



Numerical Simulation of Using Impinging Jet In Solar Air Heaters In Order To Heat Transfer Enhancement

Hamidreza Naghooni¹, Abolfazl Fattahi^{2*}, Hamidreza Shahbazian²

¹ MSc Graduate, Energy conversion, School of Mechanical Engineering, University of Kashan.

² Assistant Professor, Energy conversion, School of Mechanical Engineering, University of Kashan.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 03.11.2024

Revised: 23.11.2024

Accepted: 13.01.2025

Keyword:

Impinging jets

Solar air heater

Heat transfer improvement

Performance evaluation factor

*Corresponding Author:

Abolfazl Fattahi

Email: afattahi@kashanu.ac.ir

The One of the best renewable energy sources that can be used instead of fossil fuels is solar energy. Only a few solar power plants have been built in a limited number of cities, producing a small portion of the country's energy. The current investigation focuses on increasing heat transfer in solar air heaters. This study examines solar air heaters with flat and sinusoidal absorber plates for Reynolds numbers of 2500, 3500, and 4500, considering structure periods of 20.0125 mm, 40.025 mm, 80.05 mm, and 160.1 mm, both with and without an impinging jet. Additionally, the geometries without an impinging jet are analyzed within the range of 2.5 mm to 5 mm. The finite volume method, using the SIMPLE algorithm and second-order discretization for the separation of governing equations, has been employed. The friction coefficient, thermal performance evaluation criterion, and thermal efficiency are investigated as influential parameters. According to the results, heat transfer improves with a decrease in cycle period and an increase in range. Based on the conducted investigations, the solar air heater without an impinging jet and with a wavy absorber plate featuring a period of 20.0125 mm and a range of 5 mm achieves the highest performance evaluation criterion of 1.86. Furthermore, upon examining the solar air heater equipped with an impinging jet nozzle on wavy absorber plates, the geometry with a period of 20.125 mm attains the highest performance evaluation criterion of 1.91, making it the best-performing geometry compared to all configurations studied in this research



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, one of the common methods for heating homes and industrial applications is the use of solar air heaters, which convert solar energy into heat. One disadvantage of these solar air heaters is their low thermal efficiency. The efficiency of flat plate solar air heaters is limited due to the low convective heat transfer coefficient between the absorber plate and the air flow, which increases the temperature of the absorber plate and leads to greater heat losses into the environment. A solar air heater consists of an absorber plate, typically made of a material with high thermal conductivity, such as aluminum. Solar air heaters are generally categorized into two main types: active and passive, based on their technical characteristics, due to the variety of their performance and heat transfer methods. In passive systems, air flows as a natural convection current based on the density difference between hot and cold air. In contrast, active systems create airflow using mechanical devices such as fans or motors within the air heater. One proposed method to increase the thermal efficiency of solar air heaters is to utilize impinging jet technology, which is the primary focus of this research. Currently, impinging jets are employed to reduce the boundary layer resistance against heat, mass, and momentum transfer. Heat transfer in impinging jets is enhanced due to the turbulence generated by the jet on the surface, typically resulting in convective heat transfer. Because of this advantageous characteristic, impinging jets are more widely used in industry compared to other traditional methods.

Methodology

In general, the geometry defined for this research was a complex mechanical system consisting of a cube-shaped channel affected by impinging jet streams. These jets were strategically positioned beneath an absorber plate to optimize fluid flow and provide uniform heat distribution across a specific material. This research presents results for five different periods of 0, 20.0125, 40.025, 80.05, and 160.1, along with two different amplitudes of 2.5 and 5. Geometry modeling and meshing, as well as fluid-thermal simulation, were conducted in the ANSYS-CFX commercial software environment. The meshing was organized in a regular hexagonal pattern, and after performing a mesh study to assess mesh independence, the optimal mesh was selected. The validation of the modeling was based on the experimental results of Ranchan et al. [18] for different Reynolds numbers. Additionally, flow and heat modeling were carried out for three input Reynolds numbers: 2500, 3500, and 4500. Figure 1 shows a representation of the studied model.

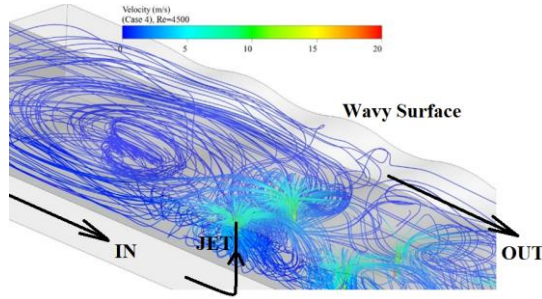


Figure 1: Schematic view of the studied model.

Results and Discussion

In the current investigation, the solar air heater was studied and analyzed as an important technology in the field of renewable energy. This research examined the performance and factors affecting the efficiency of the solar air heater, assuming a constant solar flux. The solar air heater included two geometric configurations: one with a nozzle and one without, where the nozzle acts as a connector between the inlet channel and the absorber plate channel. Absorber plates were compared in two forms- flat and wavy- at periods of 20.0125, 40.025, 80.050, and 160.1 mm, and ranges of 2.5 and 5 mm, to assess their impact on improving heat transfer at the three Reynolds numbers of 2500, 3500, and 4500. Numerical simulations for the absorber plates of the solar heater with different geometries were conducted, as detailed in Table 1.

Table 1: Different amplitudes and periods in simulation.

Geometry	Period (mm)	Amplitude (mm)	With/without Nozzle
1	0 (Smooth Plate)	0 (Smooth Plate)	
2	20.0125	2.5	
3	20.0125	5	
4	40.025	2.5	
5	40.025	5	With out Nozzle
6	80.05	2.5	
7	80.05	5	
8	160.1	2.5	
9	160.1	5	
10	0 (Smooth Plate)	0 (Smooth Plate)	With Nozzle

11	20.0125	5
12	40.025	5
13	80.05	55
14	160.1	5

Conclusions

The results of the simulation are as follows:

By increasing the range and decreasing the periodicity of heat transfer, thermal efficiency improves. As the Reynolds number increases, turbulence also increases, leading to enhanced heat transfer and a higher Nusselt number. In geometries without impinging jets, the highest Nusselt number, corresponding to geometry #3 at a Reynolds number of 4500, was 56.889, while the lowest Nusselt number occurred in geometry #8 at a Reynolds number of 2500, which was 22.474. In geometries with impinging jets, the highest Nusselt number, corresponding to geometry #11 at a Reynolds number of 4500, was 74.374, whereas the lowest Nusselt number was observed for geometry #10 at a Reynolds number of 2500, equal to 24.33.

In geometries without impinging jets, the highest friction coefficient was found in geometry #3 at a Reynolds number of 2500, measuring 0.0652, and the lowest friction coefficient was observed for geometry #8 at a Reynolds number of 4500. In geometries with impinging jets, the highest and lowest friction factors occurred in geometry #11 at a Reynolds number of 2500 and in geometry #10 at a Reynolds number of 4500, respectively. Hydraulic-thermal performance was one of the important characteristics investigated in heat transfer problems. Accordingly, geometry #3 and geometry #11 at a Reynolds number of 2500 exhibited the highest and lowest hydraulic-thermal performances, respectively.



شبیه سازی عددی استفاده از جت برخوردی در هواگرمن های خورشیدی به منظور افزایش انتقال حرارت

حمیدرضا ناغونی^۱، ابوالفضل فتاحی*^۲، حمیدرضا شهبازیان^۲

۱- کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان.

۲- استادیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان.

