) درمی‌آید (Yongson *et al.*, 2007):

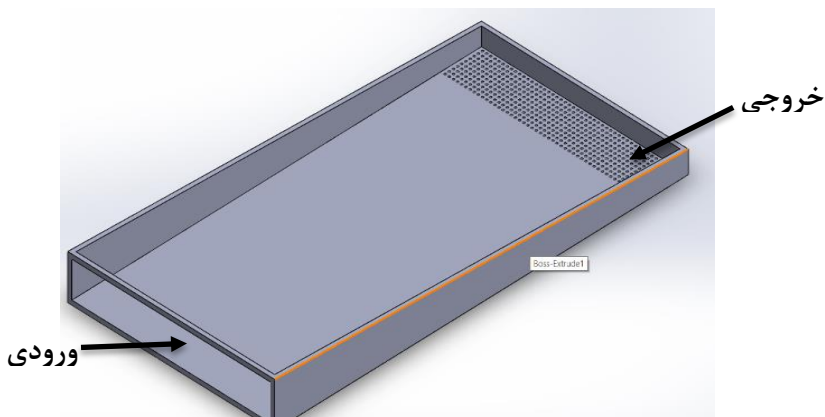
(رابطه ۹)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h$$



(ب) صفحه جاذب با خروجی دایره‌ای

(ج) صفحه جاذب با خروجی معمولی



(الف) صفحه جاذب با خروجی متخلخل از کف صفحه جاذب

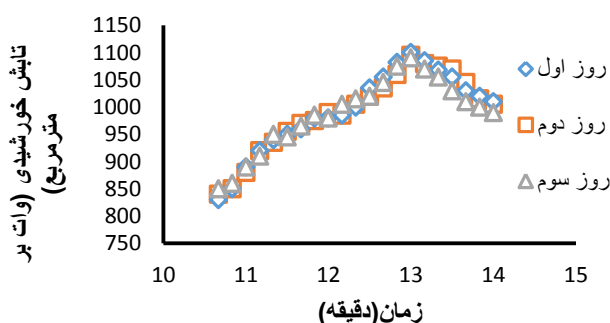
شکل ۲. نمایی از نحوه مش‌بندی صفحات جاذب با خروجی‌های متفاوت

خروجی: فشار سیال خروجی از صفحه برابر صفر در نظر گرفته شد.

دیواره‌ها: ضریب انتقال حرارت دیواره‌ها و شرایط محیطی در تحلیل صفحه منظور گردید. شرایط اعمالی مواد استفاده شده در دیواره‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. برای دریافت نتایج نهایی تعداد تکرارها برابر با ۵۰۰۰ تکرار

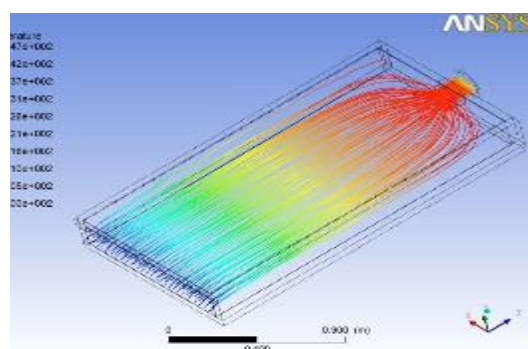
ورودی: سیال جاری در صفحه و خشک‌کن، هوا می‌باشد که شرایط آن در جدول ۱ نشان داده شده است. سه سطح سرعتی ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه برای هوای جاری در صفحه برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد که در خروجی صفحه اندازه‌گیری می‌شود. جهت جریان هوا، عمود بر شرایط مرزی

در نمودارها مشاهده می‌شود، میزان تابش خورشیدی با گذشت زمان و نزدیک شدن به ظهر افزایش پیدا کرده در حدود ساعت یک بعد از ظهر به میزان بیشینه خود رسیده و پس از آن روند کاهشی به خود گرفته است. این تغییرات در محدوده ۸۳۰ تا ۱۰۵۰ وات بر متر مربع می‌باشد. بیشترین مقدار دمای خروجی از صفحه برابر با ۶۵/۷ درجه سلسیوس در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه، شدت تابش ۱۰۵۰ وات بر مترمربع و دمای هوای محیط برابر با ۳۲/۸ درجه سلسیوس بود.



