

بررسی راندمان انرژی و انرژی هواگرمکن خورشیدی با

صفحه جاذب دنداندار با استفاده از مدلسازی ریاضی

هدف از این مطالعه بررسی تاثیر فاصله بین شیشه و جاذب، ارتفاع دندانهای صفحه جاذب، نرخ دبی جرمی هوای ورودی به هواگرمکن، بر راندمان انرژی و انرژی یک هواگرمکن خورشیدی با صفحه جاذب دنداندار به کمک مدلسازی ریاضی می باشد. هواگرمکن مورد نظر از نوع دومسیره است و طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۲، ۱ و ۰/۲ متر است. فاصله بین شیشه و صفحه جاذب به ترتیب ۱/۲۵، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ سانتیمتر است. نتایج نشان می دهد که با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب، بازده حرارتی ۹ درصد و بازده انرژی ۳۰ درصد افزایش می یابد. همچنین افزایش ارتفاع دندانهای جاذب بیش از ۱۰ سانتیمتر، سبب تغییرات محسوس در راندمان قانون اول و دوم نخواهد شد.

پریسا آذری^۱

دانشجوی دکترا

آرش میرعبداله لواسانی^۲

دانشیار

نادر رهبر^۳

استادیار

واژه های راهنما: هواگرمکن خورشیدی، جاذب دنداندار، مدلسازی ریاضی، بازده انرژی، انرژی.

۱- مقدمه

از انرژی خورشیدی که به عنوان یک منبع انرژی پاک و ارزان به صورت فراوان در دسترس است، می توان برای گرمایش هوا به جهت کاربردهای مختلفی از جمله خشک کردن برخی محصولات کشاورزی و همچنین در سیستم های تهویه مطبوع و در گلخانه ها بهره برد. هواگرمکن های خورشیدی به انواع تک مسیره، دومسیره و چندمسیره تقسیم بندی می شوند. بازدهی هواگرمکن های خورشیدی به عوامل مختلفی همچون شدت تابش خورشید و خواص حرارتی صفحه جاذب و ... بستگی دارد. محققان مختلف برای افزایش بازدهی هواگرمکن ها با استفاده از روش های مختلف اقداماتی را انجام داده اند. از جمله این اقدامات، افزایش ضریب انتقال حرارت بین هوا و صفحه جاذب می باشد. از بین تغییراتی که در ساختار صفحه جاذب توسط محققان انجام شده می توان به دنداندار نمودن صفحه جاذب اشاره نمود. ریس^۴ و همکاران [۱] یک شیوه طراحی برای هواگرمکن خورشیدی صفحه تخت با کمترین میزان تولید انرژی را ارائه دادند.

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
parisaazari@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
arashlavasani@iauctb.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران rahbar@semnaniau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۷