چکیده

در این تحقیق به اثر استفاده از جت برخوردی در افزایش انتقال حرارت هواگرمن خورشیدی پرداخته شده است. لذا هواگرمن های خورشیدی با صفحات جاذب تخت و موج دار برای دوره تناوب های ۲۰/۰۱۲۵، ۴۰/۰۲۵، ۸۰/۰۵ و ۱۶۰/۱ میلی متر با حضور جت برخوردی و بدون آن در اعداد رینولدز ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ بررسی شده است. همچنین دامنه ی ۲/۵ و ۵ میلی متر برای هندسه های بدون جت برخوردی مورد تحلیل قرار گرفته، و بهترین آن برای هندسه با جت برخوردی استفاده شده است. در شبیه سازی معادلات حاکم به روش حجم محدود از الگوریتم کوپل و گسسته سازی مرتبه دوم برای انفعال مشتقات معادلات حاکم استفاده شده است. اعداد بی بعد ناسلت، ضریب اصطکاک، معیار ارزیابی عملکرد حرارتی و راندمان حرارتی به عنوان پارامترهای تاثیرگذار مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاکی از این موضوع است که با کاهش دوره تناوب و افزایش دامنه، انتقال حرارت بهبود خواهد یافت. همچنین هواگرمن خورشیدی بدون جت برخوردی با صفحه ی جاذب موج دار با دوره تناوب ۲۰/۰۱۲۵ میلی متر و دامنه ی ۵ میلی متر بیشترین معیار ارزیابی عملکرد به مقدار ۱/۸۶ را داشته است و هواگرمن خورشیدی مجهز به جت برخوردی نازل در صفحات جاذب موج دار با دوره تناوب ۲۰/۰۱۲۵ میلی متر بالاترین معیار ارزیابی عملکرد به مقدار ۱/۹۱ را دارند. بنابراین این هندسه بهترین معیار ارزیابی عملکرد را در مقایسه با کلیه هندسه های مورد بررسی را دارا می باشد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

کلید واژگان:

جت های برخوردی
تأخیر هواگرمن خورشیدی
بهبود انتقال حرارت
بهبود ضریب ارزیابی عملکرد

*نویسنده مسئول: ابوالفضل فتاحی

پست الکترونیکی:

afattahi@kashanu.ac.ir



مقدمه

امروزه یکی از روشهای متداول برای گرمایش منازل و کاربردهای صنعتی، استفاده از هواگرمن‌های خورشیدی می‌باشد که در آن انرژی خورشیدی به گرما تبدیل می‌شود. یکی از معایب این هواگرمن‌های خورشیدی، بازدهی حرارتی ضعیف این تجهیز می‌باشد. علت اصلی عملکرد ضعیف هواگرمن خورشیدی تلفات حرارتی از قسمت‌های مختلف آن است [۱]. بازدهی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت به دلیل ضریب انتقال حرارت همرفتی پایین بین صفحه جاذب و جریان هوا که باعث افزایش دمای صفحه جاذب می‌شود، پایین است و منجر به تلفات حرارتی بیشتر به محیط می‌شود و در نتیجه بازدهی حرارتی پایین این هواگرمن را به دنبال خواهد داشت. [۲]. یک هواگرمن خورشیدی از یک جاذب تشکیل شده است که معمولاً از موادی با رسانایی حرارتی بالا مانند آلومینیوم تشکیل شده است [۳]. هواگرمن‌های خورشیدی به دلیل تنوع در عملکرد و نحوه‌ی انتقال حرارت، معمولاً با توجه به ویژگی‌های فنی‌شان به دو دسته اصلی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [۴]. در سیستم‌های غیرفعال، هوا به صورت جریان همرفت طبیعی و بر اساس اختلاف چگالی هوای گرم و سرد به جریان می‌افتد و در مقابل، سیستم‌های فعال، جریان هوا به وسیله دستگاه‌های مکانیکی مانند فن یا موتور، درون هواگرمن ایجاد می‌گردد. استفاده از سیستم‌های فعال به ویژه در مواردی که نیاز به کنترل دما و شرایط داخلی دقیق‌تر است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۵].



شکل (۱) هواگرمن خورشیدی نصب شده بصورت شیب‌دار در سقف یک کارگاه

به دلیل پایین بودن راندمان حرارتی این هواگرمن‌ها، تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد آن انجام شده است. یکی از راه‌های پیشنهادی برای افزایش بازده حرارتی هواگرمن‌های خورشیدی، استفاده از جت برخوردی در آن‌ها می‌باشد که موضوع اصلی این تحقیق خواهد بود. امروزه برای کاهش مقاومت لایه مرزی در برابر انتقال حرارت، جرم و مومنتوم از جت‌های برخوردی استفاده می‌شود [۶]. انتقال حرارت در جت‌های برخوردی به دلیل آشفتگی که توسط جت بر روی سطح ایجاد می‌کند افزایش می‌یابد. این انتقال حرارت غالباً به صورت همرفتی است. به خاطر این ویژگی مثبت، جت‌های برخوردی نسبت به روش‌های سنتی دیگر کاربرد فراوان‌تر و متنوع‌تری در صنعت دارند [۷]. با توجه به عملکرد بالای جت برخوردی برای کاربردهای گرمایش و سرمایش، در بررسی حاضر استفاده از جت برخوردی در هواگرمن‌های خورشیدی به منظور افزایش انتقال حرارت پیشنهاد شده است. این روش جزء روش‌های غیر فعال بوده به دلیل عدم

وجود قطعات متحرک نسبت به سایر روش‌های فعال مقرون به صرفه و قابل اعتمادتر هستند. برخی تحقیقات انجام شده در این زمینه در ادامه مرور شده است.

یاداف و باگوریا [۸] در یک پژوهشی عددی با استفاده از نازل جت برخوردی در هواگرمن خورشیدی، سعی کردند تا انتقال حرارت بین سیال و سطح گرم را افزایش دهند. در این بررسی که در نرم افزار انسیس فلونت ۱۸/۱ انجام گردید مدل آشفتگی RNG k-ε انتخاب گردید. نسبت قطر جت از ۰/۰۶۵ تا ۰/۱۹۵ و نسبت ارتفاع جت صفر تا ۰/۴۳۳ در اعداد رینولدز ۳۵۰۰ تا ۱۷۵۰۰ مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن بود که حداکثر افزایش انتقال حرارت ۷/۵۸٪ با ضریب اصطکاک ۹/۰۱ برای نسبت قطر جت ۰/۰۶۵ و نسبت ارتفاع نازل ۰/۲۱۶ در رینولدز ۱۷۵۰۰ رخ داده است. آنجیولتی و همکاران [۹] در یک شبیه سازی عددی برخورد جت محصور نشده جریان آشفته را بررسی کردند و با استفاده از داده‌های سرعت سنج، تصویر ذرات و اندازه گیری انتقال جرم، نتایج عددی را اعتبار سنجی کردند. در این تحقیق عدد رینولدز بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ در نظر گرفته شد و نتایج حاکی از آن است برای رینولدزهای پایین مدل توربولانسی SST k-ω برای رینولدزهای بالا مدل توربولانسی RNG k-ε یا RSM مناسبتر می باشد.

متسواران و همکاران [۱۰] به بررسی تحلیلی انرژی و انرژی هیتروای خورشیدی برخورد جت پرداختند. در این تحقیق هندسه جت بصورت چند جته بود و مدل‌های آشفتگی مختلف standard k-ε و RNG k-ε و realizable k-ε و standard k-ω و SST k-ω مورد آزمایش قرار گرفت. در انتها به این نتیجه رسیدند که بهترین مدل آشفتگی برای چند جت، مدل SST k-ω بوده و همچنین مقادیر بهینه نسبت گام جریان، نسبت گام بهینه و نسبت قطر جت به ترتیب برابر با ۱/۷۳۹، ۰/۸۶۹ و ۰/۰۶۵ در نرخ جریان جرمی ۰/۰۳۵ کیلوگرم بر ثانیه شناسایی شد. میسرا و همکاران [۱۱] رفتار مجرای هواگرمن خورشیدی با مقطع مثلثی مجهز به توربولاتورهای V شکل را مورد پژوهش قرار دادند. این مطالعه نشان داد که با تغییر گام زبری نسبی از ۸ به ۱۴ و زاویه حمله از ۴۵ تا ۶۰ درجه، حداکثر نرخ انتقال حرارت در گام زبری نسبی ۱۰ و زاویه حمله ۴۵ درجه در تمامی رینولدزهای مورد مطالعه به دست می آید. مورالی و همکاران [۱۲] اختلاف دمای ورودی و خروجی هوا و ضریب انتقال حرارت را با استفاده از قوطی‌های آلومینیومی با ضایعات آلومینیوم و سنگ‌ریزه‌ها مورد مطالعه قرار دادند.

کوتایات نیدو و همکاران [۱۳] دینامیک سیالات محاسباتی و تجزیه و تحلیل انرژی را برای بررسی تأثیر جریان ثانویه تولید شده توسط توربولاتورهای V شکل بر عملکرد کلی یک مجرای مثلثی هواگرمن خورشیدی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات برای گام توربولاتورها برابر عدد ثابت ۱۰ و ارتفاع نسبی ۰/۰۵ و زاویه شیب مشخص برای تغییرات عدد رینولدز از ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفت. یاداف و باگوریا [۱۴] یک بررسی عددی برای تجزیه و تحلیل جریان‌های تراکم‌ناپذیر دو بعدی در یک هواگرمن خورشیدی انجام دادند. محدوده عدد رینولدز مورد مطالعه از ۳۸۰۰ تا ۱۸۰۰۰ بود. نکته مهم تحقیق استفاده از دوازده هندسه مختلف برای دنده‌های برش خورده به شکل مثلثی متساوی الاضلاع با گام زبری نسبی ۷/۱۴ تا ۳۵/۷۱ و همچنین ارتفاع زبری نسبی ۰/۰۲۱ تا ۰/۰۴۲ بود. آن‌ها یافتند که با افزایش عدد رینولدز در همه موارد، میانگین عدد ناسلت تمایل به افزایش دارد. میانگین عدد ناسلت با افزایش گام زبری نسبی برای مقدار ثابتی از ارتفاع زبری نسبی کاهش می یابد و همچنین با افزایش ارتفاع زبری نسبی برای مقدار ثابتی از گام زبری نسبی، تمایل به افزایش دارد.

