



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

حسن غفوری ورزنه^{۱*} 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 خشک کن‌های 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 خشک کن، مولد گردابه جریان، شدت تابش و عدد رینولدز بر انتقال حرارت، افت فشار و ضریب کارایی خشک کن خورشیدی می‌باشد. برای این منظور سه هندسه مختلف شامل کانال با سطح کاملاً صاف، کانال با سطح کنگره دار و کانال دارای آشفته گر 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 کارایی محاسبه شد. نتایج نشان داد که استفاده از کانال داری مولد گردابه‌ای و سطح کنگره دار 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: خشک کن خورشیدی، ضریب کارایی عملکرد، دینامیک سیالات محاسباتی، مولد گردابه

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین منابع‌های 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 کردن 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 خشک کن خورشیدی آب گرم. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲؛ ۱۰ (۲): ۳۱-۴۷.
DOR: [20.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1)

می باشد [6]. لذا در دهه های اخیر استفاده از دستگاه های خشک کن صنعتی با هدف افزایش کیفیت و بهره وری فرآیند خشک کردن توسعه داده شده است. در این میان دستگاه های خشک کن 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 می باشد که باعث می شود استفاده از انرژی خورشیدی از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه نباشد [2]. برای حل این مشکل، یک راهکار عملی افزایش بازدهی حرارتی کلکتورهای خورشیدی می باشد. لذا در پژوهش حاضر هدف، ارایه راهکارهایی برای افزایش بازدهی حرارتی کلکتور خورشیدی استفاده شده در دستگاه خشک کن خورشیدی می باشد.

بررسی عددی کلکتورهای خورشیدی هوا خنک و کاربرد آنها برای خشک کردن غیر مستقیم تکه های موز و آنالیز انرژی و انرژی نشان دادند که استفاده از جاذب با سطح اعوجاج دار می تواند ضریب انتقال حرارت را بین جریان هوا و جاذب افزایش دهد [8]. محققین برای مدل سازی مساله خود یک مدل عددی را توسعه دادند و نتایج آن را با داده های تجربی مقایسه کردند. همچنین سینتیک خشک کردن قطعه های موز را نیز مورد بررسی قرار دادند و عملکرد کلکتور را برای زاویه های اعوجاج و طول های مختلف اعوجاج بررسی کردند. در نهایت مشخص شد که بازدهی خشک کن طراحی شده در بازه ۶۴/۵٪ تا ۳۰/۵۵٪ می باشد. بهبود عملکرد حرارتی خشک کن خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در موقعیت های 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 سیب زمینی در حدود ۱۱/۱۲ تا ۹/۰۱ مگاژول بر کیلوگرم می باشد. همچنین مشخص شد که در صورت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می توان 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 خشک کن خورشیدی با کلکتور لوله ای و سیال آب، مشخص شد که با گذشت زمان، روند تغییرات درجه حرارت با زیادتر شدن تابش خورشیدی صعودی می باشد و همچنین نیاز به یک سیستم کمکی حرارتی برای زمان هایی که تابش خورشیدی کافی نمی باشد، وجود دارد [10]. همچنین مشخص شد که بیشترین انرژی خروجی در ساعت های ۱۲ تا ۱۶ حاصل می شود. در تحقیقی که به منظور طراحی، ساخت و آزمایش خشک کن خورشیدی گلخانه ای لفل فلر و انگور انجام شد، نشان داده شد که برای کاهش رطوبت لفل فلر قرمز تا حد ۱۶ درصد در حالت معمول حداقل به ۲۴ ساعت زمان برای خشک کردن نیاز است در صورتی که با استفاده از خشک کن گلخانه ای این مقدار به ۱۷ ساعت کاهش پیدا می کند [11]. همچنین برای کاهش رطوبت انگور به ۱۸٪ در حالت معمول به ۷۶ ساعت زمان نیاز است در صورتی که با استفاده از خشک کن گلخانه ای این زمان ۵۰ ساعت می شود. بررسی تجربی استفاده از یک سیستم خشک کن خورشیدی برای خشک کردن فرش با استفاده از یک گرم کن خورشیدی بر اساس استاندارد ASHRAE 93-2010 نشان داد که میزان راندمان حرارتی سیستم خورشیدی طراحی شده نهایتاً ۴۸٪ می باشد [12]. بررسی عددی تاثیر چرخ های خشک کن دوار بر روی عملکرد حرارتی خشک کن های خورشیدی نشان داد، استفاده از چرخ خشک کن دوار در واحدهای خشک کن خورشیدی، دمای خشک کردن هوا از ۶۵ به ۸۲ درجه سانتی گراد افزایش می یابد و در مقابل رطوبت از ۱۵ به ۸٫۸ کاهش می یابد [13].

بررسی منابع نشان می دهد که بیشتر پژوهش های پیشین به صورت آزمایشگاهی انجام شده و اثرات تغییر هندسه خشک کن کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در تحقیقات صورت گرفته، معمولاً 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 می باشد تا در انتها بهینه ترین حالت انتخاب شود.

معادلات حاکم

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

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

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

معادله اندازه حرکت برای سیال تراکم ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت به صورت زیر نوشته می شود:

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

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

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

معادله انرژی برای جریان سیال تراکم ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت به صورت زیر نوشته می شود:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \dot{q}_g + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (5)$$

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

نامیده می شود.