شکل ۳. تغییرات تابش خورشیدی در سه روز متوالی

نتایج بدست آمده از تحلیل CFD مدل سه بعدی صفحه جمع کننده در این قسمت توصیف می‌شود. نمودارهای توزیع سرعت و دمای هوای جریان یافته در صفحه جاذب با خروجی دایره‌ای در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل مشخص است، جریان هوا در طول صفحه، توزیع یکنواخت و همگن داشته و در خروجی صفحه این جریان متلاطم می‌شود. کمترین میزان سرعت در ورودی صفحه و بیشترین میزان آن در خروجی جمع کننده می‌باشد. در گوشه‌های انتهایی صفحه، خطوط سرعتی ناچیز و تقریباً قابل صرف نظر کردن هستند و عملاً سرعت هوای قابل ملاحظه در این نواحی وجود ندارد و می‌توان گفت انتقال حرارتی از دو ناحیه صفر است.



ب) نحوه توزیع خطوط جریان در سطح صفحه جاذب

لحاظ گردید. شبیه سازی‌های مدل سه بعدی در تکرارهایی برابر با ۲۴۰۰ تا ۴۵۰۰ همگرا شده و به نتیجه نهایی می‌رسیدند.

ه) روش آزمایشگاهی

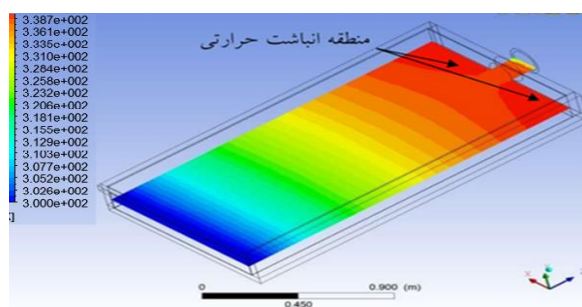
برای بدست آوردن دما در نقاط مختلف خشک کن خورشیدی، صفحه جمع کننده به سه قسمت مساوی تقسیم شد و در هر قسمت سه ترموکوپل (از نوع K) نصب گردید. یکی از ترموکوپل‌ها در ابتدای صفحه، دیگری در وسط صفحه و سومی در انتهای صفحه نصب شد. برای کنترل دمای هوای محیط ترموکوپل دیگری در کنار خشک کن نصب گردید. مقادیر سرعت و دمای هوای بدست آمده از نقاط مختلف صفحه جاذب در نقاط مشخص شده با داده‌های خروجی از تحلیل سه بعدی CFD مقایسه شده و بر این اساس اعتبارسنجی داده‌های تحلیلی صورت گرفت. در این تحقیق مبنای دمای خروجی از صفحه جاذب می‌باشد. پس از آن میزان حرارت خارج شده از صفحات مختلف جمع کننده با ساختارهای متفاوت با هم مقایسه شد.

جدول ۱. خصوصیات هوا و مواد استفاده شده در صفحه جمع کننده

مواد	چگالی (kg/m ³)	رسانایی گرمایی (W/m.K)	گرمای ویژه (J/kg.K)
هوا	۱/۲۲۵	۰/۰۲۴۲	۱۰۰۶/۴
شیشه	۲۵۷۹	۰/۹۶	۸۴۰
استیل	۷۸۷۴	۸۰	۴۵۰
چوب	۷۰۰	۰/۱۷۳	۲۳۱۰

نتایج و بحث

میزان تغییرات تابش خورشیدی دریافتی توسط صفحه جاذب در طول روزهای آزمایش در سه سطح سرعت هوا در شکل‌های ۳ تا ۵ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که سرعت سیال در درون صفحه جمع کننده هیچ تاثیری بر داده‌های حاصل از سنجش میزان تابش خورشیدی نداشتند. همانطور که



