نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص: ۳۱- ۴۷

J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 2, 2023: 31−47

DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1

مدل سازی عددی تاثیر استفاده از مولد گردابه و تغییر هندسه سطح کلکتور خورشیدی بر روی جذب تابش خورشید در یک خشک‌کن خورشیدی آب گرم

حسن غفوری ورزنه [۱و*] و مصطفی حیدری ورنامخواستی [۲]

*۱- استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان) ، اصفهان، ایران،
۲- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان) ، اصفهان، ایران،

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

کیفیت خشک کردن در خشک‌کن‌های خورشیدی به انتقال حرارت در داخل خشک کن و پارامترهای عملکردی مانند افت فشار و ضریب کارایی بستگی دارد. لذا هدف از این پژوهش بررسی اثر هندسه خشک‌کن، مولد گردابه جریان، شدت تابش و عدد رینولدز بر انتقال حرارت، افت فشار و ضریب کارایی خشک‌کن خورشیدی می‌باشد. برای این منظور سه هندسه مختلف شامل کانال با سطح کاملا صاف، کانال با سطح کنگره‌دار و کانال دارای آشفته‌گر جریان در نظر گرفته شد که هر سه تحت تابش شار حرارت خورشیدی مشخص و یکنواخت قرار داشتند. برای هر یک از حالت‌های فوق و برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰، ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۵۰۰ و شدت تابش‌های خورشیدی ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ وات بر متر مربع، مقدار عدد ناسلت متوسط، افت فشار در داخل کانال و فاکتور کارآیی محاسبه شد. نتایج نشان داد که استفاده از کانال داری مولد گردابه‌ای و سطح کنگره‌دار نسبت به کانال ساده، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، در عین حال که افت فشار افزایش می‌یابد، عدد ناسلت متوسط نیز افزایش می‌یابد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** hasangh28@gmail.com و h.ghafori@khuisf.ac.ir

کلمات کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، ضریب کارایی عملکرد، دینامیک سیالات محاسباتی، مولد گردابه

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین منبع‌های انرژی پاک و تجدیدپذیر که به صورت رایگان در اختیار می‌باشد، انرژی خورشیدی است. استفاده از این منبع انرژی بر خلاف سوخت‌های فسیلی دارای محدودیت نمی‌باشد و همچنین تولید آلاینده‌های زیست محیطی نمی‌کند [1]. در کشور ایران با توجه به میزان تابش خورشید به خصوص در بخش کویری و میانی کشور، استفاده از این انرژی در طی چند سال گذشته بسیار مورد توجه واقع شده است. از سوی دیگر خشک کردن مواد غذایی با استفاده از انرژی خورشیدی از دیرباز مورد استقبال انسان بوده است [2]. زیرا با خشک کرن مواد غذایی و کاهش رطوبت داخل آن، می‌توان طول عمر نگهداری مواد غذایی را افزایش، حجم آنها را کاهش داد و در نتیجه انبارداری و حمل و نقل آنها را ساده‌تر کرد[3-5]. در گذشته خشک کردن مواد غذایی اغلب در هوای آزاد و به روش‌های سنتی انجام می‌شد. اما استفاده از روش‌های سنتی دارای معایبی نظیر کاهش کیفیت ماده خشک شده، عدم امکان خشک کردن مواد غذایی در مقیاس صنعتی، آلودگی مواد غذایی و غیره

نحوه استناد به این مقاله: حسن غفوری ورزنه و مصطفی حیدری ورنامخواستی. مدل سازی عددی تاثیر استفاده از مولد گردابه و تغییر هندسه سطح کلکتور خورشیدی بر روی جذب تابش خورشید در یک خشک‌کن خورشیدی آب گرم. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۲) :۳۱-۴۷. DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

می‌باشد [6]. لذا در دهه¬های اخیر استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن صنعتی با هدف افزایش کیفیت و بهره‌وری فرآیند خشک کردن توسعه داده شده است. در این میان دستگاه‌های خشک‌کن خورشیدی به دلیل رایگان بودن انرژی خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [7]. مهمترین چالش بر سر راه استفاده از انرژی خورشیدی، پایین بودن بازدهی حرارتی کلکتورهای خورشیدی می‌باشد که باعث می‌شود استفاده از انرژی خورشیدی از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه نباشد [2]. برای حل این مشکل، یک راهکار عملی افزایش بازدهی حرارتی کلکتورهای خورشیدی می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر هدف، ارایه راهکارهایی برای افزایش بازدهی حرارتی کلکتور خورشیدی استفاده شده در دستگاه خشک‌کن خورشیدی می‌باشد.

بررسی عددی کلکتورهای خورشیدی هوا خنک و کاربرد آنها برای خشک کردن غیر مستقیم تکه‌های موز و آنالیز انرژی و اگزرژی نشان دادند که استفاده از جاذب با سطح اعوجاج‌دار می‌تواند ضریب انتقال حرارت را بین جریان هوا و جاذب افزایش دهد [8]. محققین برای مدل‌سازی مساله خود یک مدل عددی را توسعه دادند و نتایج آن را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. همچنین سینتیک خشک کردن قطعه‌های موز را نیز مورد بررسی قرار دادند و عملکرد کلکتور را برای زاویه‌های اعوجاج و طول‌های مختلف اعوجاج بررسی کردند. در نهایت مشخص شد که بازدهی خشک‌کن طراحی شده در بازه ۶۴/۵٪ تا ۳۰/۵۵٪ می‌باشد. بهبود عملکرد حرراتی خشک‌کن خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در موقعیت‌های مختلف کلکتور خورشیدی نیز توسط سایر محققین بررسی شد [9]. در این تحقیق با استفاده از روش تجربی نشان داده شد که انرژی مصرفی برای خشک کردن سیب‌زمینی در حدود ۱۱/۱۲ تا ۹/۰۱ مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد. همچنین مشخص شد که در صورت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌توان زمان خشک کردن را در حدود ۲۱/۸۷٪ کاهش و بازدهی کلکتور را ۵/۰۲٪ تا ۱۰/۱۳٪ افزایش داد. در پژوهش انجام شده روی خشک‌کن خورشیدی با کلکتور لوله‌ای و سیال آب، مشخص شد که با گذشت زمان، روند تغییرات درجه حرارت با زیادتر شدن تابش خورشیدی صعودی می‌باشد و همچنین نیاز به یک سیستم کمکی حرارتی برای زمان‌هایی که تابش خورشیدی کافی نمی‌باشد، وجود دارد [10]. همچنین مشخص شد که بیشترین انرژی خروجی در ساعت‌های ۱۲ تا ۱۶ حاصل می‌شود. در تحقیقی که به منظور طراحی، ساخت و آزمایش خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای فلفل قرمز و انگور انجام شد، نشان داده شد که برای کاهش رطوبت فلفل قرمز تا حد ۱۶ درصد در حالت معمول حداقل به ۲۴ ساعت زمان برای خشک کردن نیاز است در صورتی که با استفاده از خشک‌کن گلخانه‌ای این مقدار به ۱۷ ساعت کاهش پیدا می‌کند [11]. همچنین برای کاهش رطوبت انگور به ۱۸٪ در حالت معمول به ۷۶ ساعت زمان نیاز است در صورتی که با استفاده از خشک‌کن گلخانه‌ای این زمان ۵۰ ساعت می‌شود. بررسی تجربی استفاده از یک سیستم خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن فرش با استفاده از یک گرم‌کن خورشیدی بر اساس استاندارد ASHRAE 93-2010 نشان داد که میزان راندمان حرارتی سیستم خورشیدی طراحی شده نهایتا ۴۸٪ می‌باشد [12]. بررسی عددی تاثیر چرخ‌های خشک‌کن دوار بر روی عملکرد حرارتی خشک-کن‌های خورشیدی نشان داد، استفاده از چرخ خشک‌کن دوار در واحدهای خشک‌کن خورشیدی، دمای خشک کردن هوا از ۶۵ به ۸۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و در مقابل رطوبت از ۱۵ به ۸,۸ کاهش می‌یابد [13].