در پژوهش حاضر برای مدل سازی آشفتنگی جریان از مدل آشفتنگی $k - \varepsilon$ استفاده شد. در مدل های $k - \varepsilon$ میدان آشفته برحسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفته و انرژی اغتشاش بیان می شود. در این مدل، معادلات پیوستگی و مومنوم به صورت زیر بیان می شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial P'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{ref}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (7)$$

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

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (8)$$

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

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

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 می آیند:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (10)$$

$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b})$
 $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، σ_k و σ_ε مقادیر ثابت هستند. P_{kb} و $P_{\varepsilon b}$ تأثیر نیروهای شناوری را بیان می کنند. P_k تولید اغتشاش بر اثر نیروهای ویسکوز است.

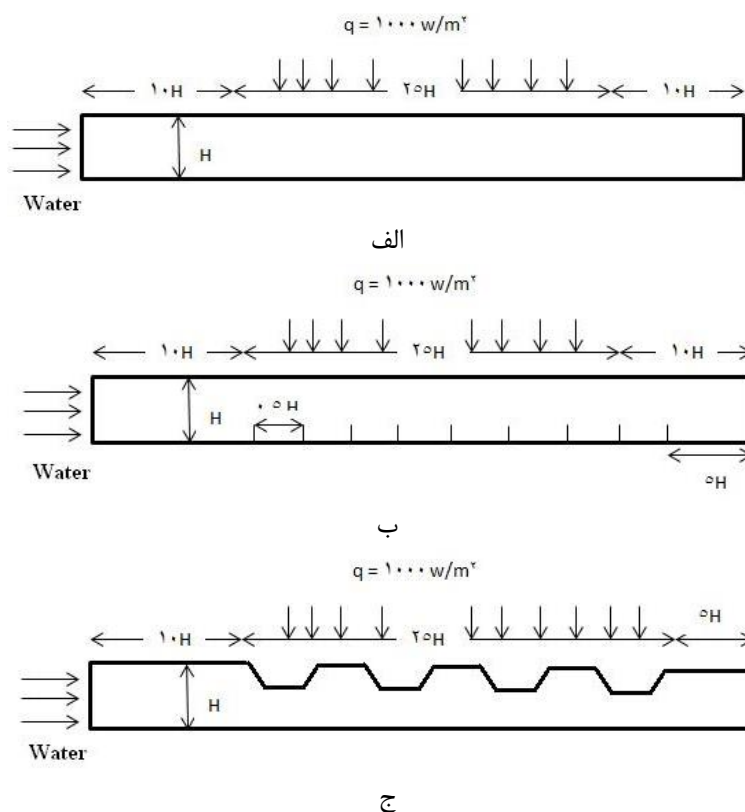
$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} (3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k) \quad (11)$$

¹ viscous dissipation rate

۲- مواد و روشها

هندسه مساله

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



شکل ۱- هندسه های مورد بررسی در پژوهش حاضر

یکی از کانال ها دارای سطح کاملا صاف (شکل ۱-الف) و دیگری دارای آشفته گر جریان می باشد (شکل ۱-ب) که جریان سیال را متلاطم می کند. همچنین کانال سوم (شکل ۱-ج) دارای سطح کنگره دار است که منجر به افزایش سطح دریافت تابش خورشیدی می شود. قابل ذکر است که ارتفاع کنگره ها در شکل ب برابر $0.5H$ و در شکل ج برابر $H/3$ می باشد. 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 کارایی ۱ (PEC) محاسبه شدند. فاکتور کارایی ۱ (PEC) به صورت نسبت عدد ناسلت به افت فشار بیان می شود (رابطه ۱۲).

$$PEC = Nu / \Delta p$$

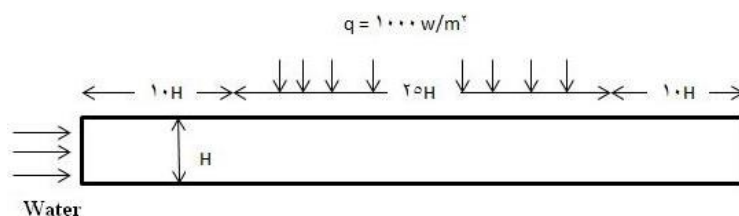
(۱۲)

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

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 $1/75$ 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 مش‌بندی‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

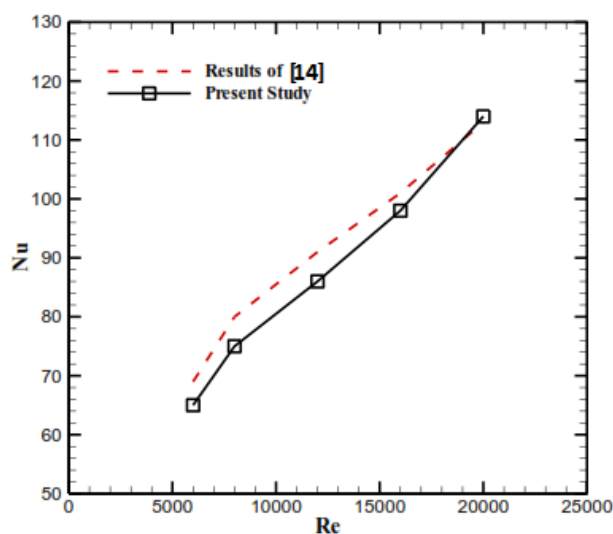
جدول ۱- مقایسه عدد ناسلت برای حالت‌های مختلف مش‌بندی