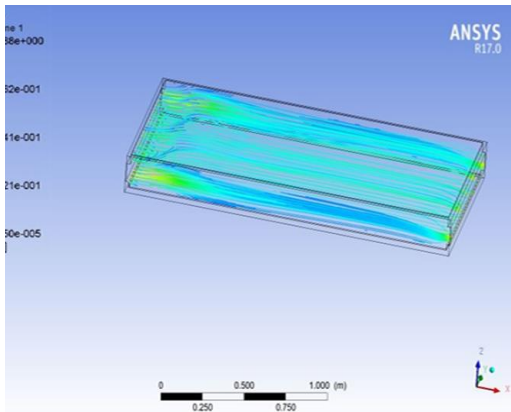
الف) روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب

شکل ۴. توزیع خطوط جریان و روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب با خروجی دایره‌ای

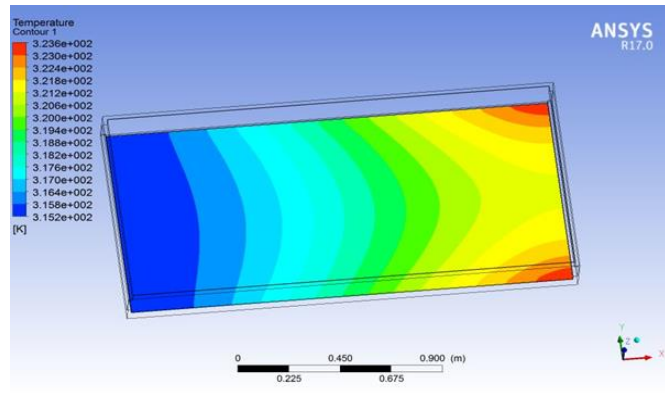
خروجی متخلخل به علت توزیع یکنواخت هوا در خروجی، کمترین میزان انباشت در صفحه جاذب مشاهده شد. وجود سوراخ‌ها در انتها مانع از حرکت سریع هوا شده و از آنجایی که هوای سرد معمولاً در سطح پایین و هوای گرم در سطح بالا قرار می‌گیرد، در اثر رسیدن هوا به سوراخ‌ها و برخورد به سطح داغ صفحه هوای سرد پایین نیز مثل هوای گرم رویی داغ شده و هوا به طور یکنواخت گرما را از صفحه خارج می‌کند و این عامل سبب بهبود گرمای خروجی از صفحه و همچنین مانع از انباشت حرارتی در انتهای صفحه می‌شود.

شکل (۵) نتایج حاصل از تحلیل گرمایی در سطح صفحه با خروجی معمولی را نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل نیز مشخص است به علت عدم ایجاد آشفتنگی در محدوده ورودی هوا تا خروجی، هوا با سرعت بیشتری نسبت به سایر حالت‌ها از سطح صفحه عبور کرده و خاصیت گلخانه‌ای کمتری برای گرمایش سیال ایجاد می‌گردد و در گوشه‌ها نیز انباشت گرمایی اتفاق می‌افتد که متأسفانه به علت عدم جریان هوا در گوشه‌ها قابل استحصال نبوده و به صورت تلفات گرمایی درمی‌آید.

در شکل (۶) روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب با خروجی متخلخل نشان داده شده است. در صفحه جاذب با