گوپتا و ورشنی [۱۵] عملکرد هواگرمن خورشیدی با توربولاتورهای مخروطی برش خورده به شکل مستطیلی را با استفاده از شبیه سازی عددی مورد پژوهش قرار دادند. دوازده هندسه‌ی مختلف از دنده مخروطی با زاویه مخروطی در $۱/۶$ ، $۲/۳$ و $۳/۲$ درجه برای گام های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و عرض دنده ثابت $۰/۷$ میلی‌متر به عنوان عنصر زبری در نظر گرفته شد. نتایج نشان دهنده آن بود که زاویه مخروطی $۱/۶$ درجه با گام نسبی ۱۰ در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ حداکثر میزان افزایش عدد ناسلت را تجربه خواهد کرد. همچنین در این شرایط عملکرد حرارتی برابر $۱/۹۱$ خواهد بود. ایندراجیت و سوخمیت [۱۶] تحقیقی در زمینه‌ی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مجرای هواگرمن خورشیدی زبر شده با دنده عرضی به شکل مربعی با مقطع غیریکنواخت انجام دادند. در شبیه سازی سه بعدی آن‌ها، پارامترهای گام زبری نسبی در محدوده‌ی ۳۰-۴ و عدد رینولدز در محدوده‌ی ۳۰۰۰-۱۵۰۰۰ در نظر گرفته شد، در حالی که ارتفاع زبری نسبی $۰/۴۳$ ثابت بود. مدل آشفتگی RNG k-ε انتخاب شد. حداکثر معیار ارزیابی عملکرد برای دنده موج مربعی با مقطع غیریکنواخت $۱/۴۳$ بود، در حالی که، برای دنده مربع مقطع یکنواخت و دنده دایره‌ای مقطع یکنواخت به ترتیب $۱/۳۹$ و $۱/۲۵$ بود. این نشان می‌دهد که دنده با مقطع غیر یکنواخت ارزش بررسی بیشتر را دارد. هم عدد ناسلت و هم ضریب اصطکاک تا گام زبری نسبی ۱۰ افزایش می‌یابد و سپس هر دو با افزایش بیشتر گام کاهش می‌یافتند.

یاداف و همکاران [۱۷] یک مطالعه‌ی عددی بر بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت و معیار ارزیابی عملکرد یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از برخورد جت بر روی صفحه جاذب را انجام داده‌اند. این مطالعه تأثیر دو پارامتر هندسی، یعنی نسبت گام جت و نسبت زاویه جت، بر انتقال حرارت، تلفات اصطکاک، و عملکرد کلی هواگرمن خورشیدی با برخورد جت تحت شرایط جریان مختلف اعداد رینولدز از ۳۵۰۰ تا ۱۷۵۰۰ را بررسی کردند. این تحقیق، حداکثر معیار ارزیابی عملکرد را شناسایی کرد که مقدار $۴/۱۲$ بود. این مقدار حداکثر عملکرد به ترتیب در مقادیر ویژه نسبت گام جت $۱/۳۰$ و نسبت زاویه جت $۰/۰۹۴$ در عدد رینولدز ۷۵۰۰ تجربه گردید. فراهانی و شادی [۱۸] در یک پژوهش به بهینه‌سازی اقتصادی، انرژی و انرژی کلکتورهای خورشیدی با سطوح مختلف و جت‌های ناشی از برخوردها پرداختند. از آنجایی که نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در قالب مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه شده است، با استفاده از روش الگوریتم TOPSIS و تعیین ضریب وزنی برای معیارها اولویت‌بندی کردند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با اضافه کردن جت برخوردی، قدرت گرمایشی، تفاوت دما به طور متوسط به ترتیب $۱/۲۲\%$ و ۶۳% افزایش می‌یابد. کارایی انرژی، انرژی و هزینه نیز به طور متوسط به ترتیب ۲% ، ۵۹% و ۱۵۰% افزایش می‌یابد.

گوانده و همکاران [۱۹] ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان سیال در مجرای هواگرمن خورشیدی زبر با دنده‌های مثلثی متساوی الاضلاع، مربعی و ترکیبی را با استفاده از رویکردهای دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. گام نسبی ریب ها $۷/۱۴$ تا $۱۷/۸۶$ و ارتفاع نسبی ریبها $۰/۴۲$ و عدد رینولدز مورد مطالعه از ۳۸۰۰ تا ۱۸۰۰۰ در شار حرارتی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع به عنوان پارامترهای عملیاتی استفاده شدند. راجاسینی واسان و همکاران [۲۰] به طور تجربی و با استفاده از آزمایش‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که حداکثر عملکرد حرارتی $۵۵/۸$ درصد در زاویه حمله ۳۰ درجه، قطر نازل ۵ میلی‌متر و نرخ جریان جرمی $۰/۱۶$ کیلوگرم بر ثانیه برای گرم‌کن هوای خورشیدی قابل حصول است.

شارما و همکاران نیز در سال جاری میلادی اثر همزمان جت های برخوردی و ریبهای V شکل را به صورت عوامل جداگانه منفعل و فعال بر روی هیترهای خورشیدی مورد بررسی و پژوهش عددی و تجربی قرارداده‌اند که نتایج آنها نشان دهنده آن است که موثرترین روش افزایش بازدهی هیترها، وجود رینه‌های مخالف جت برخوردی خواهند بود [۲۱].

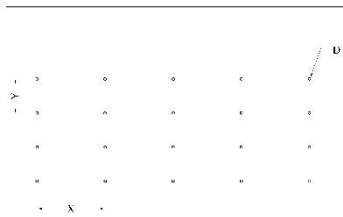
سربواستاو و همکاران در تحقیق خود بر تجزیه و تحلیل تجربی و محاسباتی بهبود عملکرد حرارتی یک هیتر هوای خورشیدی با جت‌های برخورد غوطه‌ور تمرکز کرده‌اند. استفاده از جت های لوله غوطه‌ور سرعت برخورد بالایی را ایجاد کرده و باعث ایجاد تلاطم قابل توجهی در صفحه جاذب خواهند شد که منجر به افزایش نرخ گرما می‌گردد. یافته‌های آنها حکایت از بهتر بودن پیکربندی جدید جت مستغرق برخوردی در افزایش انتقال گرما از صفحه جاذب در مقایسه با جت روزه ای و گرم کن هوای خورشیدی صاف دارد [۲۲]. تنوس و همکاران در یک تحقیق عددی اثر ۷ پارامتر تاثیر گذار روی هیترهای خورشیدی لوله ای شکل را بررسی کرده‌اند. نتایج اولیه شبیه سازی در نرم فراز انسیس فلونت با یک نمونه آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است. یافته‌ها بر نقش حیاتی طول بخاری لوله در افزایش انتقال حرارت و به حداکثر رساندن راندمان حرارتی تأکید می‌کنند، در حالی که کاهش طول جت و ارتفاع نازل تأثیرات ناچیزی را بر عملکرد حرارتی نشان می‌دهد [۲۳].

همان طور که در بالا ذکر شده پژوهشگران مختلفی در تحقیقات خود در مورد بهینه‌سازی هواگرمن‌های خورشیدی با تأکید بر ارتفاع نسبی، گام نسبی، و قطر هیدرولیکی جت‌های برخوردی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند که نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این عوامل اساسی می‌توانند به طور قابل توجهی بر انتقال حرارت و عملکرد هیدرولیکی در هواگرمن‌های خورشیدی تأثیر بگذارند. اما تحقیقات بسیار کمی در مورد شکل صفحات جاذب که جت برخوردی به آن اثر می‌کند وجود دارد. تمایز پژوهش حاضر استفاده از صفحات موج‌دار با دوره‌ها و تناوب‌های متفاوت بوده که میزان تغییرات انتقال حرارت و شاخص عملکرد هیدروحرارتی را در حالت‌های مختلف ارزیابی می‌کند.