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

همان‌طور که از جدول ۱ می‌توان مشاهده نمود، با افزایش تعداد المان‌ها از ۲۶۲۸۴ به ۳۸۳۴۲ (یعنی افزایش بیش از ۴۵٪ تعداد المان‌ها) مقدار عدد ناسلت در حدود ۵/۶۲٪ تغییرات را نشان می‌دهد که مقدار زیادی محسوب می‌شود. اما با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۸۳۴۲ به ۹۳۹۶۹ (افزایش بیش از ۱۴۵٪) مقدار عدد ناسلت تنها در حدود ۲/۲۱٪ تغییر می‌کند که مقدار ناچیزی محسوب می‌شود. در واقع با افزایش تعداد المان‌ها علی‌رغم افزایش شدید هزینه محاسباتی نتیجه نهایی تغییر زیادی را از خود نشان نمی‌دهد. در این حالت گفته می‌شود که حل از شبکه‌بندی مستقل شده است. بنابراین می‌توان مش‌بندی 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 داده‌های رایج 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 داده‌های عددی حاصل از مدل رایج شده در پژوهش حاضر و مقادیر رایج شده توسط مرجع [14] در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ و جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود، داده‌های عددی به دست آمده در پژوهش حاضر با داده‌های رایج شده توسط مرجع [14] همخوانی بسیار مناسبی دارد که بیانگر اعتبار مدل رایج شده در این پژوهش می‌باشد. اندک اختلاف موجود نیز می‌تواند ناشی از روش حل عددی و خطاهای حل عددی باشد.



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

جدول ۲- مقادیر داده‌های عددی پژوهش حاضر و داده‌های ارایه شده توسط مرجع [14]

عدد Nu		عدد Re
پژوهش حاضر	مرجع [14]	
۶۵/۱۱۱۲	۶۹/۱۶۰۴	۶۰۰۰
۷۵/۲۰۸۸	۷۸/۹۲۴۴	۸۰۰۰
۸۵/۹۵۶۶	۹۰/۰۰۹۸	۱۲۰۰۰
۹۸/۰۵۳۴	۱۰۰/۷۵۵۰	۱۶۰۰۰
۱۱۳/۸۶۴۰	۱۱۳/۱۸۹۰	۲۰۰۰۰

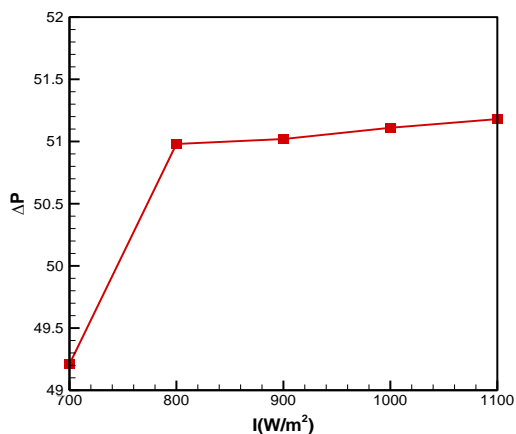
۳- نتایج و بحث

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 کارایی برای یک کانال معمولی مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شد محاسبه می‌شود. نتایج در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. با تعریف PEC به صورت نسبت عدد ناسلت به افت فشار می‌توان حالت بهینه‌ای را برای کانال‌ها مشخص کرد. قابل ذکر است در تمامی نتایج این پژوهش، تحلیل‌ها بصورت دوبعدی انجام شده است.

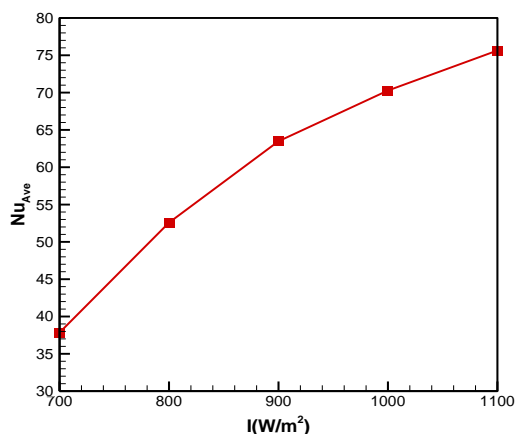
همانطور که در جدول ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌شود با زیاد شدن شدت تابش خورشیدی انتقال حرارت و به دنبال آن عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش تبادل حرارتی بین مولکولهای سیال است اما همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش مقدار افت فشار تغییر چندانی نمی‌کند زیرا افت فشار رابطه مستقیم با سرعت سیال و میزان آشفتگی‌های 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 نمی‌شود.

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

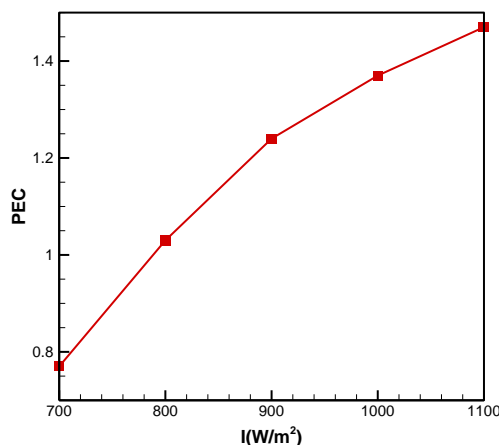
PEC	افت فشار (پاسکال)	عدد ناسلت متوسط	تابش خورشیدی ($\frac{W}{m^2}$)
۰/۷۷	۴۹/۲۱	۳۷/۸۵	۷۰۰
۱/۰۳	۵۰/۹۸	۵۲/۵۸	۸۰۰
۱/۲۴	۵۱/۰۲	۶۳/۴۸	۹۰۰
۱/۳۷	۵۱/۱۱	۷۰/۲۸	۱۰۰۰
۱/۴۷	۵۱/۱۸	۷۵/۶۴	۱۱۰۰