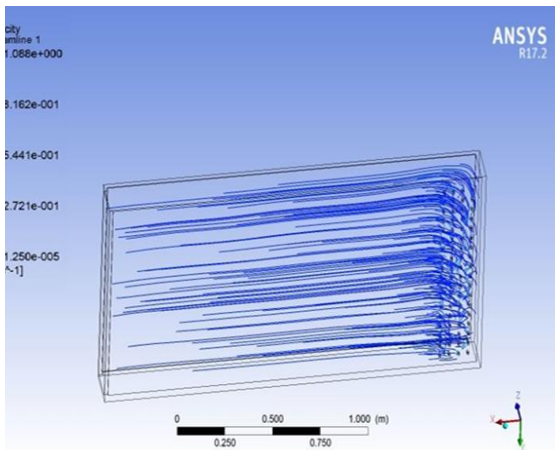


ب) توزیع خطوط جریان در سطح صفحه جاذب

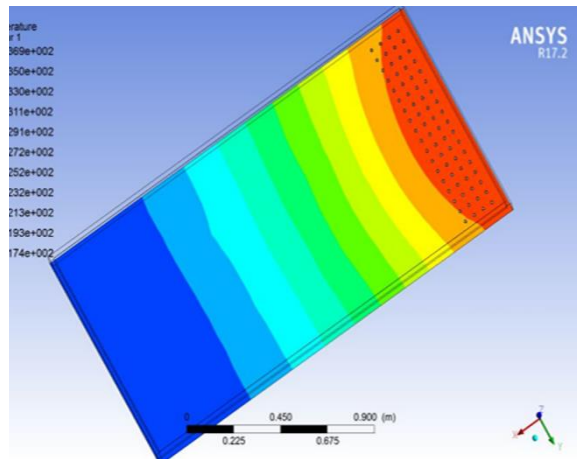


الف) روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب

شکل ۵. توزیع خطوط جریان و روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب با خروجی معمولی



ب) نحوه توزیع خطوط جریان در سطح صفحه جاذب



الف) روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب

شکل ۶. توزیع خطوط جریان و روند انتقال حرارت در سطح صفحه جاذب با خروجی متخلخل

مشخص می‌باشد در سطح انتهایی صفحه جاذب با خروجی متخلخل نسبت به نوع معمولی و دایره‌ای کاهش پیدا کرد و از اتلاف حرارتی در انتهای صفحه جلوگیری بعمل آمده است. این

در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ تغییرات دمایی در سه سطح صفحات با خروجی مختلف در سطح ۲ متر برثانیه که بطور آزمایشگاهی استخراج گشته، آورده شده است. همانطور که

روش مناسبی برای پیش بینی دما و سرعت هوای هر نقطه از صفحه جمع کننده خورشیدی می باشد و مدل های آشفستگی انتخاب شده، مدل های مناسبی جهت تحلیل می باشند.

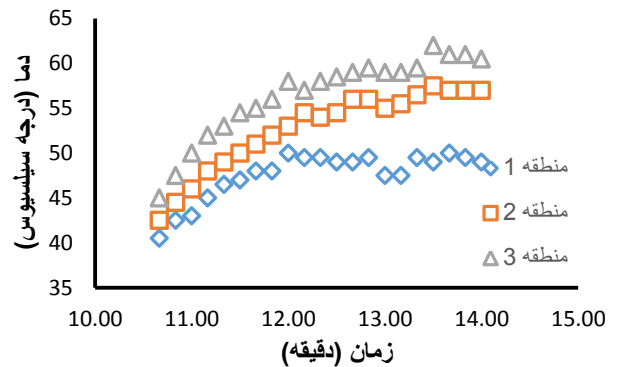
جدول ۲. نتایج ضرایب همبستگی در سه سطح سرعت و سه نوع صفحه جاذب با خروجی مختلف

مقدار R ²	سطح سرعت (m/s)	نوع صفحه
۰/۹۸۴۹	۰/۵	با خروجی معمولی
۰/۹۸۸۵	۱	
۰/۹۸۳۱	۲	
۰/۹۷۴۹	۰/۵	با خروجی دایره ای
۰/۹۶۹۶	۱	
۰/۹۷۷۴	۲	
۰/۹۷۷۶	۰/۵	با خروجی متخلخل
۰/۹۷۴۶	۱	
۰/۹۷۷۶	۲	