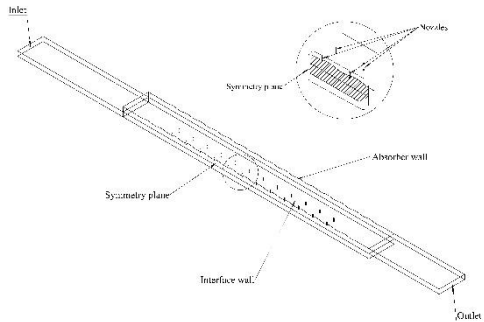
تشریح مسأله

ابعاد هندسی کانال

به طور کلی هندسه تعریف شده برای این تحقیق، یک سیستم مکانیکی پیچیده متشکل از کانالی با شکل مکعبی است که تحت تأثیر جریان‌های جت برخوردی قرار دارد. این جت‌ها به طور استراتژیک در زیر صفحه‌ای جاذب موقعیت‌دهی شده‌اند تا بهینه‌سازی جریان سیال و توزیع یکنواختی از حرارت یا ماده خاصی را فراهم کنند. ۴۸ عدد جت‌های برخوردی در یک الگوی شبکه‌ای دقیق با ۱۲ ستون و ۴ ردیف تنظیم شده و تقریباً مانند یک صفحه شطرنجی سازمان‌دهی شده‌اند. این ترتیب خاص از جت‌ها، ضمن فراهم کردن پوششی وسیع و یکنواخت از سیال در کل حجم کانال، به کارایی انتقال حرارت و جرم بین جت‌ها و محیط درون کانال کمک می‌کند. چیدمان متقارن و منظم جت‌ها امکان توزیع یکنواخت‌تر و موثرتر را فراهم آورده و به نوبه خود باعث بهبود عملکرد کلی سیستم و افزایش راندمان انتقال حرارت می‌شود. شکل (۲) نمایی از مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل (۲) (الف) طرحواره‌ی هواگرمن خورشیدی (ب) طرحواره‌ی چینش مربعی جت برخوردی

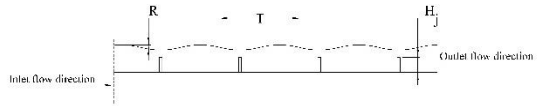
هندسه از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول، کانال ورودی به طول ۶۰۰ میلی‌متر است که هوای محیط از این طریق به گرمکن خورشیدی که در کانال وسط تعبیه شده است هدایت می‌گردد. در این قسمت هوا از طریق سوراخ‌ها (جت‌های برخوردی) که در سطح مرزی قرار دارند به کانال صفحه‌ی جاذب انتقال می‌یابند. طول کانال مشترک صفحه‌ی جاذب به ۱۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد. سیال گرم شده توسط صفحه‌ی جاذب، از طریق کانال خروجی به طول ۴۰۰ میلی‌متر خارج می‌شود. گرمکن دارای صفحات جاذب موج‌دار می‌باشد. در این تحقیق نتایج برای ۵ دوره تناوب متفاوت و ۲ دامنه متفاوت انجام شده است. در جدول (۱) ابعاد کلی هندسه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول (۱) ابعاد کلی مسأله

مقدار (میلی متر)	نام مشخصه
۲۴۰۰	طول کانال (L)
۱۴۵	عرض کانال (W)
۵۰	ارتفاع کانال (H)
۱۶۰/۱ و ۸۰/۰۵ . ۴۰/۰۲۵ . ۲۰/۰۱۲۵ . ۰	دوره تناوب صفحات سینوسی (T)
۵ و ۲/۵ . ۰	دامنه‌های صفحات سینوسی (R)

مشخصات صفحات جاذب و جت برخوردی

در شکل (۳) نمای برش خورده از هندسه شامل کانال و تعدادی از جت‌های برخوردی نمایش داده شده است.



شکل (۳) نمایی از کانال ورودی، خروجی و صفحات جاذب موجدار

جدول (۲) ابعاد و مشخصات جت بر خوردی ارائه شده است.

جدول (۲) ابعاد جت بر خوردی

مقدار (میلی متر)	نام مشخصه
۱/۷۳۹	نسبت گام جریان به قطر هیدرولیکی (X/D_h)
۰/۸۶۹	نسبت گام در جهت عمود بر جریان به قطر هیدرولیکی (Y/D_h)
۰/۰۶۵	نسبت قطر جت به قطر هیدرولیکی (D_j/D_h)
۵	نسبت ارتفاع جت به قطر جت (H_j/D_h)
۲/۹۹۲ میلی متر	قطر جت (D_j)

معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حل میدان حرارتی-هیدرودینامیکی مسئله عبارتند از معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی که در حالت سه بعدی و حالت پایا حل شده اند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\rho \left(u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho C_p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + Q \quad (3)$$

برای شبیه ساز ترم‌های آشفتگی، از مدل آشفتگی k- ω و از خواص گاز ایده‌آل استفاده شده است.

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \sigma_k \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\alpha \cdot P_k}{k} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \sigma_\omega \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

جدول (۳) شرایط مرزی اعمال شده در شبکه محاسباتی را نشان می دهد. شرایط همگرایی برای همه معادلات حاکم برابر ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی هیدرودینامیکی	شرایط مرزی حرارتی	
عدم لغزش	$q''=1000 \text{ W/m}^2$	صفحه جاذب
سرعت سیال (وابسته به رینولدز)	$T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$	مجرای ورودی
$P_{out}=0 \text{ barg}$	-	مجرای خروجی
عدم لغزش	$q''=0$	دیواره های کف

پارامترهای بی بعد استفاده شده در تحقیق عبارتند از عدد رینولدز، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، راندمان حرارتی و شاخص عملکرد هیدرولیکی-حرارتی که به صورت روابط زیر خواهند بود.

$$Re = \frac{\rho Du}{\mu} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (8)$$

$$f = \frac{2}{\rho \times u^2} \times D_h \times \frac{\Delta P}{L} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{h(T_{pm} - T_{inlet})}{G} \quad (10)$$

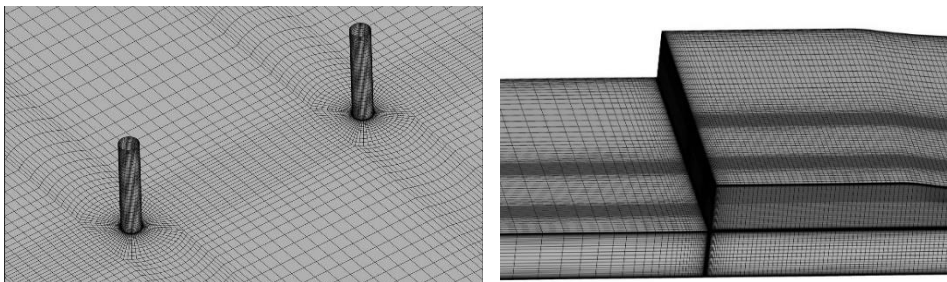
$$PEC = \frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{1/3}} \quad (11)$$

مدلسازی هندسه و مش بندی و همچنین شبیه سازی سیالاتی-حراراتی در محیط نرم افزار تجاری ANSYS-CFX انجام شده است. شبکه بندی به روش سازمان یافته و از نوع شش ضلعی منظم بوده و بعد از چندین مرتبه شبکه بندی و مطالعه استقلال از شبکه، تعداد سلول ۹۹۰۱۳۶۶ به عنوان شبکه بهینه و دقیق انتخاب شده است. جدول (۴) نتایج استقلال حل از شبکه برای پنج شبکه‌ی مختلف در نسبت قطر جت $\frac{D_j}{D_h} = 0.065$ ، نسبت ارتفاع جت $\frac{H_j}{D_h} = 5$ و عدد رینولدز ۴۵۰۰ مقادیر ناسلت را نمایش می‌دهد.

جدول (۴) استقلال حل از شبکه

خطای نسبی (درصد)	عدد ناسلت	تعداد سلول
-	۴۸/۰۰۲۹	۴۵۳۳۱۶۸
۲۱/۷۹۶۱	۳۷/۵۴۰۱	۶۵۷۶۱۱۱
۱۲/۹۳۶۸	۴۲/۳۹۶۶	۸۸۰۰۴۴۵
۱/۴۰۲۷	۴۲/۹۹۱۳	۹۹۰۱۳۶۶
۰/۳۵۱۲	۴۲/۸۴۰۳	۱۰۸۶۱۲۳۱

در شکل (۴) شبکه محاسباتی ایجاد شده در دامنه حل، قابل مشاهده است.