ب



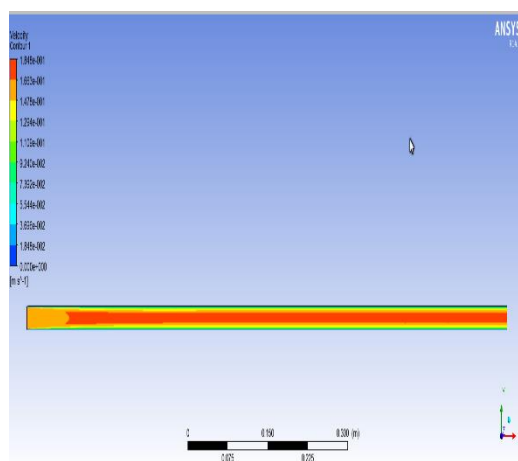
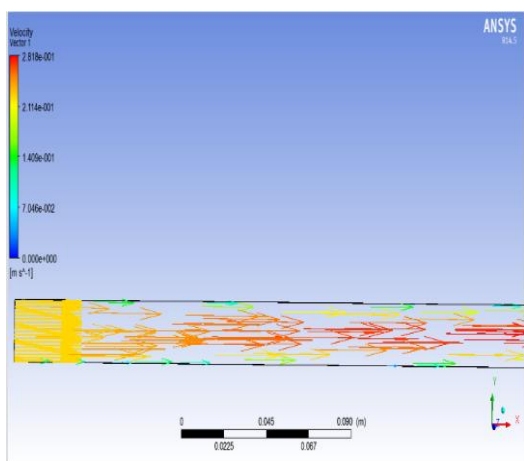
الف



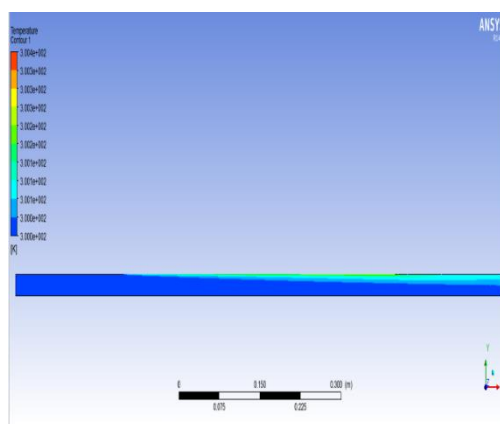
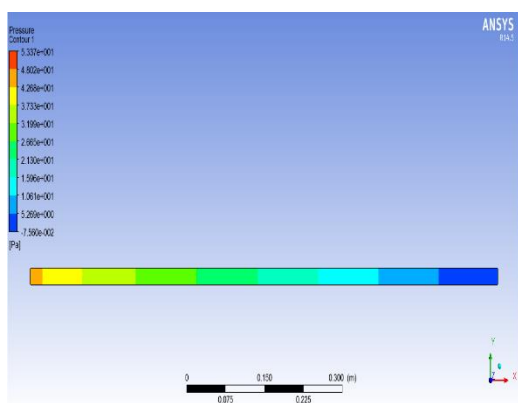
ج

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

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در ابتدای لوله لایه مرزی در حال شکل‌گیری می‌باشد و در نتیجه پروفیل سرعت در حال تغییر است اما با پیشروی در داخل کانال جریان به حالت کاملاً توسعه یافته رسیده و در نتیجه کانتور سرعت تغییری را نشان نمی‌دهد. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در بخش ابتدایی لوله به دلیل این که هیچ شار حرارتی اعمال نمی‌شود، دمای سیال برابر با دمای ورودی باقی می‌ماند و با اعمال شار حرارتی، دما از سطح بالایی کم کم شروع به افزایش می‌کند و لایه مرزی حرارتی شکل می‌گیرد. فشار نیز هر چه در داخل لوله جریان پیش می‌رود با افت بیشتری مواجه می‌شود که بدیهی است.