بررسی منابع نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌های پیشین به صورت آزمایشگاهی انجام شده و اثرات تغییر هندسه خشک‌کن کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در تحقیقات صورت گرفته، معمولا به بررسی انتقال حرارت پرداخته شده است و سایر پارامترهای عملکردی مانند افت فشار و ضریب کارایی کمتر بررسی شده است. لذا هدف از این پژوهش بررسی اثر هندسه، مولد گردابه، شدت تابش و عدد رینولدز بر انتقال حرارت، افت فشار و ضریب کارایی می‌باشد تا در انتها بهینه ترین حالت انتخاب شود.

معادلات حاکم

معادله بقای جرم یا پیوستگی در دستگاه مختصات دکارتی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی سیال u، v و w مؤلفه‌های سرعت است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

معادله اندازه حرکت برای سیال تراکم ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g_x+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (۲)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\rho g_y+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (۳)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g_z+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (۴)$$

در رابطه فوق عبارات g_x، g_y و g_z بردار نیروی گرانشی می¬باشد.

معادله‌ی انرژی برای جریان سیال تراکم ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\rho\dot{q}_g+k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right] \quad (۵)$$

عبارت $2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right]$ نرخ تلفات لزج[1] نامیده می‌شود.

در پژوهش حاضر برای مدل سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استفاده شد. در مدل‌های $k-\varepsilon$ میدان آشفته برحسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفته و انرژی اغتشاش بیان می‌شود. در این مدل، معادلات پیوستگی و مومنتوم به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (۶)$$

$$\frac{\partial\rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial P'}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu_{ref}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+S_M \quad (۷)$$

S_M مجموع نیروهای جسمی، μ_{ref} لزجت مؤثر و P' فشاری است که با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$P'=P+\frac{2}{3}\rho k+\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (۸)$$

مدل $k-\varepsilon$ بر مفهوم لزجت گردابه‌ای بیان شده و $\mu_{ref}=\mu+\mu_t$ است. در این مدل فرض می‌شود که μ_t مطابق رابطه‌ی زیر به انرژی جنبشی جریان و افت انرژی بستگی دارد.

$$\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۹)$$

C_μ عددی ثابت است. مقدار k و ε مستقیماً از معادلات دیفرانسیلی انتقال انرژی جنبشی و نرخ افت انرژی اغتشاش به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial\rho k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\rho\varepsilon+P_{kb} \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial\rho\varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon1}P_k-C_{\varepsilon2}\rho\varepsilon+C_{\varepsilon1}P_{\varepsilon b}$$

$C_{\varepsilon1}$، $C_{\varepsilon2}$، σ_k و σ_ε مقادیر ثابت هستند. P_{kb} و $P_{\varepsilon b}$ تأثیر نیروهای شناوری را بیان می‌کنند. P_k تولید اغتشاش بر اثر نیروهای ویسکوز است.

$$P_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j}+\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}(3\mu_t\frac{\partial u_k}{\partial x_k}+\rho k) \quad (۱۱)$$

[1] viscous dissipation rate

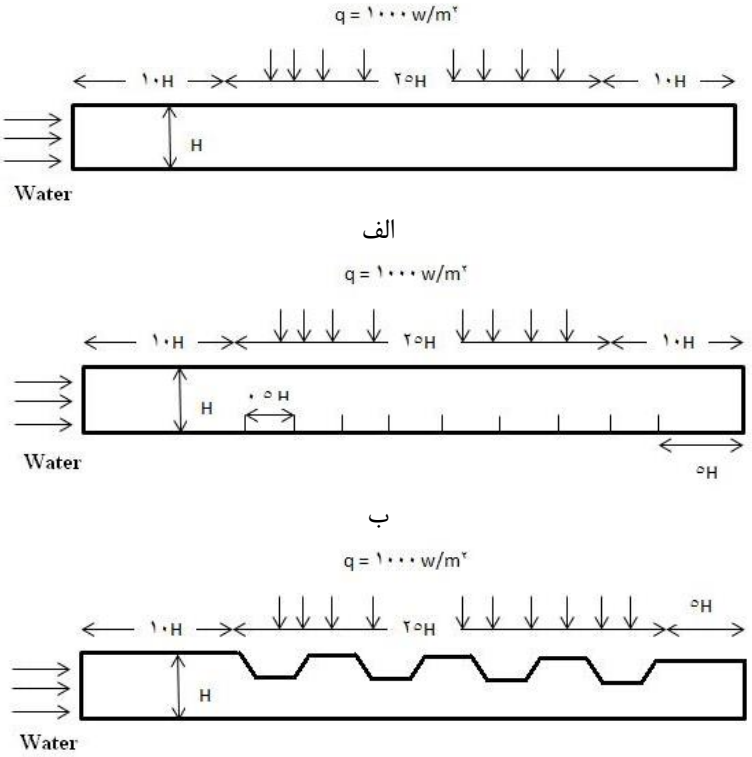
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

۲-مواد و روشها

هندسه مساله

در این پژوهش به بررسی سه نوع کانال مختلف برای کلکتور خورشیدی پرداخته می‌شود. هندسه‌های در نظر گرفته شده از مراجع [۱۴] و [۱۵] الگو برداری شده است با این تفاوت که در این پژوهش‌ها، مولدهای دوطرفه در نظر گرفته شده است اما در این پژوهش از مولد یک طرفه استفاده می‌شود.



شکل ۱- هندسه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر

یکی از کانال‌ها دارای سطح کاملا صاف (شکل ۱-الف) و دیگری دارای آشفته‌گر جریان می‌باشد (شکل ۱-ب) که جریان سیال را متلاطم می‌کند. همچنین کانال سوم (شکل ۱-ج) دارای سطح کنگره‌دار است که منجر به افزایش سطح دریافت تابش خورشیدی می‌شود. قابل ذکر است که ارتفاع کنگره‌ها در شکل ب برابر ۰/۲H و در شکل ج برابر H/3 می‌باشد.

تمامی هندسه¬های فوق برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰، ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۵۰۰ و همچنین شدت تابش¬های خورشیدی ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ وات بر متر مربع بررسی شدند و در هر حالت میزان افت فشار داخل کانال، عدد ناسلت متوسط و مقدار فاکتور کارآیی۱ (PEC) محاسبه شدند. فاکتور کارآیی (PEC) به صورت نسبت عدد ناسلت به افت فشار بیان می‌شود (رابطه ۱۲).

$$PEC=Nu/\Delta p \qquad (۱۲)$$

همچنین کانتورهای جریان، فشار و دما در هر حالت رسم شده و بهترین کانال با توجه به مقدار PEC معرفی شد.

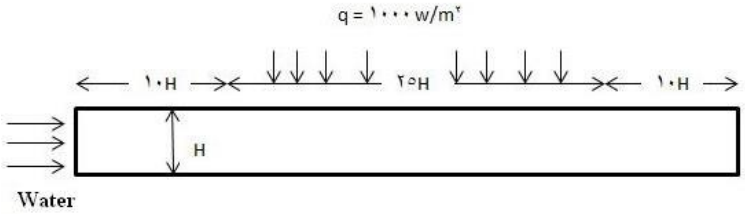
[1] performance evaluation criterion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

بررسی استقلال حل از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکه، ساده‌ترین هندسه کانال مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شد. شرط مرزی ورودی از نوع ورودی جریان جرمی و شرط مرزی خروجی از نوع خروجی فشار می‌باشد. همچنین دمای سیال ورودی ۳۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شد.