آنها از یک روش بهینه‌سازی ترمودینامیکی برای تعیین پارامترهای عملکرد بهینه هواگرمن خورشیدی استفاده نمودند. روشی که آنها ارائه دادند می‌توانست برای هر هندسه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و یک راهنمای مهم برای تصمیم‌گیری در طراحی سیستم‌های خورشیدی باشد. کورتباس^۱ و دورماس^۲ [۲] پنج نوع مختلف هواگرمن با انواع آرایش جریان روی صفحه جاذب را از نظر بازدهی با هم مقایسه کردند. نتایج کار آنها نشان داد که با زیاد شدن زبری سطح، انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که تخریب انرژی سیستم با افزایش بازده کلکتور کاهش می‌یابد و یک رابطه معکوس بین انهدام انرژی و انتقال حرارت وجود دارد. نافون^۳ [۳] اقداماتی را بر روی عملکرد و تولید انرژی یک هواگرمن خورشیدی دومیسیره با پره‌های طولی به صورت عددی انجام داد. او یک مدل ریاضی ارائه داد که با استفاده از معادلات بقای انرژی به دست آمده بود. او اثر شرایط ورودی سیال عامل و ابعاد هواگرمن بر روی انتقال حرارت، عملکرد و تولید انرژی را بررسی نمود. او نتیجه گرفت که بازده حرارتی با افزایش ارتفاع و تعداد پره‌ها افزایش می‌یابد. کارسلی^۴ [۴] چهار نوع هواگرمن با زوایای جهت‌گیری مختلف و با صفحات جاذب مختلف را به صورت تجربی بررسی کرد. او بازده قانون اول و دوم را برای چهار نوع هواگرمن تحلیل کرد. بیشترین بازده را هواگرمن با صفحه جاذب پره‌دار و با زاویه استقرار ۷۵ درجه داشت. اسن^۵ [۵] به صورت تجربی عملکرد نوعی کلکتور خورشیدی دومیسیره با چهار نوع صفحه جاذب متفاوت را مقایسه نمود. همچنین او روابط انرژی مربوط به این چهار نوع کلکتور را نیز بررسی کرد. نتایج کار او نشان داد که بیشترین برگشت‌ناپذیری در کلکتور با صفحه جاذب تخت و بدون مانع رخ می‌دهد در حالی که این نوع هواگرمن کمترین بازده را دارد. اوزتوپ^۶ و همکاران [۶] در یک مطالعه مروری جنبه‌های انرژی و انرژی سیستم‌های هواگرمن خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بر روی روش‌های آنالیز انرژی مطالعات زیادی توسط محققان انجام شده در حالیکه بر روی روش‌های تحلیل انرژی مطالعات کمتری انجام شده است. الیم^۷ و همکاران [۷] تولید انرژی و افت فشار در یک هواگرمن خورشیدی را که در آن از نانوسیال استفاده شده بود، تحلیل کردند. آنها تولید انرژی، افت فشار و ظرفیت افزایش انتقال حرارت بوجود آمده در اثر نانوسیال‌ها را درون یک هواگرمن صفحه تخت بررسی کردند. نتیجه به دست آمده از کار آنها نشان داد که نانوسیال اکسید مس (CuO) تولید انرژی را کاهش داده و ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با آب (به عنوان سیال جاذب) افزایش می‌دهد. کریم و همکاران^۸ [۸] یک هواگرمن دومیسیره دندان‌ای را به صورت تئوری با یک نمونه تجربی مقایسه نمودند. آنها دریافتند که شدت تابش خورشید، دمای هوای ورودی، نرخ جریان و طول اثر موثری روی بازده هواگرمن دارند.

¹ Kurtbas² Durmuş³ Naphon⁴ Karsli⁵ Esen⁶ Oztop⁷ Alim⁸ Karim

بهره‌مند و همکاران^۱ [۹] به شبیه‌سازی رفتار حرارتی دو هواگرمن تک‌جداره و دوجداره با جریان جابجایی اجباری پرداختند. آنها دریافتند که در اعداد رینولدز بالا، مقدار بازده انرژی برای هواگرمن با شیشه دوجداره منفی است. ابوشکا^۲ و سویک^۳ [۱۱] در یک مطالعه تجربی به تحلیل انرژی و اقتصادی هواگرمن خورشیدی با صفحه تخت و با صفحه جذب دنداندار پرداختند. آنها از دو فلز مختلف مس و آلومینیوم به عنوان جذب استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که هواگرمن با صفحه جذب دنداندار و از جنس فلز مس بهترین عملکرد را دارد. انصاری^۴ و بازگان^۵ [۱۲] در یک مطالعه به بررسی افت فشار و بهینه‌سازی انتقال حرارت در هواگرمن خورشیدی دنداندار پرداختند. از نظر آنها وجود دندان در سطوح هواگرمن انتقال حرارت را افزایش داده ولی سبب افت فشار نیز می‌شود. آنها برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. ابوشکا^۶ [۱۳] در یک تحقیق تجربی عملکرد حرارتی یک صفحه جذب با طراحی جدید و دارای دندانهای به شکل مخروط را بررسی نموده و آن را با کلکتور صفحه تخت در یک هواگرمن تک-مسیره مقایسه کرد. طبق آزمایشات او بیشترین بازده حرارتی برای هواگرمن خورشیدی با صفحه جذب دارای دندانهای مخروطی به دست آمد. یورال^۷ [۱۴] ارزیابی انرژی و انرژی و عملکرد تجربی یک هواگرمن صفحه تخت که در جذب آن از پارچه استفاده شده بود را بررسی کرد. او هواگرمن فوق را با یک کلکتور صفحه تخت نیز مقایسه کرد. او نتیجه گرفت که استفاده از پارچه باعث بهبود عملکرد انرژی و انرژی در هواگرمن می‌شود. همچنین او دریافت که پارچه افت فشار در کلکتور را افزایش می‌دهد. ردی و همکاران^۸ [۱۵] تحلیل انرژی و انرژی یک هواگرمن خورشیدی با صفحه جذب موجدار که مجهز به سیستم ترکیبی ویژه‌ای بود را مطالعه کردند. بیشترین بازده حرارتی و بازده قانون دوم در کار تحقیقاتی آنها به ترتیب ۳۷/۲۲ و ۱۱/۵۸ درصد بود.