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

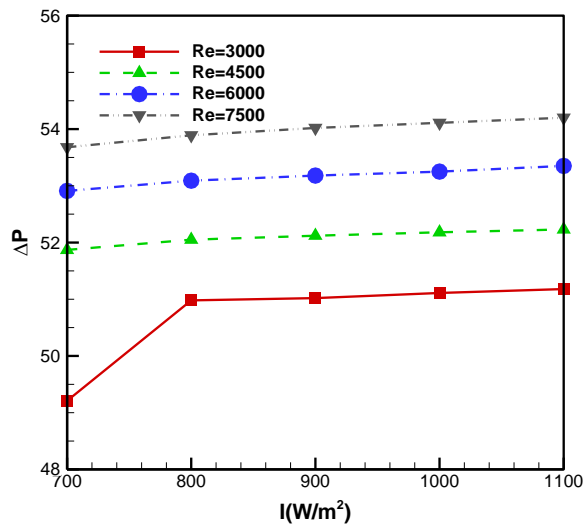


ب

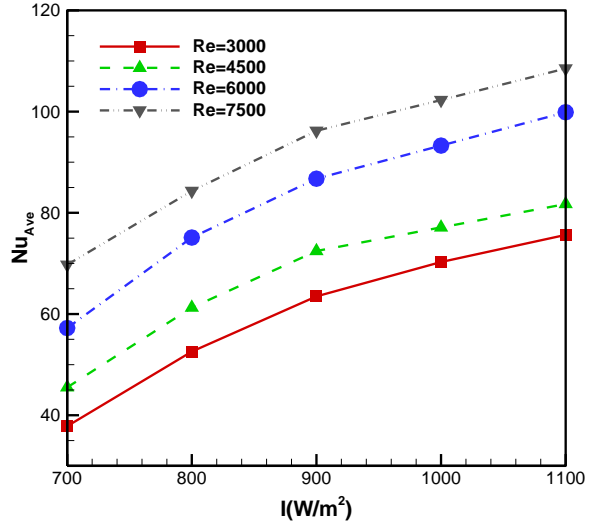
الف

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 شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده است. تغییرات عدد بی بعد ناسلت به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی مقدار عدد بی بعد ناسلت افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد رینولدز جریان آشفته‌تر می‌شود و آشفته‌تر شدن جریان منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی میزان افت فشار نیز افزایش می‌یابد که علت آن افزایش تلفات ویسکوز در اثر آشفته‌تر شدن جریان می‌باشد.

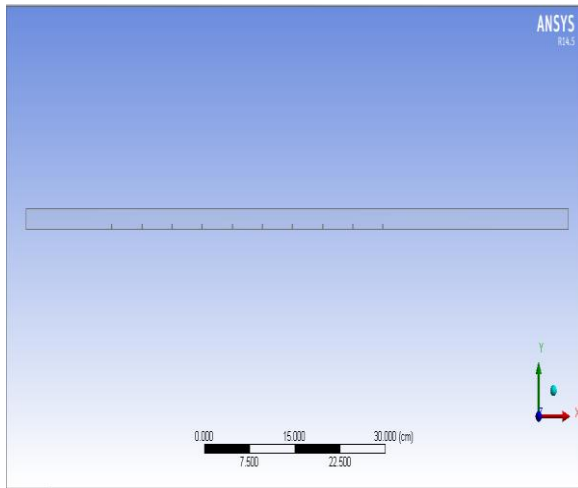


شکل ۸- تغییرات افت فشار به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی در کانال ساده

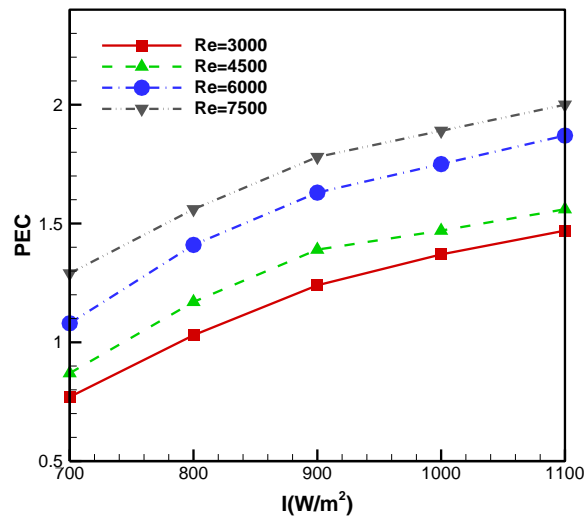


شکل ۷- مقدار عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی و اعداد رینولدز مختلف در کانال ساده

در شکل ۹ نیز نسبت عدد ناسلت به افت فشار نشان داده شده است که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز PEC بهبود می‌یابد. علت این امر افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و به دنبال آن افزایش مومنوم جریان و بیشتر شدن تبادل حرارتی می‌باشد همچنین همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز، مقادیر افت فشار نیز به دلیل افزایش مومنوم و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد 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 می‌یابد.



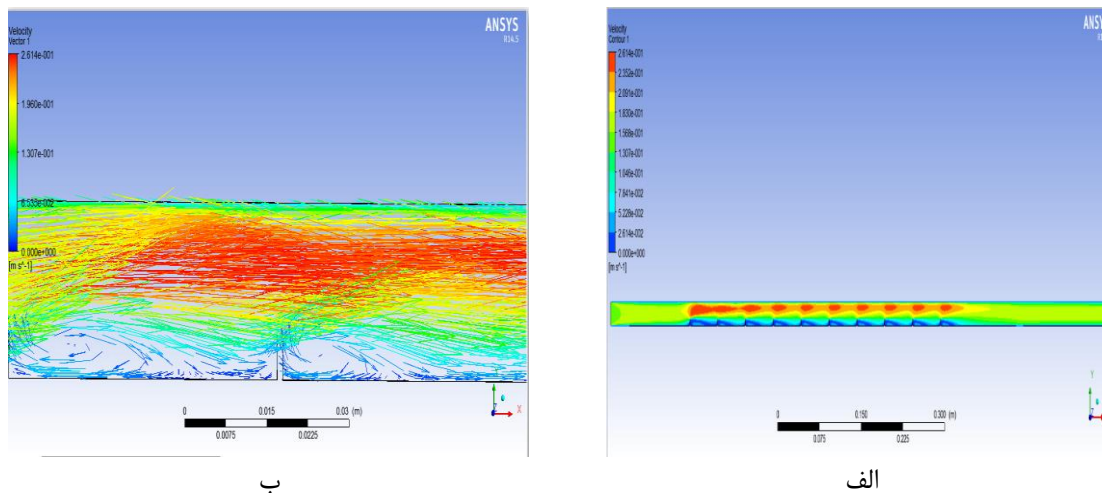
شکل ۱۰- نمایی از هندسه کانال مجهز به آشفته‌گر جریان