شکل ۲- ساده‌ترین هندسه کانال

با فرض این که H برابر با ۱/۷۵ سانتی‌متر باشد و سیال عبوری از کانال، آب باشد، مش‌بندی برای سه حالت مختلف انجام شد و مساله حل گردید. لازم به ذکر است که عدد رینولدز سیال در ورودی برابر با ۳۰۰۰ فرض شد. در هر حالت عدد ناسلت متوسط محاسبه گردید. نتایج عدد ناسلت متوسط به ازای مش بندی¬های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مقایسه عدد ناسلت برای حالت¬های مختلف مش‌بندی

حالت	تعداد المان¬ها	عدد ناسلت متوسط
۱	۲۶۲۸۴	۳۹/۹۸
۲	۳۸۳۴۲	۳۷/۸۵
۳	۹۳۹۶۹	۳۷/۰۳

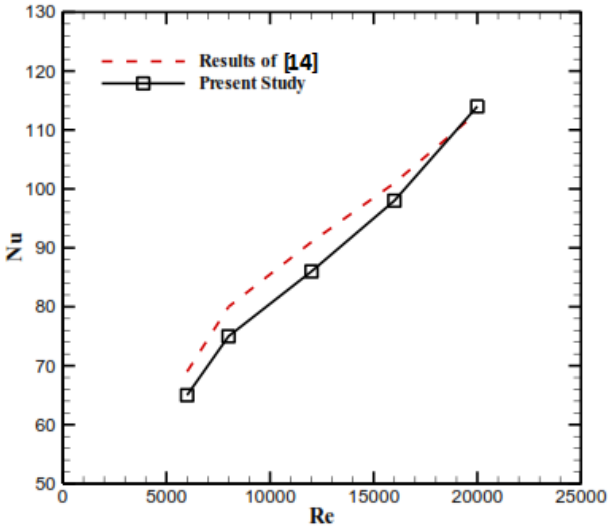
همان طور که از جدول ۱ می¬توان مشاهده نمود، با افزایش تعداد المان¬ها از ۲۶۲۸۴ به ۳۸۳۴۲(یعنی افزایش بیش از ۴۵٪ تعداد المان¬ها) مقدار عدد ناسلت در حدود ۵/۶۲٪ تغییرات را نشان می¬دهد که مقدار زیادی محسوب می¬شود. اما با افزایش تعداد المان¬ها از ۳۸۳۴۲ به ۹۳۹۶۹ (افزایش بیش از ۱۴۵٪) مقدار عدد ناسلت تنها در حدود ۲/۲۱٪ تغییر می¬کند که مقدار ناچیزی محسوب می¬شود. در واقع با افزایش تعداد المان¬ها علی‌رغم افزایش شدید هزینه محاسباتی نتیجه نهایی تغییر زیادی را از خود نشان نمی¬دهد. در این حالت گفته می¬شود که حل از شبکه‌بندی مستقل شده است. بنابراین می¬توان مش بندی حالت دوم را به عنوان یک مش‌بندی که در آن حل، از مش‌بندی مستقل شده در نظر گرفت و در مراحل بعدی شبیه‌سازی استفاده نمود.

اعتبار سنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از داده¬های ارایه شده توسط مرجع [14] استفاده شد. آنها جریان را در داخل یک کانال دو بعدی مستطیلی شکل که تحت شار حرارتی ۶۰۰۰ وات بر متر مربع قرار دارد برای مقادیر مختلف عدد رینولدز محاسبه کردند. مقایسه داده¬های عددی حاصل از مدل ارایه شده در پژوهش حاضر و مقادیر ارایه شده توسط مرجع [14] در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳ و جدول ۲ می¬توان مشاهده نمود، داده¬های عددی به دست آمده در پژوهش حاضر با داده¬های ارایه شده توسط مرجع [14] همخوانی بسیار مناسبی دارد که بیانگر اعتبار مدل ارایه شده در این پژوهش می¬باشد. اندک اختلاف موجود نیز می¬تواند ناشی از روش حل عددی و خطاهای حل عددی باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]



شکل ۳- مقایسه داده¬های عددی پژوهش حاضر با داده¬های ارایه شده توسط محمد و همکارانش [14]

جدول ۲- مقادیر داده¬های عددی پژوهش حاضر و داده¬های ارایه شده توسط مرجع [14]

عدد Re	عدد Nu	
	مرجع [۱۴]	پژوهش حاضر
۶۰۰۰	۶۹/۱۶۰۴	۶۵/۱۱۱۲
۸۰۰۰	۷۸/۹۲۴۴	۷۵/۲۰۸۸
۱۲۰۰۰	۹۰/۰۰۹۸	۸۵/۹۵۶۶
۱۶۰۰۰	۱۰۰/۷۵۵۰	۹۸/۰۵۳۴
۲۰۰۰۰	۱۱۳/۱۸۹۰	۱۱۳/۸۶۴۰

۳- نتایج و بحث

ابتدا اثر پنج مقدار مختلف تابش خورشیدی (۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ وات بر متر مربع) و عدد رینولدز ۳۰۰۰ بر مقدار عدد ناسلت متوسط، افت فشار (اختلاف فشار ورودی و خروجی کانال) و فاکتور کارآیی برای یک کانال معمولی مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شد محاسبه می¬شود. نتایج در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. با تعریف PEC به صورت نسبت عدد ناسلت به افت فشار می¬توان حالت بهینه¬ای را برای کانال¬ها مشخص کرد. قابل ذکر است در تمامی نتایج این پژوهش، تحلیل¬ها بصورت دوبعدی انجام شده است.

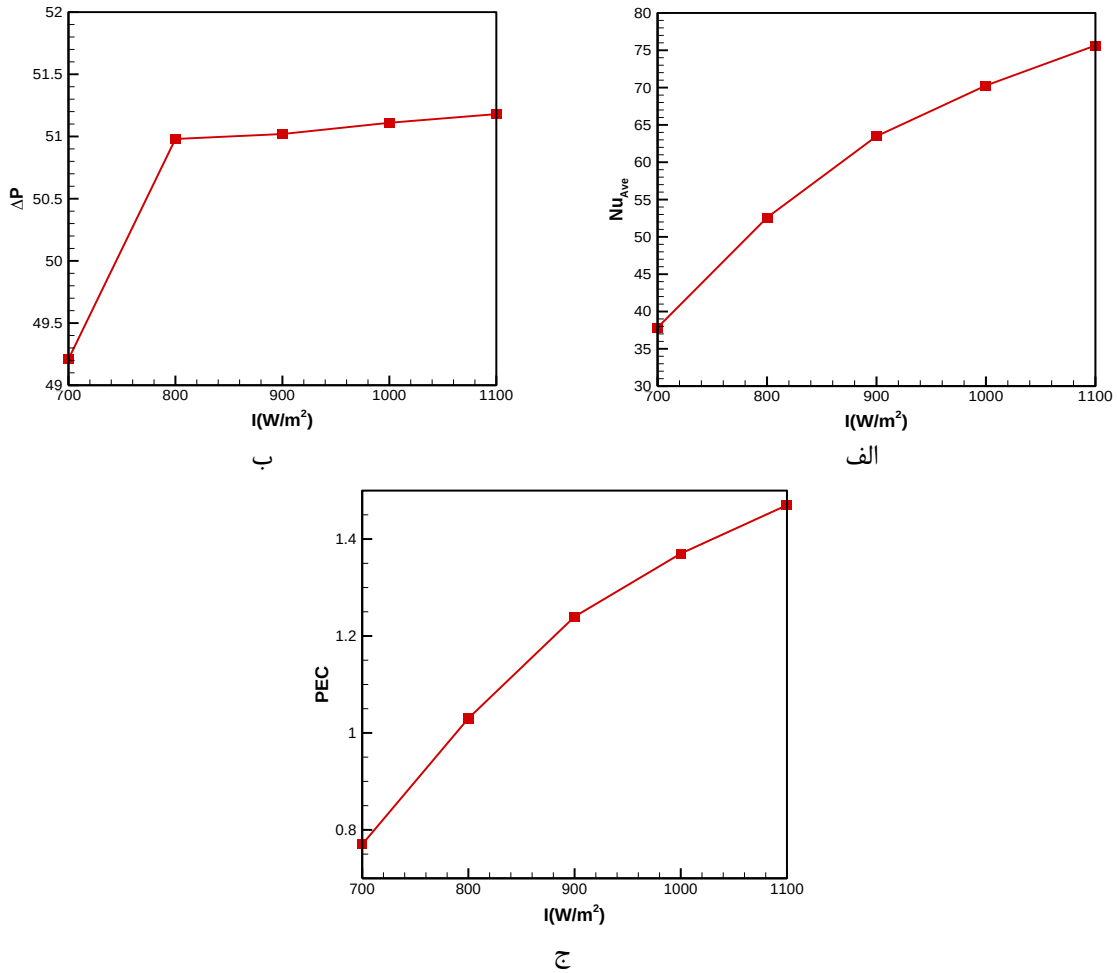
همانطور که در جدول ۳ و شکل۴ مشاهده می¬شود با زیاد شدن شدت تابش خورشیدی انتقال حرارت و به دنبال آن عدد ناسلت متوسط افزایش می¬یابد. علت این امر افزایش تبادل حرارتی بین مولکولهای سیال است اما همانطور که مشاهده می¬شود با افزایش شدت تابش مقدار افت فشار تغییر چندانی نمی¬کند زیرا افت فشار رابطه مستقیم با سرعت سیال و میزان آشفتگی¬های لحاظ شده در کانال دارد و از آنجا که کانال صاف و بدون کنگره بوده و عدد رینولدز ثابت است پس تغییر زیادی در افت فشار دیده نمی¬شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