فاده‌ولی^۹ و سویان^{۱۰} [۱۶] در مقاله مروری نکاتی را در مورد هواگرمن‌های خورشیدی صفحه تخت ارائه کرده‌اند. آنها مطالبی را در مورد عملکرد هواگرمن‌ها به خصوص در مورد ارزیابی عملکرد انرژی و انرژی آنها گزارش کردند. طبق بررسی‌های آنها محدوده بازده حرارتی کلکتورها در آزمایشات داخلی بین ۳۰ تا ۷۹ درصد و محدوده بازده انرژی بین ۸ تا ۶۱ درصد بوده است. رام دیپ^{۱۱} و اسریکومار^{۱۲} [۱۷] در یک مطالعه تجربی، تحلیل انرژی و انرژی یک هواگرمن خورشیدی تک مسیره جریان موازی که در آن از پره‌های گرد در مسیر جریان هوا استفاده شده بود را بررسی کردند. آنها از پره‌های گرد برای افزایش انتقال حرارت جابجایی درون هواگرمن استفاده نمودند.

¹ Bahrehmand

² Abuşka

³ Şevik

⁴ Ansari

⁵ Bazargan

⁶ Abuşka

⁷ Ural

⁸ Reddy

⁹ Fudholi

¹⁰ Sopian

¹¹ Raam Dheep

¹² Sreekumar

همچنین آنها برای پنج مقدار دبی جرمی مختلف، آزمایشات خود را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که برای نرخ جریان کمتر، دمای هوای خروجی از هواگرمن بیشتر است. حاتمی^۱ و همکاران [۱۸] نیز تحلیل انرژی و آگزرژی یک خشک‌کن خورشیدی بر پایه یک مدل دینامیکی را انجام دادند. آنها در مدل دینامیکی خود اثر پارامترهای مختلف از جمله تشعشع دریافتی توسط سطح کلکتور، تغییرات دما در طول کلکتور و سایر موارد را در نظر گرفتند. مدل آنها با نتایج تجربی موجود مطابقت خوبی داشت. ما^۲ و همکاران [۱۹] در یک کار تحقیقاتی تحلیل انرژی و آگزرژی یک سیستم خشک‌کن را بررسی کردند که با یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر پایه هوا ترکیب شده و از مواد دارای قابلیت تغییر فاز^۳ و یک هواگرمن خورشیدی فتوولتاییک در ساختار آنها استفاده شده بود. آنها عملکرد این سیستم را با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس^۴ تخمین زدند. همچنین اثر چندین پارامتر مختلف مانند نحوه توزیع حرارت و آگزرژی را بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که در بخش هواگرمن خورشیدی فتوولتاییک، سیستم تخریب آگزرژی بیشتری دارد.

با توجه به اینکه رسیدن به راندمان بالاتر در هواگرمن‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، بنابراین لازم است طراحی یک هواگرمن خورشیدی بهینه انجام شود. از طرفی به دلیل اینکه فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی برای ثبت نتایج تجربی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد و مشکلات فراوانی در پی دارد، بنابراین روش مدلسازی ریاضی می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب در اختیار محققان قرار گیرد. طبق بررسی‌های انجام شده، تاکنون برای بررسی راندمان انرژی و به خصوص راندمان آگزرژی هواگرمن‌های خورشیدی با صفحه جاذب دنداندار مطالعات بسیار اندکی انجام شده است. بنابراین هدف این پژوهش ایجاد یک مدل ریاضی برای مطالعه پارامترهای موثر در راندمان انرژی و آگزرژی هواگرمن خورشیدی با صفحه جاذب دنداندار می‌باشد. شایان ذکر است مبنای انتخاب ابعاد هندسی و جنس دیواره‌ها و سایر مشخصات هواگرمن بررسی شده در این مقاله جهت اعتبارسنجی و صحت‌سنجی، مطابق با مقاله اشاره شده در مرجع [۸] می‌باشد. با توجه به مطالعات اشاره شده و بررسی‌های انجام گرفته، مدلسازی ریاضی در خصوص تاثیر فاصله بین شیشه و جاذب، ارتفاع دندان‌های صفحه جاذب، نرخ دبی جرمی هوای ورودی به هواگرمن بر عملکرد یک هواگرمن خورشیدی با صفحه جاذب دنداندار و همچنین استخراج معادلات موازنه آگزرژی و بررسی راندمان آگزرژی در شدت‌های مختلف تابش خورشید انجام نشده است. لذا در این مطالعه موارد فوق انجام خواهد شد.