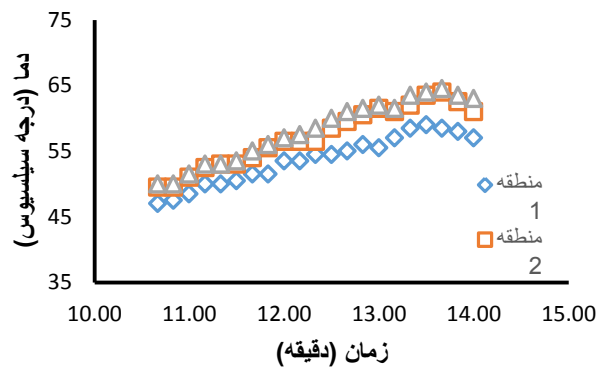
در صفحات جاذب، میانگین اختلاف بین دو حالت (تحلیلی با واقعی) پنج درجه سلسیوس است (Ingle et al., 2013). از آنجائی که در ساعات قبل از ظهر اختلاف بین دمای هوای صفحه جاذب و دمای هوای محیط زیاد است، بنابراین نرخ افزایش دما بیشتر از ساعات بعد از ظهر است. نتایج مشابه را می توان در تحقیقات محققان دیگر مشاهده نمود (Ingle et al., 2012 and Adeniyi et al., 2013). همانطور که اشاره شد، نبود جریان در گوشه های انتهایی صفحه جمع کننده باعث بوجود آمدن انباشت حرارتی در گوشه های دو نوع صفحه جاذب با خروجی دایره ای و خروجی معمولی می شود که با تغییر این نوع خروجی ها به خروجی متخلخل از انباشت حرارتی در گوشه ها جلوگیری شده است.

نتایج بدست آمده از تحلیل CFD برای حالت با خروجی متخلخل نشان داد که دمای خروجی از صفحه جمع کننده به اندازه ۱۳ درجه سلسیوس نسبت به حالت با خروجی معمولی افزایش دما پیدا کرده است. دلیل این امر وجود سوراخ ها در انتهای صفحه می باشد که سبب کاهش سرعت حرکت جریان هوا و همچنین آشفستگی در جریان گشته و این آشفستگی باعث گرفتن انباشت حرارتی از انتهای صفحه شده و راندمان صفحه جمع کننده را بهبود می بخشد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل CFD حالت با خروجی دایره ای نشان داد که دما در حالت با خروجی متخلخل نسبت به حالت دایره ای دو درجه کاهش داشته است اما از آنجایی که این مقدار دما بیشتر به صورت انباشت حرارتی بوده و قابل استحصال نمی باشد بنابراین تاثیری در بهبود عملکرد صفحه نداشته است از سوی دیگر، نکته قابل

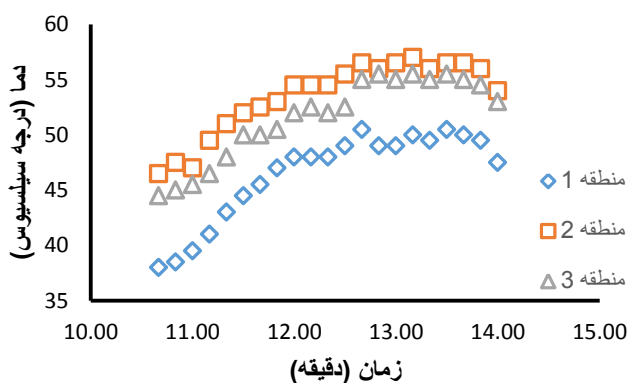
اتلاف حرارتی از خروجی صفحه به سمت محفظه خشک کن هدایت شده و باعث افزایش بازده حرارتی صفحه می گردد.



شکل ۷. روند تغییرات دمای آزمایشگاهی در سطح صفحه با خروجی معمولی در سطح سرعت ۲ متر بر ثانیه



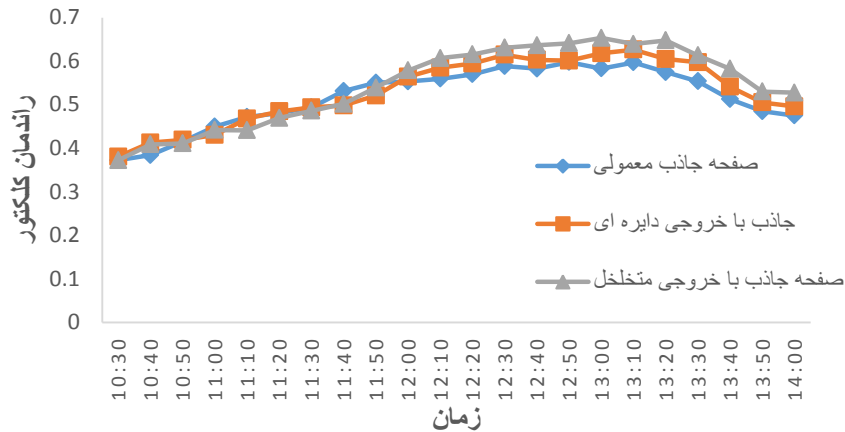
شکل ۸. روند تغییرات دمای آزمایشگاهی در سطح صفحه با خروجی دایره ای در سطح سرعت ۲ متر بر ثانیه