جدول ۳- مقدار عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی در کانال ساده برای عدد رینولدز ۳۰۰۰

تابش خورشیدی ($\frac{W}{m^2}$)	عدد ناسلت متوسط	افت فشار(پاسکال)	PEC
۷۰۰	۳۷/۸۵	۴۹/۲۱	۰/۷۷
۸۰۰	۵۲/۵۸	۵۰/۹۸	۱/۰۳
۹۰۰	۶۳/۴۸	۵۱/۰۲	۱/۲۴
۱۰۰۰	۷۰/۲۸	۵۱/۱۱	۱/۳۷
۱۱۰۰	۷۵/۶۴	۵۱/۱۸	۱/۴۷



ب الف

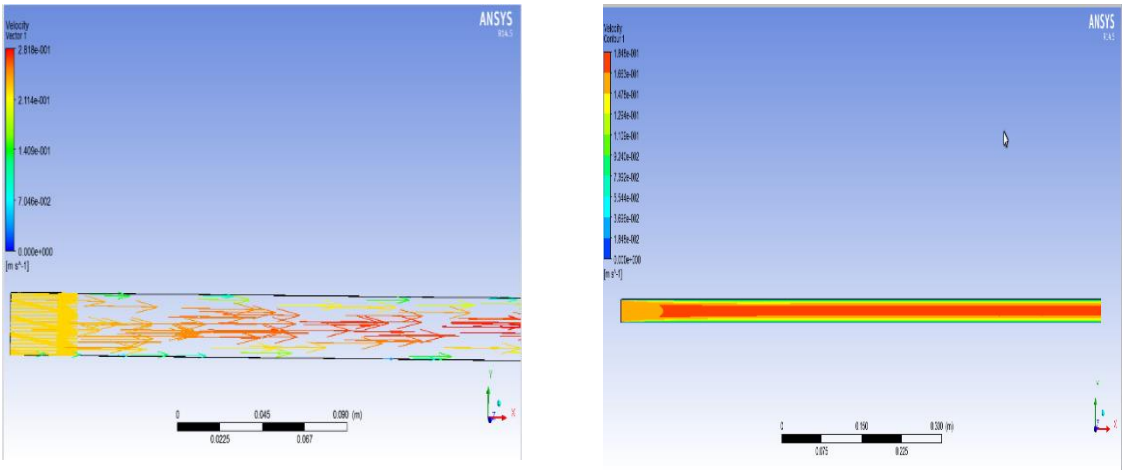
ج

شکل ۴- الف. مقدار عدد ناسلت متوسط، ب. افت فشار، ج. ضریب کارآیی، برای مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی و عدد رینولدز ۳۰۰۰ در کانال ساده

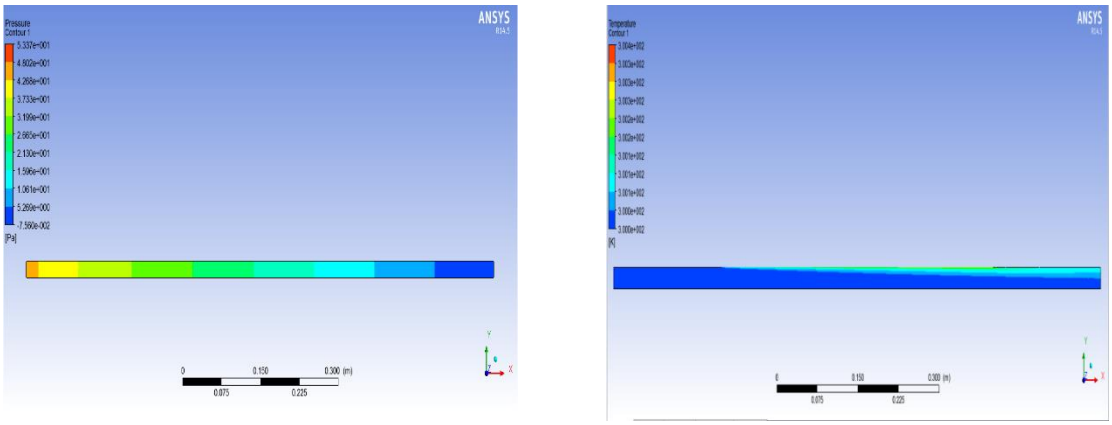
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می¬شود در ابتدای لوله لایه مرزی در حال شکل‌گیری می¬باشد و در نتیجه پروفیل سرعت در حال تغییر است اما با پیشروی در داخل کانال جریان به حالت کاملا توسعه یافته رسیده و در نتیجه کانتور سرعت تغییری را نشان نمی¬دهد. همچنین در شکل ۶ مشاهده می¬شود که در بخش ابتدایی لوله به دلیل این که هیچ شار حرارتی اعمال نمی¬شود، دمای سیال برابر با دمای ورودی باقی می¬ماند و با اعمال شار حرارتی، دما از سطح بالایی کم کم شروع به افزایش می¬کند و لایه مرزی حرارتی شکل می¬گیرد. فشار نیز هر چه در داخل لوله جریان پیش می¬رود با افت بیشتری مواجه می¬شود که بدیهی است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]



شکل ۵- کانتور سرعت در داخل کانال برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰



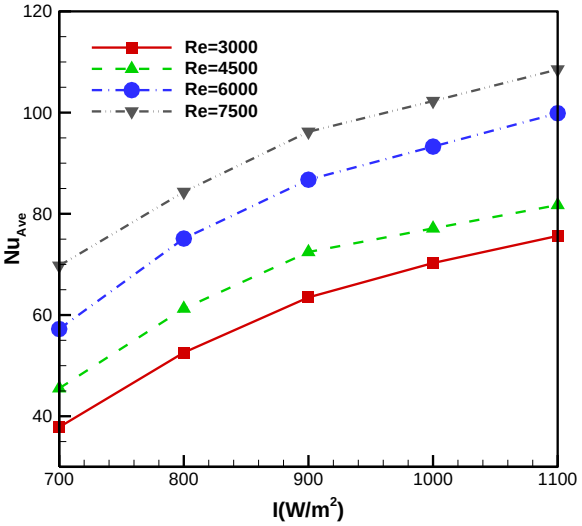
ب الف

شکل ۶- الف. کانتور دما، ب. کانتور فشار، در داخل کانال برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