۲- بیان مسئله

۲-۱- شرح فیزیک مسئله

هواگرمن مورد مطالعه در شکل‌های (۱) و (۲) مشخص شده است. این هواگرمن از نوع دومسیره با طول ۲ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۲ متر است. در هواگرمن دومسیره تحت بررسی ابتدا هوای ورودی در سطح بالایی کلکتور جریان یافته و سپس تغییر مسیر داده و در زیر کلکتور به مسیر خود ادامه داده و به انتهای آن

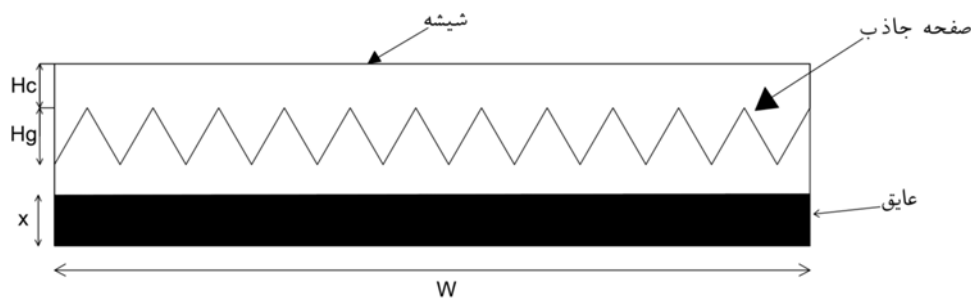
¹ Hatami

² Ma

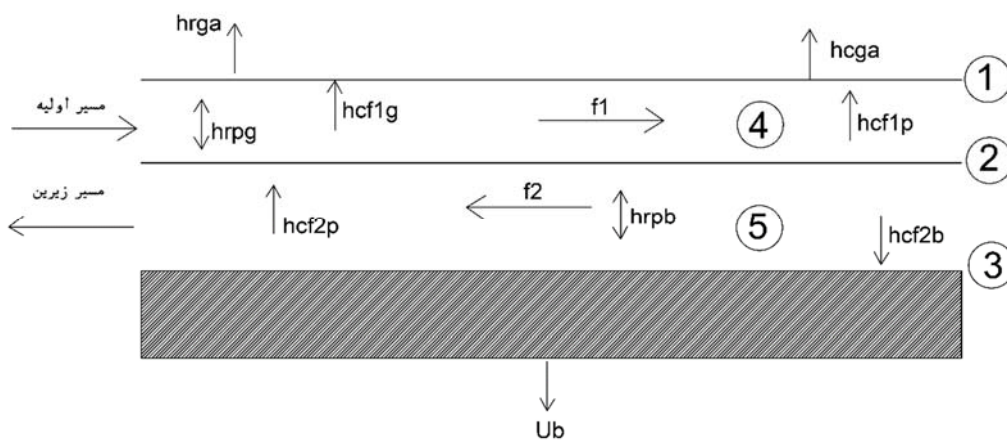
³ Phase Change Materials

⁴ TRNSYS

می‌رسد. هواگرمن مذکور دارای یک صفحه جاذب با دندان‌های به شکل وی (V) می‌باشد که زاویه هر یک از دندان‌ها ۶۰ درجه است. در این تحقیق ابتدا فرض شده که فاصله بین جاذب و شیشه ۲۵ میلیمتر و ارتفاع دندان‌های وی شکل ۵۰ میلیمتر است. جنس صفحه جاذب از آلیاژ استیل-آلومینیوم بوده که با رنگ سیاه پوشش داده شده و جنس دیواره‌های هواگرمن فولادی است. شایان ذکر است کلیه فرضیات برای ابعاد اولیه جهت هواگرمن، از جمله فاصله بین شیشه و جاذب، ارتفاع دندان‌های مثلثی شکل، زاویه دندان‌ها و جنس اجزای هواگرمن، به منظور مقایسه و صحت‌سنجی نتایج، مطابق با مقاله کریم و همکاران [۸] در نظر گرفته شده است. پس از صحت‌سنجی، به منظور بررسی اثر تغییر فاصله بین شیشه و جاذب و همچنین اثر ارتفاع دندان‌های جاذب، این موارد تغییر داده شده‌اند. محدوده تغییرات عدد رینولدز در دو کانال هوای ۱ و ۲ در این تحقیق با توجه به فاصله بین شیشه و صفحه جاذب و همچنین ارتفاع دندان‌های جاذب و دبی جرمی هوای عبوری، بین ۵۵۰ تا ۷۶۰۰ طبق رابطه ۹ محاسبه شده است.



شکل ۱- طرحواره صفحه جاذب با دندان‌های V شکل



شکل ۲- طرحواره هواگرمن خورشیدی دومسیره

جدول ۱- مشخصات هواگرمن دو مسیره مدلسازی شده

طول هواگرمن (L)	۲ متر
عرض هواگرمن (W)	۱ متر
ε_g	۰/۹۴
ε_p	۰/۹
ε_b	۰/۹۴
α_g	۰/۰۶
α_p	۰/۹۵
τ_g	۰/۸۴