شکل ۴- شبکه محاسباتی مدل مورد مطالعه

اعتبار سنجی مدل سازی بر اساس نتایج تجربی رانچان و همکاران [۲۴] برای سه عدد رینولدز به صورت جدول (۵) انجام شده است.

جدول (۵) اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی

عدد رینولدز	عدد ناسلت تجربی [۲۴]	عدد ناسلت پژوهش حاضر	خطا (درصد)
۳۸۰۰	۳۵/۴۹۸۳۹	۳۶/۷۴۷۷	۳/۵۱۹۳
۵۴۰۰	۴۹/۳۸۹۰۷	۴۷/۹۵۰۱	۳/۰۰۱
۸۱۰۰	۶۷/۹۰۹۹۷	۶۲/۳۵۴۷	۸/۹۰۹۱

شبیه سازی عددی و تحلیل نتایج

همان طور که در مقدمه ذکر گردید هدف اصلی مقاله حاضر بررسی اثرات صفحات موجدار صفحه جاذب در فیزیک جریان، انتقال حرارت و شاخص عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در گرمکن های خورشیدی با جت برخوردی می باشد. شبیه سازی در دو حالت جت برخوردی بدون نازل (روزنه) و با نازل انجام شده است. همچنین مدل سازی جریان و حرارت در سه عدد رینولدز ورودی ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ انجام شده است. شار در صفحه جاذب برابر مقدار ثابت ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. حالات مختلف شبیه سازی عددی در جدول (۶) ارائه شده است.

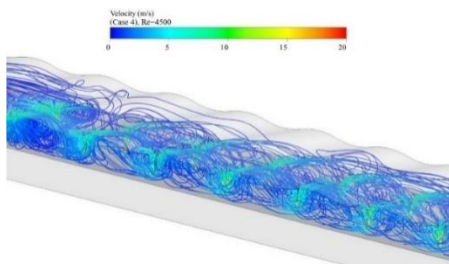
جدول (۶) دامنه و تناوب های متفاوت در شبیه سازی

نام هندسه	دوره تناوب (میلی متر)	دامنه (میلی متر)	با/ بدون نازل
۱	صفر (صفحه تخت)	صفر (صفحه تخت)	
۲	۲۰/۰۱۲۵	۲/۵	

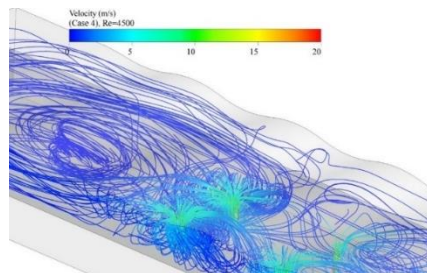
۳	۲۰/۰۱۲۵	۵	
۴	۴۰/۰۲۵	۲/۵	
۵	۴۰/۰۲۵	۵	بدون نازل
۶	۸۰/۰۵	۲/۵	(خروج جت از یک روزنه)
۷	۸۰/۰۵	۵	
۸	۱۶۰/۱	۲/۵	
۹	۱۶۰/۱	۵	
۱۰	صفر(صفحه تخت)	صفر(صفحه تخت)	
۱۱	۲۰/۰۱۲۵	۵	با نازل
۱۲	۴۰/۰۲۵	۵	(خروج جت از نازل)
۱۳	۸۰/۰۵	۵	(استوانه ای)
۱۴	۱۶۰/۱	۵	

ارزیابی هیدرودینامیکی بدون نازل / با نازل

شکل (۵) خطوط جریان در هیتر خورشیدی با جت برخوردی در هندسه های بدون نازل را نمایش می دهد. الگوی جریان ترسیم شده در هندسه های مورد مطالعه ناحیه های مرده که سیال در آن تقریباً ایستا و محبوس شده اند را نشان می دهند. همچنین فشردگی خطوط جریان و افزایش سرعت سیال در روزنه های عبوری جریان در شکل (۵)-الف کاملاً واضح است. از طرف دیگر، جت برخوردی به صفحات جاذب موج دار و آشفتگی ایجاد شده در جریان روی این صفحات در شکل (۵)-ب قابل مشاهده خواهد بود.



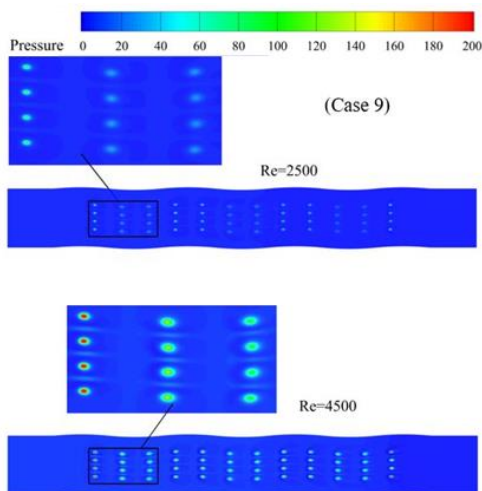
(ب)



(الف)

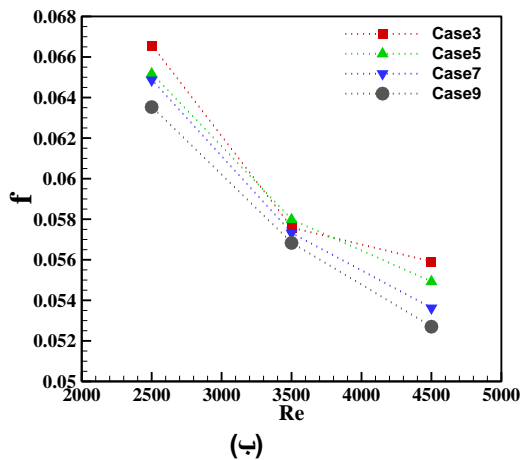
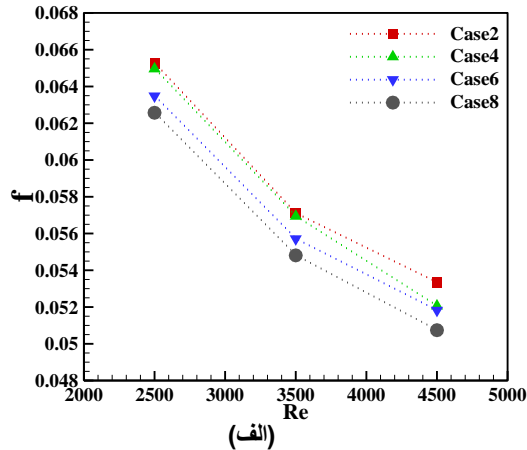
شکل (۵) خط جریان در هندسه بدون نازل

شکل (۶) کانتور فشار برای هندسه ۹ مورد مطالعه در دوره تناوب ۱/۱۶۰ میلیمتر و دامنه ۵ میلیمتر برای عدد های رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۵۰۰ را نمایش می دهد. مطابق شکل ۵ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ کانتور فشار دارای یکنواختی بیشتری می باشد. با افزایش عدد رینولدز به ۴۵۰۰ نقاط پر فشار قرمز رنگ در مرکز سوراخها قابل مشاهده است که علت این امر افزایش عدد رینولدز و افزایش نیروهای اینرسی می باشد.



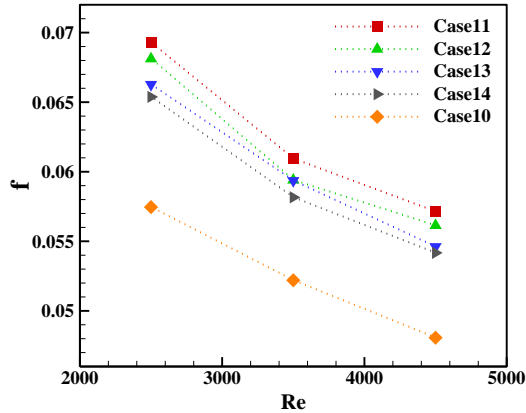
شکل (۶) تاثیر افزایش رینولدز در کانتور فشار در هندسه بدون نازل