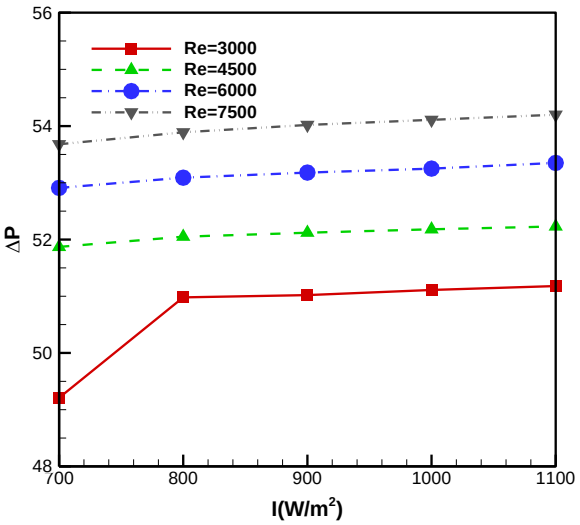
نتایج برای اعداد رینولدز ۴۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۵۰۰ در شکل¬های ۷ تا ۹ آورده شده است. تغییرات عدد بی بعد ناسلت به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷ مشاهده می¬شود که با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی مقدار عدد بی‌بعد ناسلت افزایش می¬یابد. در واقع با افزایش عدد رینولدز جریان آشفته‌تر می¬شود و آشفته‌تر شدن جریان منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می¬گردد. همچنین در شکل ۸ مشاهده می¬شود که با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی میزان افت فشار نیز افزایش می¬یابد که علت آن افزایش تلفات ویسکور در اثر آشفته‌تر شدن جریان می¬باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

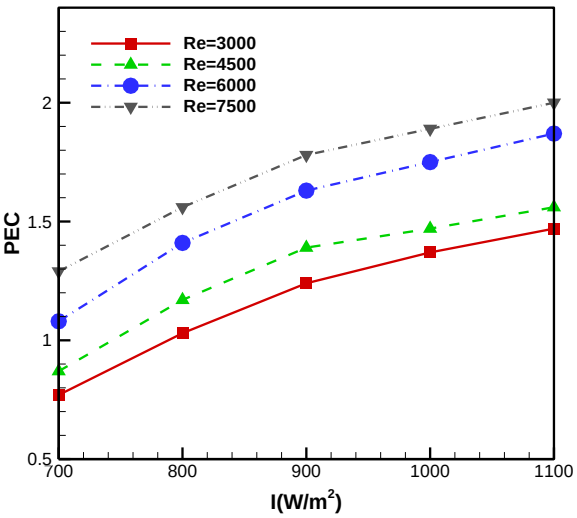


شکل ۷- مقدار عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی و اعداد رینولدز مختلف در کانال ساده

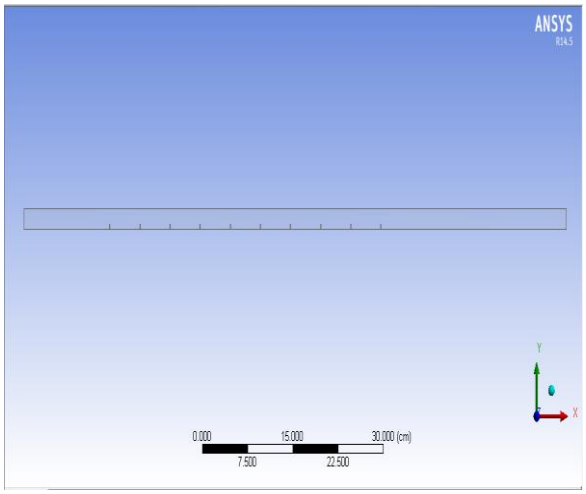


شکل ۸- تغییرات افت فشار به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی در کانال ساده

در شکل ۹ نیز نسبت عدد ناسلت به افت فشار نشان داده شده است که مشاهده می¬شود با افزایش عدد ربنولدز PEC بهبود می¬یابد. علت این امر افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و به دنبال آن افزایش مومنتوم جریان و بیشتر شدن تبادل حرارتی می¬باشد همچنین همانطور که نتایج نشان می¬دهد با افزایش عدد رینولدز، مقادیر افت فشار نیز به دلیل افزایش مومنتوم و ضریب اصطکاک افزایش می¬یابد که البته باید خاطر نشان کرد که رشد افزایش افت فشار نسبت به میزان افزایش انتقال حرارت کمتر بوده و با توجه به رابطه ۱۲ مقدار ضریب کارایی افزایش می¬یابد.



شکل ۹- تغییرات ضریب PEC به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی در کانال ساده



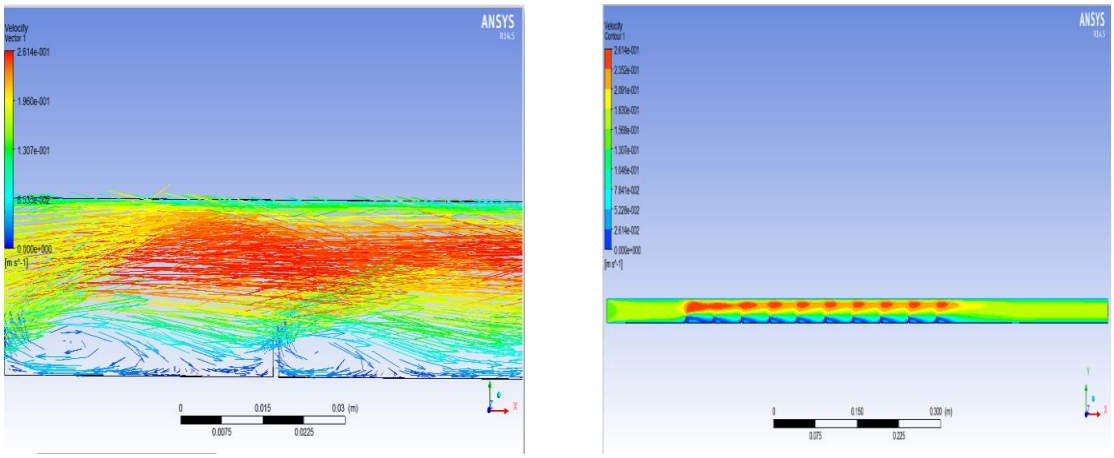
شکل ۱۰- نمایی از هندسه کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

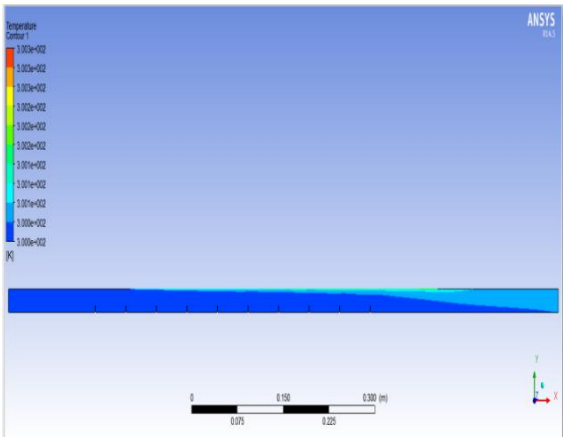
در گام بعدی به بررسی کانال مجهز به آشفته‌گر جریان پرداخته می¬شود. هندسه این کانال در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ کانتور سرعت در داخل کانال مجهز به آشفته‌گر جریان نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که وجود آشفته‌گر منجر به شکل‌گیری جریان¬های گردابی می¬شود که در نتیجه آن میزان انتقال حرارت افزایش می¬یابد. جریان¬های گردابی، قبل و بعد از آشفته‌گر جریان کاملا مشهود است. شکل ۱۲ کانتور دما در داخل کانال را نشان می¬دهد. مشاهده می¬شود که در صورت استفاده از آشفته‌گر جریان، متوسط دما در خروجی کانال افزایش می¬یابد که نشان دهنده افزایش میزان انتقال حرارت است.