در شکل (۲) هواگرمن دومسیره نشان داده شده است. اجزای این سیستم همانطور که در شکل مشخص است شامل پوشش شیشه‌ای (۱)، صفحه جاذب (۲)، صفحه زیرین (۳)، کانال هوا بین شیشه و جاذب (۴) و کانال هوا بین جاذب و صفحه زیرین (۵) می‌باشد. ضرایب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه و هوا، بین جاذب و شیشه، بین جاذب و صفحه زیرین به ترتیب با $h_{rpb}, h_{rpg}, h_{rga}$ نشان داده شده است. همچنین $h_{cf2b}, h_{cf2p}, h_{cf1p}, h_{cf1g}, h_{cga}$ به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و هوا، بین هوا در کانال بالایی و شیشه، بین هوا در کانال بالایی و جاذب، بین هوا در کانال پایینی و جاذب و بین هوا در کانال پایینی و صفحه زیرین می‌باشد. در جدول شماره (۱) مشخصات هواگرمن دومسیره مدلسازی شده مشخص شده است. در این جدول $\tau_g, \alpha_p, \alpha_g, \varepsilon_p, \varepsilon_g$ به ترتیب شامل ضرایب گسیل، جذب، و عبور در شیشه و صفحه جاذب هواگرمن می‌باشد.

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر اجزای هواگرمن دومسیره در دو بخش موازنه انرژی و انرژی به شرح زیر می‌باشد.

۲-۲-۱- معادلات موازنه انرژی

مجموع انرژی دریافت شده توسط پوشش شیشه‌ای (از تابش خورشید و انتقال حرارت جابجایی بین هوای درون کانال بالایی و شیشه، و انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه و جاذب) برابر با مجموع انرژی از دست رفته از طریق تشعشع و انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و هوای محیط است. موازنه انرژی در پوشش شیشه ای به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{\rho_g c_{p,g} x_g A_g} [\alpha_g S - h_{cgf1}(T_g - T_{f1}) - h_w(T_g - T_a) - h_{rgp}(T_g - T_p)] \quad (۱)$$

در رابطه بالا S شدت تابش خورشید بوده و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۸]:

$$S = \alpha_g I \quad (۲)$$

ضریب انتقال حرارت شیشه با هوای مجاور به کمک معادله زیر محاسبه می شود [۸]:

$$h_{cga} = 5.7 + 3.8 v_{wind} \quad (۳)$$

محاسبه ضریب انتقال حرارت تابشی بین دو صفحه با معادله زیر انجام می شود [۸]:

$$h_{nj} = \left(\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)^{-1} \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \quad (۴)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و هوای درون کانال از تعریف عدد ناسلت استفاده می‌شود.