شکل (۷) عدد بی بعد ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در دامنه های مختلف ۲/۵ و ۵ میلیمتر برای هندسه های بدون نازل قابل نمایش است. مطابق این شکل با کاهش دوره تناوب، ضریب اصطکاک افزایش یافته است. زیرا با افزایش دوره تناوب، مساحت سطح افزایش یافته در نتیجه سرعت جریان کاهش و سطح اصطکاک افزایش می یابد. برای مثال ضرایب اصطکاک بی بعد برای هندسه ۸ با دوره ی تناوب ۱/۱۶۰ میلی متر برای اعداد رینولدز ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ برابر ۰/۰۵۰۷۴، ۰/۰۵۴۸۱ و ۰/۰۶۲۵۷ می باشد. این ضرایب برای هندسه ۲ با دوره تناوب ۱۲۵/۰ میلی متر به ترتیب برابر ۰/۰۵۳۳۴، ۰/۰۵۷۱ و ۰/۰۶۵۲۶ می رسد که به طور میانگین با کاهش دوره ی تناوب از ۱/۱۶۰ به ۱۲۵/۰ میلی متر، حدود ۴/۵ درصد افزایش داشته است. با افزایش دامنه تاثیر مشابه کاهش دوره ی تناوب مشاهده می شود. با افزایش دامنه از ۲/۵ متر به ۵ میلی متر، ضریب اصطکاک بی بعد افزایش یافته است. به طور مثال در هندسه ۳ در دامنه ۵ میلی متر، ضریب اصطکاک بی بعد در اعداد رینولدز ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ به ترتیب برابر است ۰/۰۵۵۹۱، ۰/۰۵۷۵۸ و ۰/۰۶۶۵۶ می باشد که در مقایسه با ضرایب اصطکاک در هندسه ۲ با دوره تناوب یکسان به طور میانگین ۲/۵ درصد افزایش یافته است. مطابق انتظار با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش سرعت سیال، ضریب اصطکاک بی بعد در تمامی هندسه ها روند نزولی دارد.



شکل (۷) ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در دوره تناوب‌های متفاوت

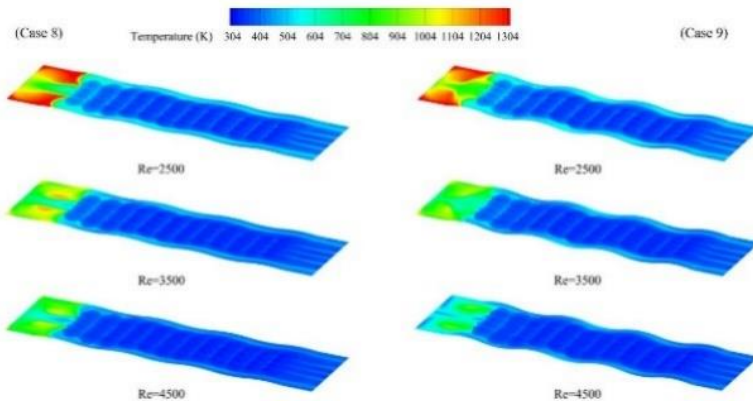
ضریب اصطکاک برای هندسه‌های نازل‌دار جت برخوردی را بر حسب عدد رینولدز در شکل (۸) نشان داده شده است. با کاهش دوره تناوب، مساحت سطح افزایش می‌یابد. این موضوع سبب افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. این پارامتر به دلیل افزایش افت فشار و افزایش سرعت سیال در اعداد رینولدز بالاتر، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. زیرا این ضریب به معکوس مجذور سرعت و افت فشار وابسته است. در تناوب‌های پایین‌تر با کاهش دوره تناوب این ضریب افزایش خواهد داشت. برای هندسه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ ضریب اصطکاک در عدد رینولدز ۲۵۰۰ به ترتیب برابر با ۰/۰۶۹۲، ۰/۰۶۸۱، ۰/۰۶۶۲ و ۰/۰۶۵۳ می‌باشد. همانطور که مشخص است با کاهش دوره تناوب از ۱۶۰/۱ به ۲۰/۰۱۲۵ میلی‌متر، ضریب اصطکاک افزایش ۶ درصدی خواهد داشت.



شکل (۸) ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در دوره تناوب‌های متفاوت در الف دامنه‌ی ثابت (۲/۵ میلی‌متر ب) دامنه‌ی ۵ میلی‌متر

ارزیابی حرارتی بدون نازل/ با نازل

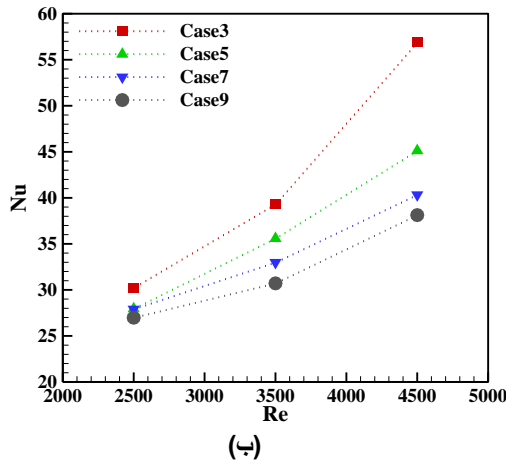
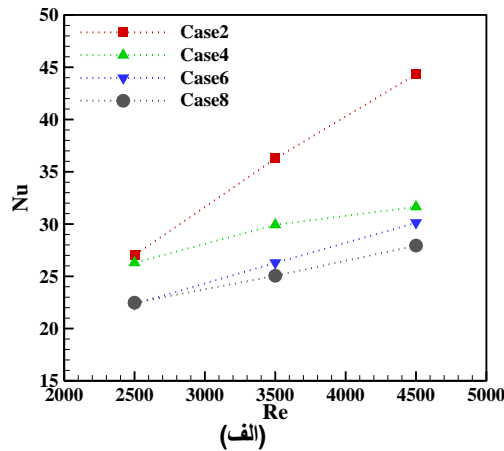
شکل (۹) مقایسه‌ی کانتورهای دمایی برای تغییرات در رینولدزهای مختلف برای هندسه‌های ۸ و ۹ مورد مطالعاتی را نمایش می‌دهد. در تمامی کانتورها در انتهای کانال جاذب، هوا محبوس شده است. چون در این ناحیه، هوا ساکن است و سرعت و گردشی ندارد، در تمام شکل‌ها با افزایش عدد رینولدز انتقال حرارت بهبود یافته و دمایی ناحیه‌ی محبوس شده کاهش یافته است.



شکل (۹) تاثیر تغییرات رینولدز در هندسه‌های ۸ و ۹

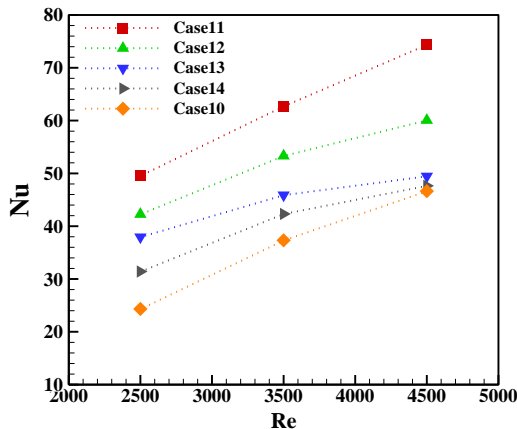
به منظور بررسی میزان انتقال حرارت، مقادیر تاسلت متوسط روی صفحه جاذب برای هندسه‌های مختلف برحسب تغییرات عدد رینولدز در شکل (۱۰) الف و ب نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۰) در دامنه ثابت با افزایش دوره تناوب مشاهده می‌شود عدد تاسلت افزایش داشته است. این افزایش ممکن است به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت و

نیز بهم ریختگی بیشتر لایه مرزی در کناره‌ی دیواره با طول موج بیشتر باشد. برای نمونه در دامنه‌ی ۵ میلی متر برای هندسه‌ی ۸ با دوره تناوب ۱/۱۶ میلی متر اعداد بی بعد ناسلت برای اعداد رینولدز ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ به ترتیب برابر ۲۶/۹۷۹، ۳۰/۷۱۱ و ۳۸/۱۲ می‌باشد. این اعداد برای هندسه‌ی ۳ با دوره تناوب ۱۲۵/۰ میلی متر به ترتیب برابر با ۳۰/۲۳۲، ۳۹/۳۶۶ و ۵۶/۸۸۹ می‌باشد که نشان می‌دهد کاهش دوره تناوب سبب افزایش ۳۰ درصدی عدد ناسلت در هندسه‌ی ۳ شده است. افزایش دامنه سبب افزایش سطح انتقال حرارت می‌شود، لذا اعداد ناسلت برای دامنه‌ی ۵ بیشتر از دامنه‌ی ۲/۵ میل متر می‌باشد. به طور میانگین برای هندسه‌ی ۳ با دامنه‌ی ۵ میلی متر نسبت به هندسه‌ی ۲ با دامنه‌ی ۲/۵ میلی متر حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز به علت افزایش آشفتگی‌های جریان عدد ناسلت روند صعودی دارد.