شکل ۹. روند تغییرات دمای آزمایشگاهی در سطح صفحه با خروجی متخلخل در سطح سرعت ۲ متر بر ثانیه

نتایج داده های آزمایشگاهی که از نقاط مختلف صفحه جمع کننده جمع آوری شده بودند، با داده های خروجی از نرم افزار شبیه سازی با CFD در سرعت های مختلف مقایسه شدند. نتایج آماری نشان داد که همبستگی خوبی میان داده های پیش بینی شده توسط CFD و داده های آزمایشگاهی وجود دارد. در جدول (۲) ضرایب تبیین در سه نوع صفحه جاذب با خروجی مختلف و سه سطح سرعتی ارائه شده است که بیان کننده این مطلب می باشد که روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD)

این فاصله و ارتباط نزدیک بین صفحه جمع کننده با ورودی محفظه بین سه درجه سلسیوس کاهش پیدا کرده است. شکل ۱۰ روند تغییرات راندمان حرارتی را در صفحات جاذب با خروجی های مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۰. روند تغییرات راندمان صفحات جاذب با خروجی های مختلف

توجه آن است که در طول مسیر انتقال از صفحه جمع کننده به کابینت خشک کن افت حرارتی به اندازه شش درجه سلسیوس وجود دارد که ناشی از فاصله بین جمع کننده تا ورودی محفظه خشک کن می باشد. اما در مدل با خروجی متخلخل با کاهش

تجربی نشان دادند که همبستگی خوبی بین داده ها وجود دارد و روش تحلیلی می تواند روش بسیار مناسبی برای پیش بینی روند انتقال حرارت در صفحات جمع کننده خورشیدی باشد. همچنین نتایج حاصل از CFD نشان دادند که می توان با تغییر در شکل خروجی جمع کننده خورشیدی میزان انباشت حرارتی را کاهش داده و سبب افزایش دما در خروجی صفحه جمع کننده شد. در صفحه جاذب با خروجی معمولی مقدار راندمان برابر با ۵۸ درصد و در صفحه جاذب با خروجی دایره ای مقدار آن برابر با ۶۲ درصد و در صفحه جاذب با خروجی متخلخل این مقدار ۳ درصد افزایش یافته و به مقدار ۶۵ درصد رسید.

نتیجه گیری

در این تحقیق روند جریان هوا و چگونگی توزیع دما در نقاط مختلف سه نوع صفحه جاذب با خروجی های مختلف در خشک کن خورشیدی کابینتی در سه سرعت ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه با استفاده از نرم افزار انسیس و زیر مجموعه CFD مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت و با داده های تجربی حاصل از آزمایش ها مقایسه گردید. دمای خروجی در هر دو حالت تحلیلی و آزمایشگاهی با گذشت زمان ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس با کاهش میزان تابش خورشیدی روند کاهشی به خود گرفت (از ۱۰۵۰ به ۹۷۰ وات بر متر مربع). مقایسه داده های تحلیلی و

REFERENCES

Adeniyi, A. A., Mohammed, A., & Aladeniyi, K. (2012). Analysis of a Solar Dryer Box with Ray Tracing CFD Technique. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(10).

Aghanajafi, S., and Dehghani, A. (2007). Advanced Solar Radiation and Industrial Applications. Ph. D. dissertation, Khaje Nasir Toosi University press, Tehran. (In Farsi)

Aghbashlo, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2865-2871.