$$h_{cgf1} = Nu \frac{k}{D_h} \quad (۵)$$

که با توجه به دندانهای بودن صفحه جاذب، رابطه مربوطه به صورت زیر اصلاح می‌شود [۸]:

$$h_{cgf} = \left(Nu \frac{k}{D_h} \right) \left(\frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) \quad (۶)$$

که θ زاویه دندانهای صفحه جاذب بوده و D_h قطر هیدرولیکی می‌باشد و برابر است با [۸]:

$$D_h = H_c + \frac{H_g}{2} \quad (۷)$$

همچنین در رابطه بالا H_c فاصله بین پوشش شیشه‌ای و جاذب و H_g ارتفاع دندانهای صفحه جاذب است. انرژی دریافت شده توسط هوای درون کانال بالایی هواگرمکن از طریق انتقال حرارت جابجایی از جاذب به هوا، با حرارت منتقل شده از هوا به شیشه برابر است. موازنه انرژی در کانال هوا بین پوشش شیشه‌ای و صفحه جاذب به صورت زیر است:

$$\frac{dT_{f1}}{dt} = \frac{1}{\rho_f c_{p,f} D_1} [h_{cgf1} (T_g - T_{f1}) - h_{cf1p} (T_{f1} - T_p) - \frac{2mc_f}{wL} (T_{f1} - T_a)] \quad (۸)$$

عدد رینولدز به کمک رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۸].

$$Re = \frac{\rho U_f D_h}{\mu} \quad (۹)$$

عدد ناسلت با توجه به محدوده عدد رینولدز محاسبه می‌شود. اگر $Re < 2800$ ، $2800 < Re < 10^4$ و یا $10^4 < Re < 10^5$ باشد، عدد ناسلت به ترتیب به کمک روابط (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شود [۸].

$$Nu = 2.821 + 0.126 Re \frac{H_g}{L} \quad (۱۰)$$

$$Nu = 1.9 \times 10^{-6} Re^{1.79} + 225 \frac{H_g}{L} \quad (11)$$

$$Nu = 0.032 Re^{0.74} + 0.242 Re^{0.74} \frac{H_g}{L} \quad (12)$$

انرژی منتقل شده به جاذب (از طریق انتقال حرارت جابجایی از هوای درون کانال زیرین و تشعشع از صفحه زیرین)، با حرارت منتقل شده از جاذب به هوای درون کانال بالایی از طریق جابجایی و تشعشع با شیشه برابر است. موازنه انرژی در صفحه جاذب به کمک رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{\rho_p c_p A_p x_p} [\alpha_p \tau_g S + h_{rgp}(T_g - T_p) + h_{cf1p}(T_{f1} - T_p) - h_{cpf2}(T_p - T_{f2}) - h_{rpb}(T_p - T_b)] \quad (13)$$

انرژی دریافت شده توسط هوای درون کانال ۲ از طریق جابجایی با صفحه زیرین، با انرژی منتقل شده از هوا به جاذب برابر است. موازنه انرژی در کانال هوا بین صفحه جاذب و صفحه زیرین به کمک رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\frac{dT_{f2}}{dt} = \frac{1}{\rho_f c_{pf} D_2} [h_{cpf2}(T_p - T_{f2}) - h_{cf2b}(T_{f2} - T_b) - \frac{2\dot{m}c_{pf}}{wL}(T_{f2} - 2T_{f1} + T_a)] \quad (14)$$

انرژی دریافت شده توسط صفحه زیرین برابر با مجموع انرژی منتقل شده از طریق جابجایی از هوای درون کانال ۲ و تشعشع از صفحه جاذب و تبادل انرژی با هوای محیط است. موازنه انرژی در صفحه زیرین به کمک رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{\rho_b c_{p,b} A_b x_b} [h_{cf2b}(T_{f2} - T_b) + h_{rpb}(T_p - T_b) - U_b(T_b - T_a)] \quad (15)$$

ضریب انتقال حرارت در صفحه زیرین به کمک رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود [۸].

$$U_b = \frac{1}{\frac{X}{k_i} + \frac{1}{h_w}} \quad (16)$$

همچنین بازده هواگرمن دو مسیره با جاذب دارای دندان‌های وی شکل (V) به کمک رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد [۸]:

$$\eta = \frac{mc_p(t_o - t_{fi})}{I} \quad (17)$$

که t_o دمای هوای خروجی از هواگرمن و t_{fi} دمای هوای ورودی به آن است.