الف ب

شکل ۱۱- کانتور سرعت در داخل کانال مجهز به آشفته‌گر جریان برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

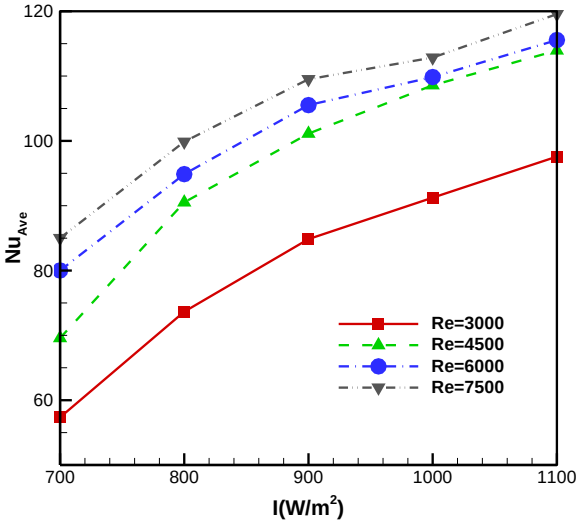


شکل ۱۲ کانتور دما در داخل کانال مجهز به آشفته‌گر جریان برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

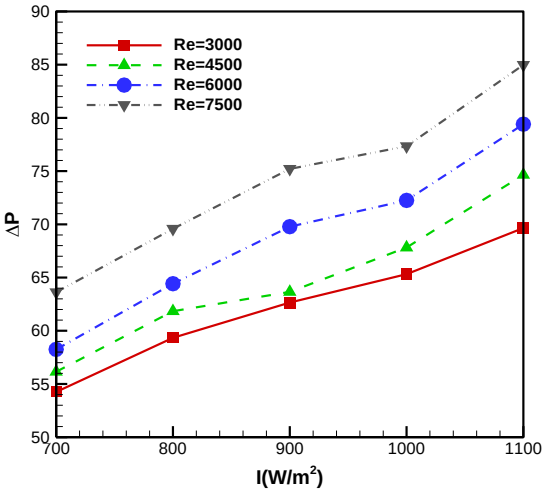
در شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت نسب به شدت تابش خورشیدی و عدد رینولدز مشاهده می¬شود. همان طور که مشاهده می¬شود با افزایش شدت تابش خورشیدی به دلیل این که اختلاف دمای سیال و دمای سطح کانال افزایش می¬یابد، میزان انتقال حرارت نیز بیشتر می¬شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

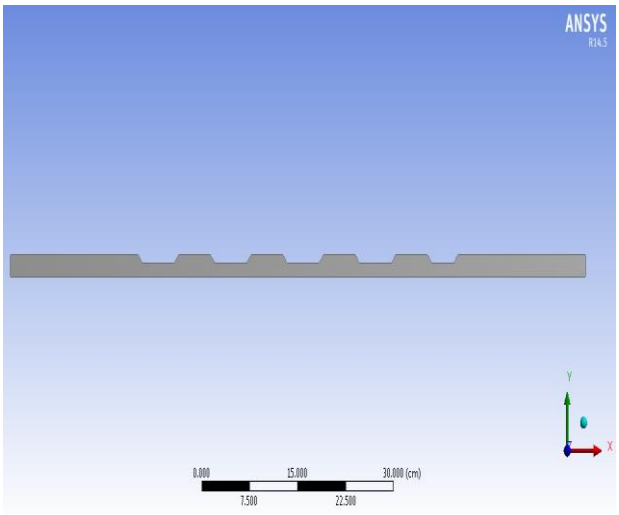


شکل ۱۳- تغییرات عدد بی‌بعد ناسلت به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

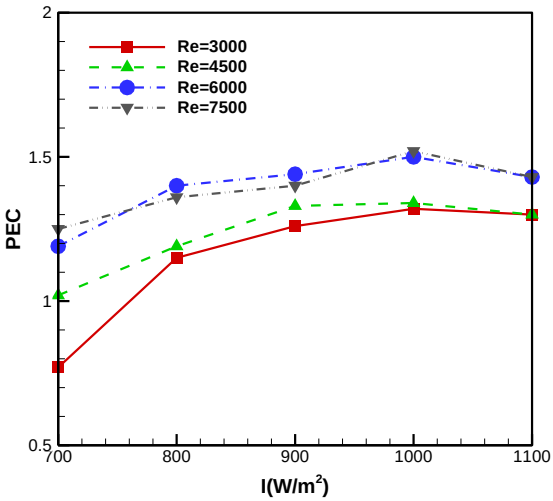


شکل ۱۴- تغییرات افت فشار به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

در شکل ۱۴ تغییرات افت فشار نسبت به افزایش عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی مشاهده می¬شود. با افزایش شدت تابش خورشیدی و همچنین افزایش عدد رینولدز افت فشار بیشتر می¬شود. زیرا با آشفته‌تر شدن جریان و شکل‌گیری جریان¬های گردابی میزان تلفات لزج افزایش پیدا می¬کند و در نهایت منجر به افت فشار می¬شود. همچنین در شکل ۱۵ تغییرات ضریب PEC نسبت به عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی مشاهده می¬شود. می¬توان دریافت که با افزایش عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی، ضریب عملکرد سیستم مطلوب‌تر می¬شود زیرا میزان انتقال حرارت افزایش می¬یابد. و میزان افت فشار در مقایسه با افزایش انتقال حرارت، کمتر است.



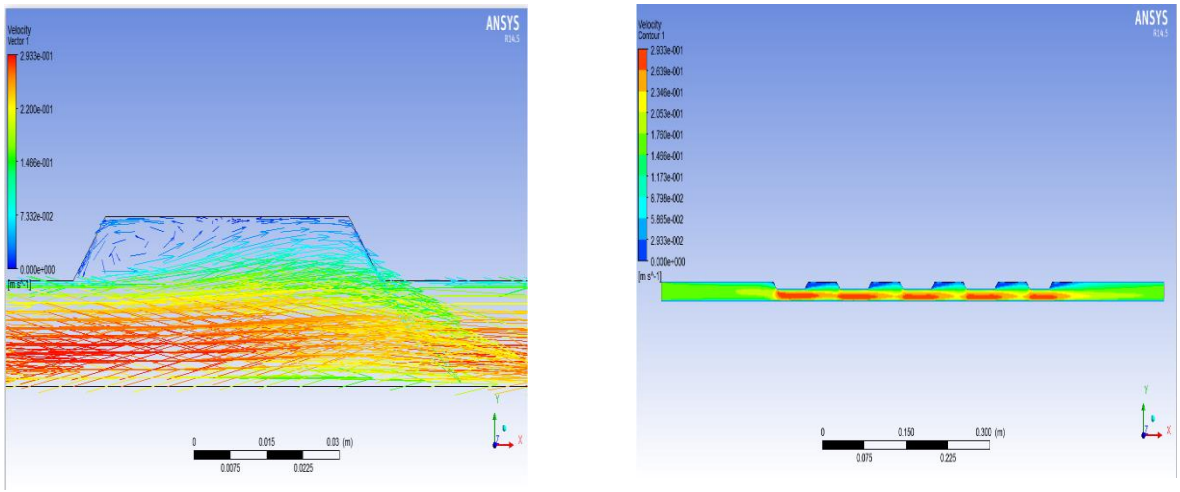
شکل ۱۶- نمایی از هندسه کانال دارای سطح کنگره‌دار