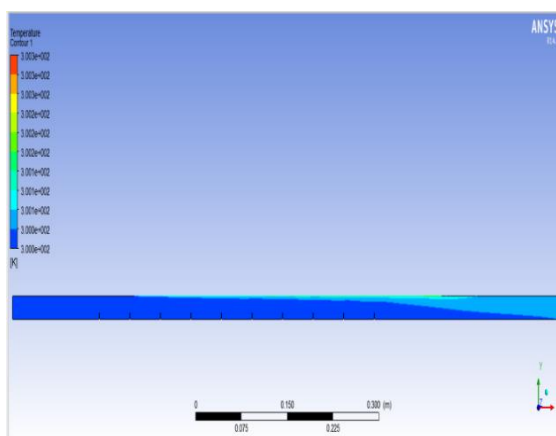
شکل ۹- تغییرات ضریب PEC به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی در کانال ساده

در گام بعدی به بررسی کانال مجهز به آشفته‌گر جریان پرداخته می‌شود. 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 جریان‌های گردابی می‌شود که در نتیجه آن میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. جریان‌های گردابی، قبل و بعد از آشفته‌گر جریان کاملاً مشهود است. شکل ۱۲ کانتور دما در داخل کانال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از آشفته‌گر جریان، متوسط دما در خروجی کانال افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش میزان انتقال حرارت است.

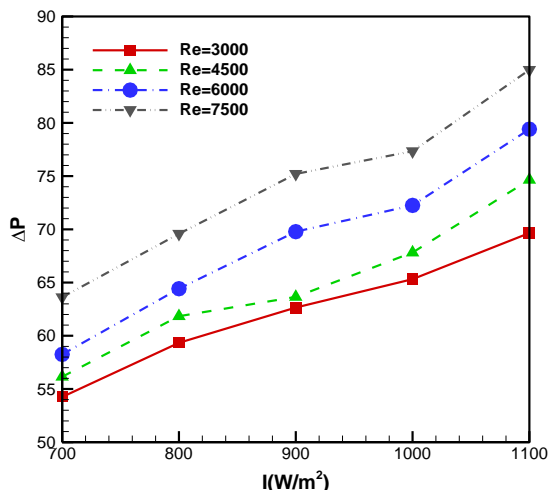


شکل ۱۱- کانتور سرعت در داخل کانال مجهز به آشفته‌گر جریان برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

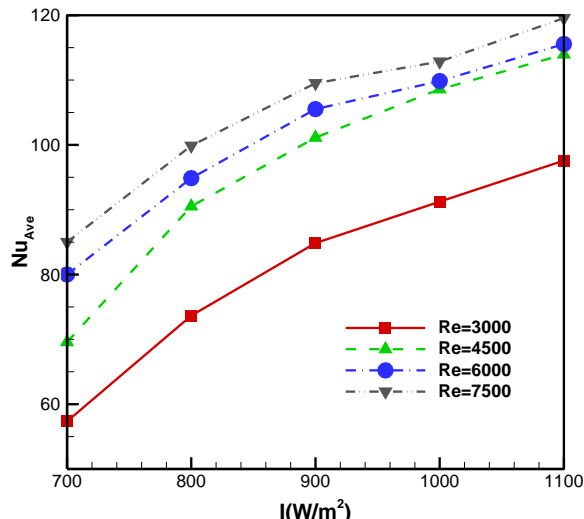


شکل ۱۲ کانتور دما در داخل کانال مجهز به آشفته‌گر جریان برای شدت تابش خورشیدی ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و رینولدز ۳۰۰۰

در شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت نسبت به شدت تابش خورشیدی و عدد رینولدز مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش خورشیدی به دلیل این که اختلاف دمای سیال و دمای سطح کانال افزایش می‌یابد، میزان انتقال حرارت نیز بیشتر می‌شود.

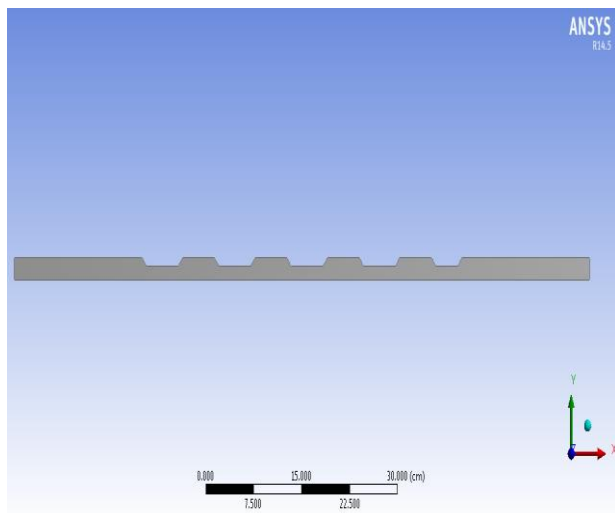


شکل ۱۴- تغییرات افت فشار به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

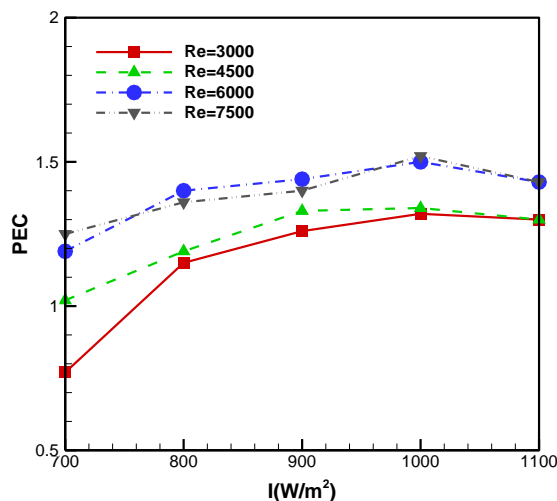


شکل ۱۳- تغییرات عدد بی بعد ناسلت به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