شکل (۱۰) تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در دوره تناوب‌های متفاوت در الف) دامنه‌ی ۲/۵ میلی متر ب) دامنه‌ی ۵ میلی متر

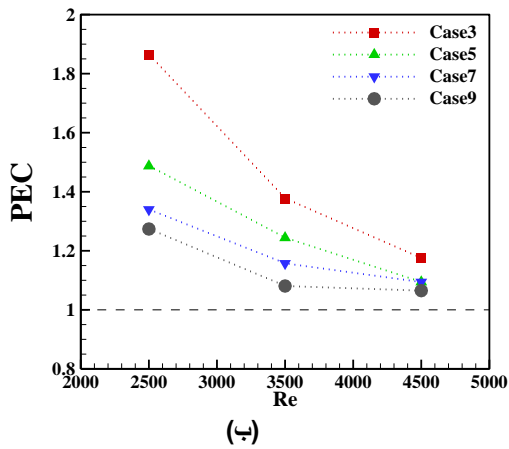
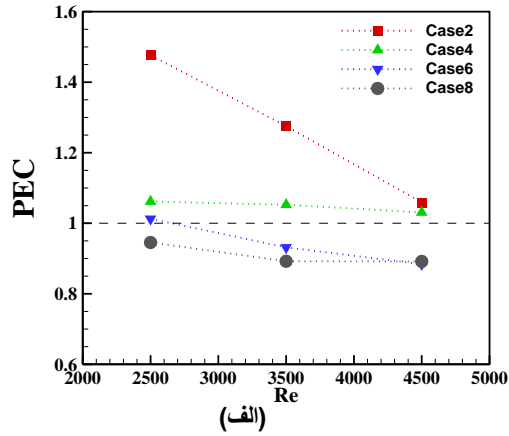
شکل (۱۱) تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدزهای متفاوت در هندسه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ را نمایش می‌دهد. اعداد ناسلت به ترتیب در عدد رینولدز ۴۵۰۰ برابر با ۷۴/۳۷، ۶۰/۰۶، ۴۹/۴۵، ۴۷/۶۴ می‌باشد. همانطور انتظار می‌رود با کاهش دوره تناوب سطح انتقال موثر حرارت افزایش و در نتیجه عدد ناسلت افزایش داشته است. به طور نمونه با کاهش دوره‌ی تناوب از ۱۶۰/۱ به ۲۰/۰۱۲۵ میل‌متر عدد ناسلت به طور میانگین حدود ۵۸ درصد افزایش داشته است.



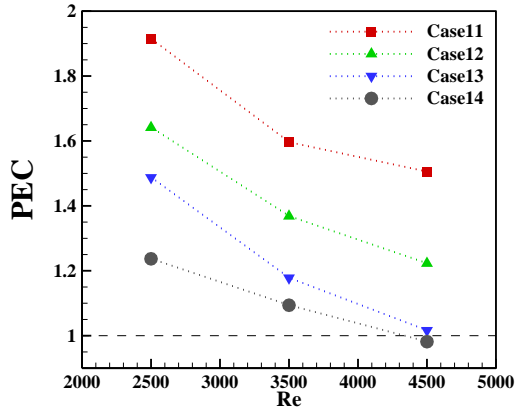
شکل (۱۱) تغییرات عدد ناسلت بر حسب رینولدزهای متفاوت در هندسه‌های با نازل

ارزیابی شاخص حرارتی-هیدرودینامیکی بدون نازل/ با نازل

معیارهای زیادی برای بررسی تاثیر همزمان حرارتی و هیدرولیکی وجود دارد که از معروفترین آن‌ها می‌توان به معیار ارزیابی عملکرد حرارتی اشاره کرد که این معیار در شکل (۱۲) الف و ب برای هندسه‌ها با دامنه ۲/۵ با دامنه‌ی ۵ میلی‌متر نشان داده شده است. در هر دو شکل‌ها با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد روند نزولی دارد. همانطور که مشاهده می‌شود هندسه با دوره تناوب ۲۰/۰۱۲۵ میلی‌متر دارای بهترین معیار ارزیابی عملکرد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود افزایش دامنه به علت افزایش انتقال حرارت، این ضرایب بهبود یافته‌اند؛ بطوریکه در هندسه‌ی ۳ و در عدد رینولدز ۲۵۰۰ این عدد به بیش از ۱/۸۶ رسیده است. هندسه‌های ۶ و ۸ مطابق شکل (۱۲) معیار ارزیابی عملکرد زیر ۱ داشته‌اند که نشان می‌دهد افت فشار نسبت به افزایش عدد ناسلت سهم بیشتری داشته است. شکل (۱۳) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد بر حسب عدد رینولدز در هندسه‌های با نازل را نشان خواهند داد.



شکل (۱۲) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد بر حسب عدد رینولدز در دوره تناوب‌های متفاوت در الف) دامنه‌ی ۲/۵ میلی‌متر ب) دامنه‌ی ۵ میلی‌متر



شکل (۱۳) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد بر حسب عدد رینولدز در هندسه های با نازل

راندمان حرارتی

مطابق جدول (۷) رابطه (۴) بیشترین حرارت گرفته شده توسط هوا برای هندسه با دامنه‌ی ۵ میلی متر و دوره تناوب ۲۰/۰۱۲۵ میلی متر می‌باشد. همچنین در شکل (۱۰) بالاترین عدد ناسلت مربوط به هندسه‌ی ۳ بوده است که با توجه به راندمان بدست آمده در این هندسه تطابق دارد. از مقایسه راندمان برای دو هندسه‌ی ۸ و ۳ نسبت به هندسه‌ی ۹ و ۲ مشاهده می‌گردد که افزایش دامنه سبب افزایش راندمان شده است. همچنین این اثر در کاهش دوره تناوب نیز دیده می‌شود.

جدول (۷) راندمان حرارتی برای هندسه‌های بدون نازل

عدد رینولدز	هندسه ۲	هندسه ۳	هندسه ۸	هندسه ۹
۲۵۰۰	۰/۵۹۴۳	۰/۶۲۱۸	۰/۵۷۹۴	۰/۵۸۴۴
۳۵۰۰	۰/۶۱۳۱	۰/۶۳۹۲	۰/۵۷۹۶	۰/۵۹۷۵
۴۵۰۰	۰/۶۱۸۲	۰/۶۴۱۷	۰/۵۸۴۷	۰/۶۰۸۰

همچنین مطابق جدول (۸) بیشترین حرارتی که هوا می‌تواند جذب کند، برای هندسه‌ای با دامنه‌ی ۵ میلی‌متر و دوره تناوب ۲۰/۰۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول (۸) راندمان حرارتی برای هندسه‌های با نازل

عدد رینولدز	هندسه ۱۱	هندسه ۱۲	هندسه ۱۳	هندسه ۱۴
۲۵۰۰	۰/۶۴۳۶	۰/۶۱۴۰	۰/۶۱۲۶	۰/۵۹۰۶

۳۵۰۰	۰/۶۴۷۱	۰/۶۳۲۲	۰/۶۲۰۳	۰/۵۹۲۲
۴۵۰۰	۰/۶۶۵۴	۰/۶۳۹۱	۰/۶۳۴۵	۰/۶۰۳۹

نتیجه گیری

در این پژوهش، هواگرمکن خورشیدی به عنوان یک فناوری مهم در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است. این تحقیق به بررسی عملکرد و عوامل مؤثر بر کارایی هواگرمکن خورشیدی می‌پردازد. شار خورشیدی در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شد. هواگرمکن خورشیدی شامل دو حالت هندسی مورد بررسی قرار گرفته است: حالت حضور و عدم حضور جت‌های برخوردی که به عنوان نازل اتصالی بین کانال ورودی و کانال صفحه‌ی جاذب عمل می‌کنند. صفحات جاذب در دو حالت تخت و موج‌دار با دوره تناوب‌ها ۲۰/۰۱۲۵، ۴۰/۰۲۵، ۸۰/۰۵۰ و ۱۶۰/۱ میلی‌متر و دامنه‌های ۲/۵ و ۵ میلی‌متر از لحاظ بهبود انتقال حرارت در سه عدد رینولدز ۲۵۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ مقایسه شدند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به شرح زیر می‌باشد.