شکل ۱۵- تغییرات PEC به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

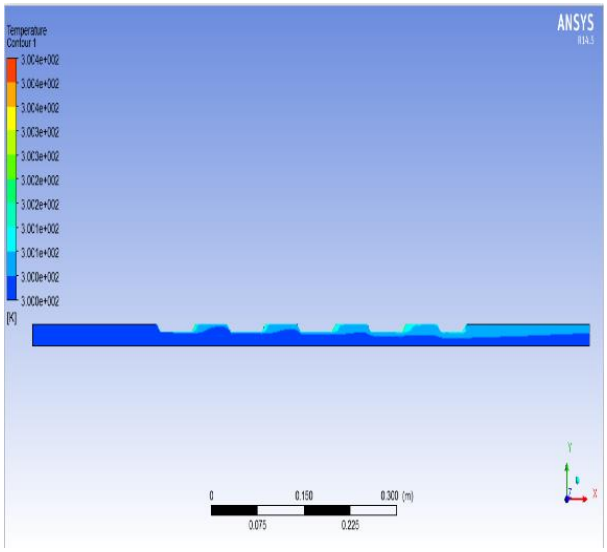
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

در گام بعدی به بررسی کانال دارای سطح کنگره‌دار پرداخته می¬شود. هندسه این کانال در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۱۷ کانتور سرعت در داخل کانال با سطح کنگره‌دار نشان داده شده است. مشاهده می¬شود که در این حالت جریان¬های گردابی در مجاورت گوشه¬های کنگره¬ای شکل می¬گیرد و همین امر منجر به افزایش انتقال حرارت از سطح به سیال می¬شود و با توجه به این که جریان¬های گردابی دقیقا در مجاورت سطح شکل می¬گیرند، تاثیر گذاری آنها بر روی افزایش انتقال حرارت بیشتر است. همچنین در شکل ۱۸ کانتور دما در داخل کانال نشان داده شده است و مشاهده می¬شود که دمای سیال در داخل کنگره¬ها افزایش پیدا می¬کند. علت آن شکل‌گیری جریان¬های گردابی و افزایش انتقال حرارت در این ناحیه است.



الف ب

شکل ۱۷- کانتور سرعت در داخل کانال دارای سطح کنگره‌دار برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

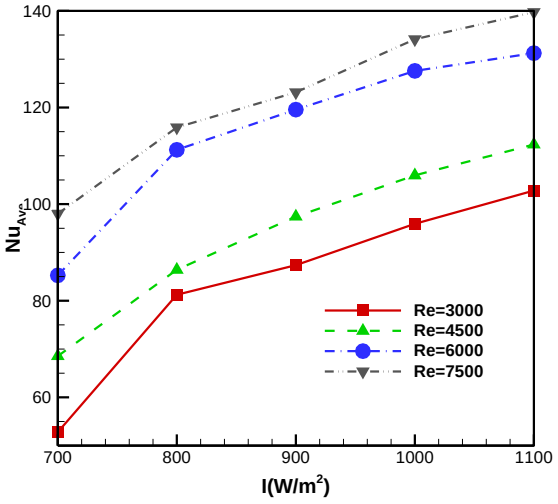


شکل ۱۸- کانتور دما در داخل کانال دارای سطح کنگره‌دار برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

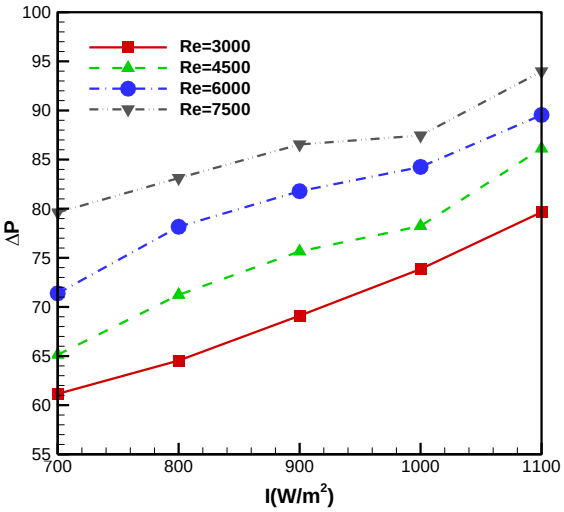
در شکل ۱۹ تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی مشاهده می¬شود که رفتاری مشابه حالت¬های قبلی را نشان می¬دهد. یعنی با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی، عدد ناسلت متوسط و همچنین افت فشار که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، افزایش می¬یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

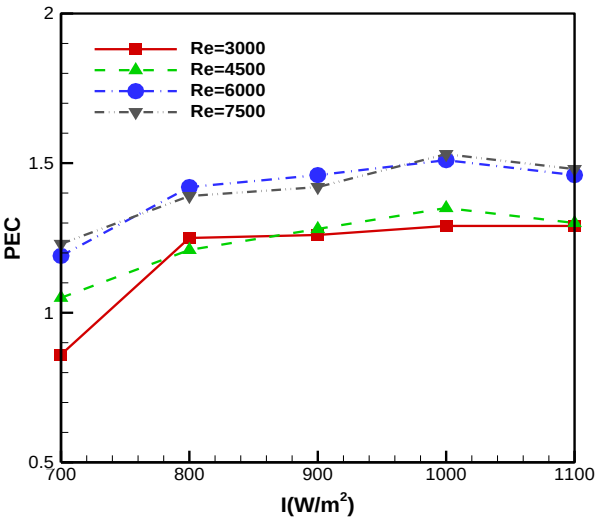


شکل ۱۹- تغییرات عدد بی بعد ناسلت به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال دارای سطح کنگره‌دار

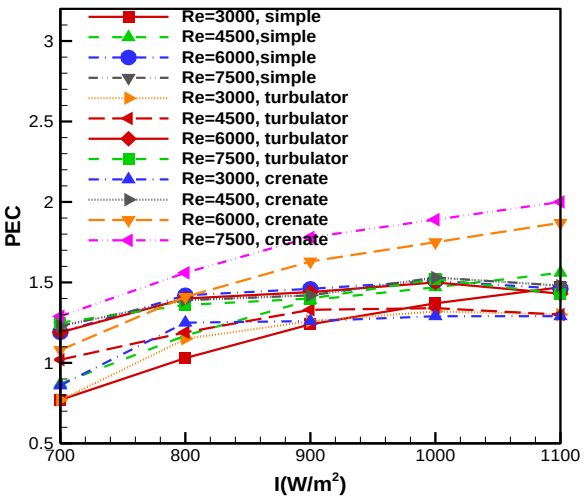


شکل ۲۰- تغییرات افت فشار به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال دارای سطح کنگره

در شکل ۲۱ تغییرات ضریب عملکرد PEC برای کانال کنگره دار نشان داده شده است. در نهایت در شکل ۲۲ مقایسه بین ضریب PEC برای سه کانال مورد بررسی، انجام شده است. با توجه به شکل ۲۲ می¬توان دریافت که بهترین حالت مربوط به کانال کنگره‌دار و عدد رینولدز ۷۵۰۰ می¬باشد. در این حالت برای همه شدت تابش¬های خورشیدی، ضریب عملکرد PEC مطلوب تر از حالت¬های مشابه دیگر می¬باشد.