در شکل ۱۴ تغییرات افت فشار نسبت به افزایش عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی مشاهده می‌شود. با افزایش شدت تابش خورشیدی و همچنین افزایش عدد رینولدز افت فشار بیشتر می‌شود. زیرا با آشفته‌تر شدن جریان و شکل‌گیری جریان‌های گردابی میزان تلفات لزج افزایش پیدا می‌کند و در نهایت منجر به افت فشار می‌شود. همچنین در شکل ۱۵ تغییرات ضریب PEC نسبت به عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی مشاهده می‌شود. می‌توان دریافت که با افزایش عدد رینولدز و همچنین شدت تابش خورشیدی، ضریب عملکرد سیستم مطلوب‌تر می‌شود زیرا میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. و میزان افت فشار در مقایسه با افزایش انتقال حرارت، کمتر است.

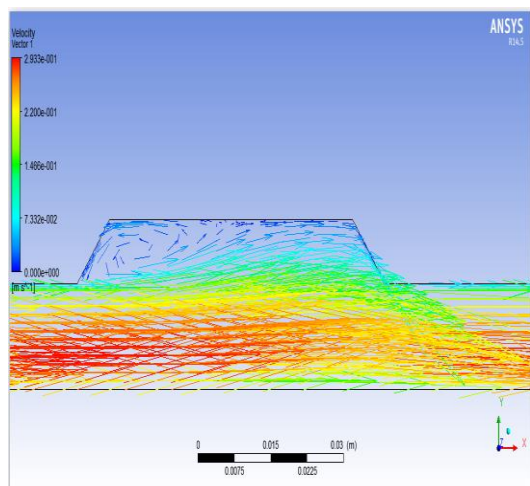


شکل ۱۶- نمایی از هندسه کانال دارای سطح کنگره‌دار

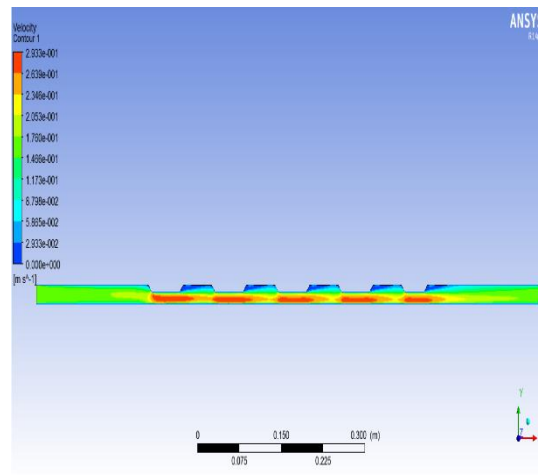


شکل ۱۵- تغییرات PEC به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال مجهز به آشفته‌گر جریان

در گام بعدی به بررسی کانال دارای سطح کنگره دار پرداخته می-شود. هندسه این کانال در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۱۷ کانتور سرعت در داخل کانال با سطح کنگره دار نشان داده شده است. مشاهده می-شود که در این حالت جریان-های گردابی در مجاورت گوشه-های کنگره-ای شکل می-گیرند و همین امر منجر به افزایش انتقال حرارت از سطح به سیال می-شود و با توجه به این که جریان-های گردابی دقیقاً 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 شکل گیری جریان-های گردابی و افزایش انتقال حرارت در این ناحیه است.