- با افزایش دامنه و کاهش دوره تناوب انتقال حرارت افزایش و راندمان حرارتی بهبود یافت.
- با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش آشفتگی انتقال حرارت بهبود یافت و عدد ناسلت افزایش پیدا کرد.
- در هندسه‌های بدون جت برخوردی، بیشترین عدد ناسلت مربوط به هندسه‌ی ۳ در عدد رینولدز ۴۵۰۰ و برابر با ۵۶/۸۸۹ و کمترین عدد ناسلت برای هندسه‌ی ۸ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ برابر ۲۲/۴۷۴ بوده است.
- در هندسه‌های با حضور جت برخوردی، بیشترین عدد ناسلت مربوط به هندسه‌ی ۱۱ در عدد رینولدز ۴۵۰۰ و برابر با ۷۴/۳۷۴ و کمترین عدد ناسلت برای هندسه‌ی ۱۰ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ برابر ۲۴/۳۳ بوده است.
- در هندسه‌های بدون جت برخوردی، بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به هندسه‌ی ۳ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ برابر ۰/۰۶۵۲ و کمترین ضریب اصطکاک برای ۸ در عدد رینولدز ۴۵۰۰ و برابر با ۰/۰۵۰۷ می‌باشد.
- در هندسه‌های با حضور جت برخوردی، بیشترین ضریب اصطکاک مربوط به هندسه‌ی ۱۱ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ برابر ۰/۰۶۹۲ و کمترین ضریب اصطکاک برای ۱۰ در عدد رینولدز ۴۵۰۰ و برابر با ۰/۰۵۷۴ می‌باشد.
- به منظور بررسی همزمان حرارتی-هیدرودینامیکی معیار ارزیابی عملکرد معرفی شد. مطابق این معیار بیشترین معیار ارزیابی عملکرد در هندسه‌های بدون حضور جت برخوردی، برای هندسه‌ی ۳ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ و برابر با ۱/۸۶۳ می‌باشد.
- همچنین مطابق این معیار بیشترین معیار ارزیابی عملکرد در هندسه‌های با حضور جت برخوردی، برای هندسه‌ی ۱۱ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ و برابر با ۱/۹۱۴ می‌باشد.
- مشاهده شد در بین هندسه‌های بدون، هندسه‌های ۸ و ۶ و در بین هندسه‌های نازل‌دار، هندسه‌ی ۱۴ دارای معیار ارزیابی عملکرد زیر ۱ بوده و از نظر این معیار صرفه‌ی اقتصادی ندارد.

فهرست علائم

دامنه (mm)	R
دوره تناوب (mm)	T
مساحت سطح (m ²)	A
سرعت	V
فشار (Pa)	P
دما ورودى (K)	T_{inlet}
دما صفحه جاذب (K)	T_{pm}
دما خروجى (K)	T_{fo}
ضريب انتقال حرارتى همرفتى (W/m ² .K)	h
ظرفيت حرارتى ويژه (J/kg.K)	C_p
زمان (s)	t
انرژى توربولانسى	k
دبى جريان (kg/s)	\dot{m}
انرژى جنبشى آشفتگى (m ² /s ²)	P_k
عدد رينولدز	Re
عدد پرانتل	Pr
قطر هيدروليکى (mm)	D_h
عدد ناسلت	Nu
ضريب اصطکاک	f
مؤلفه‌هاى بردار سرعت	u
	اندیس‌ها
سيال پایه	f
میانگین	ave

علائم يونانى

ضریب هدایت حرارتی	λ
لزجت (kg/m.s)	μ
نرخ انتقال توربولانسی	ω
چگالی (kg/m^3)	ρ
اصطکاک جنبشی	ϑ
ثابت معادله ω	$\alpha, \beta, \sigma_\omega$
ثابت معادله k	β^*, σ_k
اختصارات	
ضریب ارزیابی عملکرد حرارتی	PEC
هواگرمن خورشیدی	SAH
دینامیک سیالات محاسباتی	CFD
پارامتر افزایش دما	TRP

References

- [1] Olivkar P. R., Katekar V. P., Deshmukh S. S., and Palatkar S. V. (2022). *Effect of sensible heat storage materials on the thermal performance of solar air heaters: State-of-the-art review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112085. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112085>
- [2] Kumar A., Saini R. P., and Saini J. S. (2014). *A review of thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 37, 100–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.063>
- [3] Mund C., Rathore S. K., and Sahoo R. K. (2021). *A review of solar air collectors about various modifications for performance enhancement*. *Solar Energy*. 228, 140–167. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.040>
- [4] Ghritlahre H., Verma M., Parihar J., (2022). *A detailed review of various types of solar air heaters performance*. *Solar Energy*. 237, 173–195. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.042>
- [5] Hegde A., Pai R., Karanth K., (2023), *Performance augmentation of solar air heaters: A comprehensive analysis*. *Solar Energy*. 253, 527-553. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.031>
- [6] El-Bialy E., Shalaby S.M., (2023). *Recent developments and cost analysis of different configurations of the solar air heaters*. *Solar Energy*. 265, 112091. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112091>

- [7] Solangi K. H., Islam M. R., Saidur R., Rahim N. A. and Fayaz H. (2100). *A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 2149–2163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.007>
- [8] Yadav S. and Saini R. P. (2020). *Numerical investigation on the performance of a solar air heater using jet impingement with absorber plate. Solar Energy*, 208, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.088>
- [9] Angioletti M., Nino E., and Ruocco G. (2005). *CFD turbulent modelling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements. International Journal of Thermal Sciences*, 44 (4) 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.11.010>
- [10] Matheswaran M. M., Arjunan T. V. and Somasundaram D. (2018). *Analytical investigation of solar air heater with jet impingement using energy and exergy analysis. Solar Energy*, 161, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.036>
- [11] Misra R. (2020). *Prediction of behavior of triangular solar air heater duct using V-down rib with multiple gaps and turbulence promoters as artificial roughness: A CFD analysis. Int J Heat Mass Transf*, 162. 120376. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120376>
- [12] Murali G., Rama Krishna Reddy K., Trinath Sai Kumar M., SaiManikanta J. (2020). *Performance of solar aluminium can air heater using sensible heat storage. Materterial stoday Proc*, 21, 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.213>
- [13] Nidhul K., Kumar S., Yadav A. K., Anish S. (2020). *Enhanced thermo-hydraulic performance in a V-ribbed triangular duct solar air heater: CFD and exergy analysis. Energy*, 200, 117448. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117448>
- [14] Yadav A. S. , Bhagoria J. L. (2014). *A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate. Int J Heat Mass Transf*, 70, 1016–1039. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.074>
- [15] Gupta A. D. and Varshney L. (2017). *Performance prediction for solar air heater having rectangular sectioned tapered rib roughness using CFD. Thermal Science and Engineering Progress*, 4, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.09.005>
- [16] Singh I., Singh S. (2018). *CFD analysis of solar air heater duct having square wave profiled transverse ribs as roughness elements. Solar Energy*, 162, 442–453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.019>
- [17] Yadav S., Saini R. P., Pandey K. M. (2023). *Effect of jet angle and jet pitch on the Thermo-Hydraulic performance of solar air heater having absorber plate with jet impingement. Thermal Science and Engineering Progress*, 45, 102146. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102146>
- [18] Farahani S. D. , Shadi M. (2021). *Optimization-decision making of roughened solar air heaters with impingement jets based on 3E analysis. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 129, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105742>
- [19] Gawande V. B., Dhoble A. S., Zodpe D. B. Fale S. G. (2020). *Thermal performance evaluation of solar air heater using combined square and equilateral triangular rib roughness. Australian Journal of Mechanical Engineering*, 18 (2), 234–244. <https://doi.org/10.1080/14484846.2018.1519986>

- [20] Rajaseenivasan T., Ravi Prasanth S., Salamon M. (2017). *Experimental investigation on the performance of an impinging jet solar air heater*. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (1), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.09.004>
- [21] Sharma A., Thakur S, Dhiman P., Kumar R., (2024). *Effect of jet-impingement and surface roughness on performance of solar air heater: Experimental study and its optimization*. *Expert Systems With Applications*, 238, 122208. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122208>
- [22] Srivastav A., Maithani R., Sharma S. (2024), *investigation of heat transfer and friction characteristics of solar air heater through an array of submerged impinging jets*. *Renewable Energy*. 227, 120588. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120588>
- [23] Tannous H., Stojceska V., Tavares J., Tassou S., (2024). *Design, numerical optimisation and experimental validation of an innovative solar-powered tube heater with multiple air impingement jets*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55, 102990. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102990>
- [24] Chauhan R., Singh T., Thakur N. S., Patnaik A. (2016). *Optimization of parameters in solar thermal collector provided with impinging air jets based upon preference selection index method*. *Renew Energy*, 99, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.046>