Aghkhani, M. H., Abasspour-Fard, M. H., Bayati, M. R., Morteza pour, H., Saedi, S. I., & Moghimi, A. (2013). Performance analysis of a solar dryer equipped with a recycling air system and desiccant chamber. *Journal of Agricultural Machinery*, 3(2), 92-103 (In Farsi)

Bagheri, H. (2008). Design, construction and Evaluation of a Vegetable Dryers Laboratory Model. MSc Thesis, Agrotechnology Dept., Abourihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi)

Bennamoun, L., & Belhamri, A. (2003). Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of food engineering*, 59(2), 259-266.

Darabi, H., Zomorodian, A., Akbari, M. H., & Lorestani, A. N. (2015). Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 359-366.

Dović, D., & Andrassy, M. (2012). Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances. *Solar energy*, 86(9), 2416-2431.

Gunjo, D. G., Mahanta, P., & Robi, P. S. (2017). CFD

- and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. *Renewable Energy*, 106, 24-36.
- Harris, D. J., & Helwig, N. (2007). Solar chimney and building ventilation. *Applied Energy*, 84(2), 135-146.
- Holman, J.P. (2002) *Heat transfer* (10th ed). Mc-Grow Hill, Southern Methodist University, New York.
- Hu, J., Sun, X., Xu, J., & Li, Z. (2013). Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles. *Energy and Buildings*, 62, 230-238.
- Hung, T. C., Huang, T. J., Lee, D. S., Lin, C. H., Pei, B. S., & Li, Z. Y. (2017). Numerical analysis and experimental validation of heat transfer characteristic for flat-plate solar air collector. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1025-1038.
- Ingle, P.W., Pawar, A.A., Deshmukh, B.D., and Bhosale, K.C. (2013). CFD Analysis of Solar Flat Plate Collector. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(4), 337-342.
- Kieviet, F. G., Van Raaij, J., De Moor, P. P. E. A., & Kerkhof, P. J. A. M. (1997). Measurement and modelling of the air flow pattern in a pilot-plant spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 75(3), 321-328.
- Mirade, P. S. (2003). Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (CFD) models. *Journal of Food Engineering*, 60(1), 41-48.
- Pandey, K. M., & Chaurasiya, R. (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 641-650.
- Sahu, A. K., Kumar, P., Patwardhan, A. W., & Joshi, J. B. (1999). CFD modelling and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Science*, 54(13-14), 2285-2293.
- Sámano Delgado, E., Martinez-Flores, H. E., Garnica-Romo, M. G., Aranda-Sanchez, J. I., Sosa-Aguirre, C. R., De Jesuse Cortes-Penagus, C. O. N. S. U. E. L. O., & Fernandez-Munoz, J. L. (2013). Optimization of solar dryer for the dehydration of fruits and vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 489-495.
- Samimi-Akhijahani H. (2015). Design, construction and Evaluation of a hybrid solar dryer using fluid circulation. Ph. D. dissertation, Agrotechnology Dept., Abourihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Selmi, M., Al-Khawaja, M. J., & Marafia, A. (2008). Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. *Renewable energy*, 33(3), 383-387.
- Shahi, N. C., Khan, J. N., Lohani, U. C., Singh, A., & Kumar, A. (2011). Development of polyhouse type solar dryer for Kashmir valley. *Journal of food science and technology*, 48(3), 290-295.
- Varol, Y., & Oztop, H. F. (2008). A comparative numerical study on natural convection in inclined wavy and flat-plate solar collectors. *Building and Environment*, 43(9), 1535-1544.
- Yongson, O., Badruddin, I. A., Zainal, Z. A., & Narayana, P.A. (2007). Airflow analysis in an air conditioning room. *Building and environment*, 42(3), 1531-1537.
- Zamanian, M., Zomoradian, A. (2013). Effect of lattice absorbent porosity on the efficiency of solar air heater with staircase cover of glass. *Two Iranian Journal of Biomedical Engineering*, 2, 113-118. (In Farsi)
- Zhao, X., Wang, Z., & Tang, Q. (2010). Theoretical investigation of the performance of a novel loop heat pipe solar water heating system for use in Beijing, China. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2526-2536.