۲-۲-۲- معادلات موازنه آگزرژی

آگزرژی به مفهوم بیشینه کار تئوری به دست آمده در پایان یک فرایند برگشت‌پذیر می‌باشد [۷]. تحلیل انرژی بر پایه قانون اول ترمودینامیک بوده در حالی که تحلیل آگزرژی از مفهوم قانون دوم ترمودینامیک به

دست می‌آید. از مفهوم تخریب اگزرژی یا برگشت‌ناپذیری در تحلیل اگزرژی سیستم‌های حرارتی استفاده می‌شود. اگزرژی تابش خورشید با استفاده از رابطه پتلا^۱ محاسبه می‌شود [۹].

$$Ex_{sun} = I(t)A \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، T_a دمای هوای محیط است و همچنین T_{sun} دمای سطح خورشید است که برابر با ۶۰۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود. همچنین $I(t)$ و A به ترتیب شدت تابش خورشید و مساحت سطح سیستم در تماس با خورشید است. همچنین انتقال اگزرژی از یک سیستم در دمای T به محیط در دمای T_a به کمک رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) \quad (19)$$

در رابطه بالا، Q انتقال حرارت در اثر هدایت، جابجایی و تبخیر است. تخریب اگزرژی در شیشه از رابطه زیر به دست می‌آید.

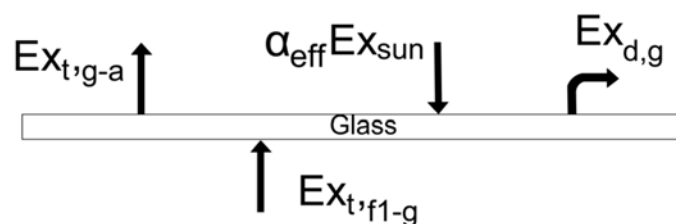
$$Ex_{d-g} = \alpha_{eff-g} Ex_{sun} + Ex_{t-f1-g} - Ex_{t-g-a} \quad (20)$$

که $\alpha_{eff-g} Ex_{sun}$ اگزرژی جذب شده از خورشید توسط شیشه بوده و Ex_{t-f1-g} مجموع اگزرژی مرتبط با انتقال حرارت بین هوای درون کانال ۱ و شیشه و همچنین Ex_{t-g-a} نشاندهنده اگزرژی منتقل شده از شیشه به هوای محیط است.

تخریب اگزرژی در صفحه جاذب به کمک رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

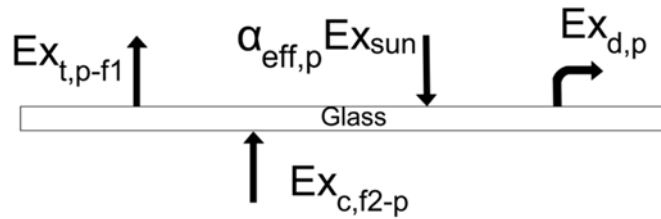
$$Ex_{d-p} = \alpha_{eff-p} Ex_{sun} + Ex_{c-f2-p} - Ex_{t-p-f1} \quad (21)$$

که $\alpha_{eff-p} Ex_{sun}$ اگزرژی جذب شده از خورشید توسط جاذب بوده و Ex_{c-f2-p} اگزرژی منتقل شده از جاذب به هوای درون کانال زیرین، و Ex_{t-p-f1} نشاندهنده مجموع اگزرژی مرتبط با انتقال حرارت بین جاذب و هوای درون کانال بالایی است.