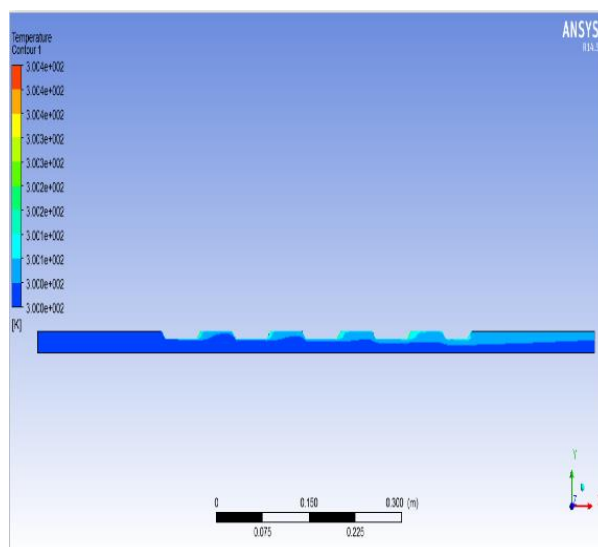


ب



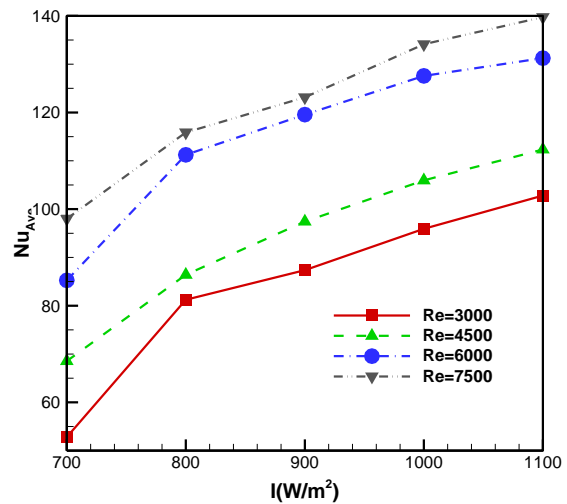
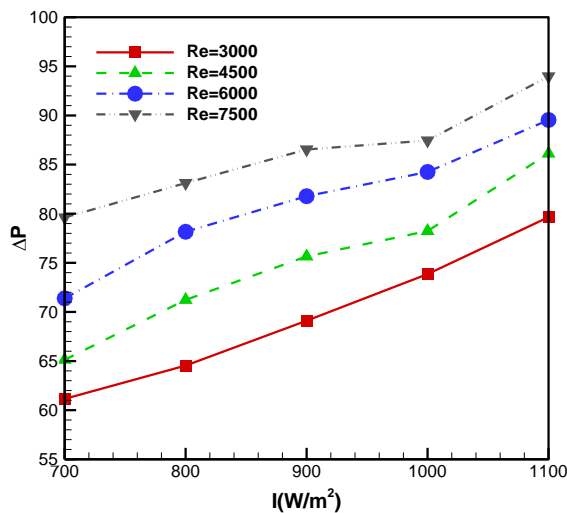
الف

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



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

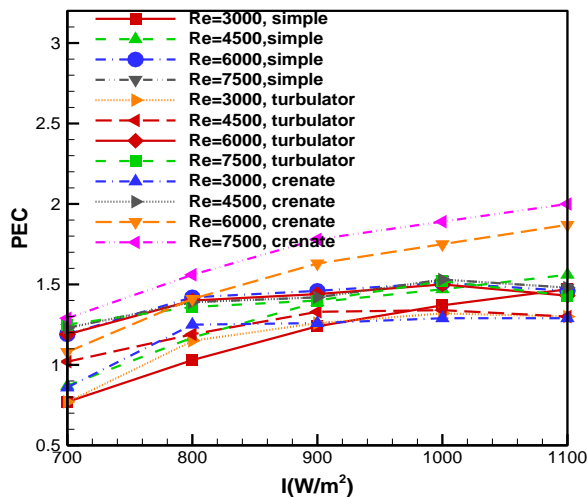
در شکل ۱۹ تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی مشاهده می-شود که رفتاری مشابه حالت-های قبلی را نشان می-دهد. یعنی با افزایش عدد رینولدز و شدت تابش خورشیدی، عدد ناسلت متوسط و همچنین افت فشار که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، افزایش می-یابد.



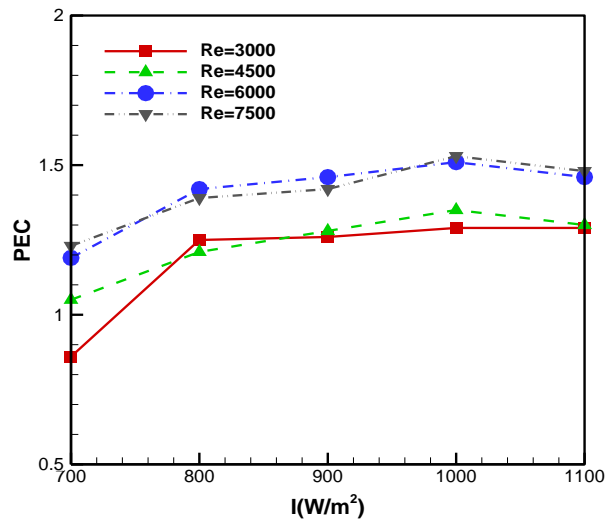
شکل ۲۰- تغییرات افت فشار به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی برای کانال دارای سطح کنگره

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

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 می‌توان دریافت که بهترین حالت مربوط به کانال کنگره دار و عدد رینولدز ۷۵۰۰ می‌باشد. در این حالت برای همه شدت تابش‌های خورشیدی، ضریب عملکرد PEC مطلوب تر از حالت‌های مشابه دیگر می‌باشد.



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



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

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

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 آشفته-گر جریان که 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 کارایی 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 کنگره دار 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 آشفته تر 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 کارایی محاسبه شده برابر با ۱/۸۳ می-باشد که برای کانال با سطح کنگره دار و برای عدد رینولدز ۷۵۰۰ می-باشد. کمترین ضرایب PEC نیز در حالت کلی مربوط به کانال ساده می-باشد.

فهرست علامت‌ها

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

k	انرژی جنبشی اغتشاش، (J/kg)
Re	عدد رینولدز
Nu	عدد ناسلت
PEC	ضریب کارایی
C_μ	ضریب ثابت
$C_{\varepsilon 2}$ ، $C_{\varepsilon 1}$	ضرائب ثابت
	علائم یونانی
ρ	چگالی، (kg/m^3)
μ	ویسکوزیته دینامیکی، (N.s/m^2)
ε	نرخ اتلاف اغتشاش، (m^2/s^3)
τ	تنش برشی، (N/m^2)
μ_{ref}	ویسکوزیته موثر، (N.s/m^2)
μ_t	ویسکوزیته کل، (N.s/m^2)
σ_ε و σ_k	ضرائب ثابت

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-Ismaïli, 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.

- [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.

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 Ghafari^{1*}, Mostafa Heidari Varnamkhasti²¹Department of biosystems Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan. Iran.²Department 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/m², 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 Ghafari, 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](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1402.10.2.1.1)