شکل ۲۱- تغییرات PEC به ازای مقاد مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال دارای سطح کنگره



شکل ۲۲- مقایسه ضریب PEC برای سه نوع کانال مورد بررسی

دمای خروجی برای هر سه هندسه در رینولدز ۳۰۰۰ در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می¬شود دمای خروجی برای هندسه کنگره‌دار، افزایش داشته است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

جدول ۴- مقایسه دمای خروجی برای سه هندسه پژوهش حاضر برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

شماره هندسه	دمای خروجی
۱	۳۰۱/۱۱
۲	۳۰۲/۱۷
۳	۳۰۳/۸۳

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر هدف اصلی بررسی تاثیر هندسه کانال و شدت تابش خورشیدی بر روی بازدهی جذب تشعشع خورشیدی توسط کلکتور خورشیدی مستقیم می¬باشد. برای این منظور سه هندسه مختلف کانال در نظر گرفته شد که هر سه تحت تابش شار حرارت خورشیدی مشخص و یکنواخت قرار داشتند. یکی از کانال¬ها دارای سطح کاملا صاف و دیگری دارای سطح کنگر دار بود که منجر به افزایش سطح دریافت تابش خورشیدی می¬شود. همچنین کانال سوم دارای آشفته‌گر جریان که جریان سیال را متلاطم می¬کرد. برای هر یک از حالت¬های فوق و برای اعداد رینولدز ۳۰۰۰، ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۵۰۰ و شدت¬های تابش خورشیدی ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ وات بر متر مربع مقدار عدد ناسلت متوسط، افت فشار در داخل کانال و فاکتور کارآیی محاسبه شد. نتایج نشان داد که:

۱- افزایش شدت تابش خورشیدی به صورت چشمگیری منجر به بهبود عملکرد حرارتی کانال شد.
۲- استفاده از کانال داری مولد گردابه و کانال دارای دیوار کنگره‌دار نسبت به کانال ساده، میزان انتقال حرارت را افزایش می¬دهد.
۳- عدد بی بعد ناسلت تابعی از ضریب انتقال حرارت جابجایی می¬باشد و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر خلاف ضریب انتقال حرارت هدایتی به شدت تابعی از رژیم جریان می¬باشد. به طوری که با آشفته‌تر شدن جریان میزان انتقال حرارت جابه جایی افزایش می¬یابد.
۴- با افزایش عدد رینولدز جریان در عین حال که افت فشار افزایش می¬یابد، عدد ناسلت متوسط نیز افزایش می¬یابد.
۵- بهترین فاکتور کارآیی محاسبه شده برابر با ۱/۸۳ می¬باشد که برای کانال با سطح کنگره‌دار و برای عدد رینولدز ۷۵۰۰ می‌باشد. کمترین ضرایب PEC نیز در حالت کلی مربوط به کانال ساده می¬باشد.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
سرعت در راستای x، (m/s)	u
سرعت در راستای y، (m/s)	v
سرعت در راستای z، (m/s)	w
شتاب گرانش، (m/s^2)	g
مجموع نیروهای وارد بر جسم، (N)	S_M
فشار، (N/m^2)	p
ظرفیت گرمایی ویژه، (kJ/kg.K)	C_p
دما، (K)	T
ارتفاع ورودی کانال، (m)	H
شدت تابش خورشیدی، (W/m^2)	q

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

انرژی جنبشی اغتشاش، (J/kg)	k
عدد رینولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
ضریب کارایی	PEC
ضریب ثابت	C_μ
ضرائب ثابت	$C_{\varepsilon1}$ ،$C_{\varepsilon2}$
علائم یونانی	
چگالی، (kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته دینامیکی، ($N.s/m^2$)	μ
نرخ اتلاف اغتشاش، (m^2/s^3)	ε
تنش برشی، (N/m^2)	τ
ویسکوزیته موثر، ($N.s/m^2$)	μ_{ref}
ویسکوزیته کل، ($N.s/m^2$)	μ_t
ضرائب ثابت	σ_ε و σ_k

مراجع

[1] P. Singh, V., Shrivastava, A., Kumar, Recent developments in greenhouse solar drying: A review, Renewable and sustainable energy reviews, 82 (2018), 3250-3262.

[2] A. Djebli, S., Hanini, O., Badaoui, B., Haddad, A., Benhamou, Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes, Renewable Energy, 145 (2020) 1494-1506.

[3] H. El Hage, A., Herez, M., Ramadan, H., Bazzi, M., Khaled, An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment, Energy, 157 (2018) 815-829.

[4] D. Kong, Y., Wang, M., Li, X., Liu, M., Huang, X., Li, Analysis of drying kinetics, energy and microstructural properties of turnips using a solar drying system, Solar Energy, 230 (2021) 721-731.

[5] A. Fudholi, A., Ridwan, R., Yendra, A. P., Desvina, H., Hartono, M. K. B., Majahar,... K., Sopian, Solar drying technology in Indonesia: An overview, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 9 (4) (2018), 1804.

[6] T. Seerangurayar, A. M., Al-Ismaili, L. J., Jeewantha, N. A., Al-Habsi, Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates, Food and Bioproducts Processing, 116 (2019) 227-239.

[7] M. C. Ndukwu, L., Bennamoun, F. I., Abam, Experience of solar drying in Africa: presentation of designs, operations, and models, Food Engineering Reviews, 10 (4) (2018) 211-244.

[8] A. Lingayat, V. P., Chandramohan, Numerical investigation on solar air collector and its practical application in the indirect solar dryer for banana chips drying with energy and exergy analysis, Thermal Science and Engineering Progress, 26 (2021) 101077.

[9] H. Ebrahimi, H. S., Akhijahani, P., Salami,. Improving the thermal efficiency of a solar dryer using phase change materials at different position in the collector, Solar Energy, 220 (2021) 535-551.

[10] R. Daghigh, A. Shafieian, An experimental study of a heat pipe evacuated tube solar dryer with heat recovery system, Renewable Energy, 96 (2016) 872-880.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

[11] A. ELkhadraoui, S., Kooli, I., Hamdi, A., Farhat, Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape, Renewable energy, 77 (2015) 1-8.

[12] G. Yuan, L., Hong, X., Li, L., Xu, W., Tang, Z., Wang, Experimental investigation of a solar dryer system for drying carpet, Energy procedia, 70 (2015) 626-633.

[13] F. Altobelli, M., Condorí, G., Duran, C., Martinez, Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina, Solar Energy, 105 (2014) 742-759.

[14] H.A. Mohammed, A. M., Abed, M.A., Wahid, The effects of geometrical parameters of a corrugated channel within out-of-phase arrangement, International Communications in Heat and Mass Transfer 40 (2013) 47–57.

[15] A. K. Abbas, Numerical study on forced convection heat transfer and pressure drop for different configurations of corrugated channels, journal of kerbala university, 14 (2) (2018) 93-106.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]

چکیده انگلیسی:

Numerical modeling to investigate the effect of using a vortex generator and changing the geometry of the solar collector surface on the absorption of solar radiation in a hot water solar dryer

Hasan Ghafori[1*], Mostafa Heidari Varnamkhasti[2]

[1]Department of biosystems Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan. Iran.
[2]Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan. Iran.

Received: February 2023 Accepted: May 2023

Abstract

The quality of drying in solar dryers depends on the heat transfer inside the dryer and performance parameters such as pressure drop and efficiency factor. Therefore, the purpose of this research is to investigate the effect of dryer geometry, vortex flow generator, radiation intensity and Reynolds number on heat transfer, pressure drop and performance evaluation coefficient of solar dryer. For this purpose, three different geometries were considered, including a channel with a completely smooth surface, a channel with a curved surface, and a channel with a flow perturber, all three of which were exposed to specific and uniform solar heat flux radiation. For each of the above modes and for Reynolds numbers 3000, 4500, 6000 and 7500 and solar radiation intensities of 700, 800, 900, 1000 and 1100 wat/m^2, the amount of average Nusselt number, pressure drop inside the channel and performance evaluation coefficient calculated. The results showed that the use of a vortex generating channel and a channel with concave surface compared to a simple channel increases the amount of heat transfer. Also, as the Reynolds number of the flow increases, while the pressure drop increases, the average Nusselt number also increases.

Key words: Solar dryer, Performance evaluation coefficient, Computational fluid dynamics, Vortex generator
*corresponding author:hasangh28@gmail.com

Cite this article as: Hasan Ghafori, Mostafa Heidari Varnamkhasti, Numerical modeling to investigate the effect of using a vortex generator and changing the geometry of the solar collector surface on the absorption of solar radiation in a hot water solar dryer. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(2), 31-47.
DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1]