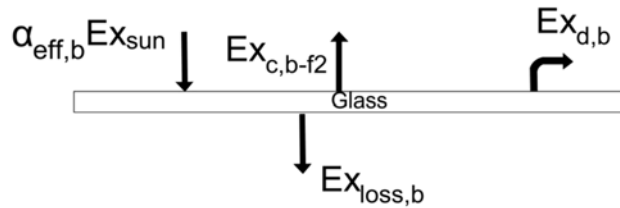


شکل ۳- دیاگرام موازنه اگزرژی در پوشش شیشه‌ای

¹ Petela



شکل ۴- دیاگرام موازنه انرژی در صفحه جاذب



شکل ۵- دیاگرام موازنه انرژی در صفحه زیرین

تخریب انرژی در صفحه زیرین مطابق رابطه (۲۲) می‌باشد.

$$Ex_{d-b} = \alpha_{eff-b} Ex_{sun} + Ex_{loss-b} - Ex_{c-b-f2} \quad (22)$$

که $\alpha_{eff-b} Ex_{sun}$ انرژی جذب شده از خورشید توسط صفحه زیرین بوده و Ex_{c-b-f2} انرژی منتقل شده از صفحه زیرین به هوای درون کانال ۲، و Ex_{loss-b} نشان‌دهنده انرژی منتقل شده از صفحه زیرین به محیط است.

تخریب انرژی در کانال هوا بین شیشه و جاذب بر طبق رابطه (۲۳) به دست می‌آید.

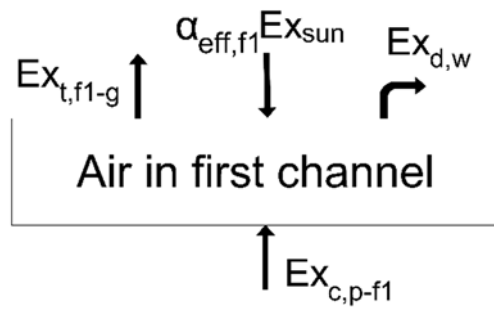
$$Ex_{d-f1} = \alpha_{eff-f1} Ex_{sun} + Ex_{c-p-f1} - Ex_{t-f1-g} - \Delta Ex_{f1} \quad (23)$$

$$\Delta Ex_{f1} = M_{f1} C_{p-f} ((T_{f1-o} - T_{f1-in}) - \frac{T_a}{\Delta t} \ln(\frac{T_{f1-o}}{T_{f1-i}})) \quad [17] \quad (24)$$

که $\alpha_{eff-f1} Ex_{sun}$ انرژی جذب شده از خورشید توسط هوای درون کانال ۱ بوده و Ex_{c-p-f1} انرژی منتقل شده از جاذب به هوای درون کانال ۱، و Ex_{t-f1-g} مجموع انرژی مرتبط با انتقال حرارت بین شیشه و هوای درون کانال بالایی است. همچنین ΔEx_{f1} انرژی ذخیره شده در هوای درون کانال ۱ می‌باشد. تخریب انرژی در کانال هوا بین جاذب و صفحه زیرین به کمک رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$Ex_{d-f2} = \alpha_{eff-f2} Ex_{sun} + Ex_{c-p-f2} - Ex_{t-f2-p} - \Delta Ex_{f2} \quad (25)$$

$$\Delta Ex_{f2} = M_{f2} C_{p-f} ((T_{f2-o} - T_{f2-in}) - \frac{T_a}{\Delta t} \ln(\frac{T_{f2-o}}{T_{f2-i}})) \quad [9] \quad (26)$$



شکل ۶ - دیاگرام موازنه انرژی در کانال هوا بین شیشه و جاذب

در روابط بالا $\alpha_{eff-f2} Ex_{sun}$ انرژی جذب شده از خورشید توسط هوای درون کانال ۲ بوده و Ex_{c-p-f2} انرژی انتقال یافته از جاذب به هوای درون کانال ۲ می‌باشد. همچنین Ex_{t-f2-p} مجموع انرژی مرتبط با انتقال حرارت بین جاذب و هوای درون کانال ۲ است. ΔEx_{f2} نیز انرژی ذخیره شده در هوای درون کانال ۲ می‌باشد. در رابطه (۲۷) بازده انرژی بر حسب نرخ انرژی از دست رفته و انرژی ورودی به سیستم تعریف شده است.

$$\eta_2 = 1 - \frac{Ex_{dest}}{Ex_{in}} \quad [10] \quad (27)$$

$$Ex_{dest} = Ex_{in} + Ex_w - Ex_u \quad (28)$$

انرژی ورودی به هواگرماکن به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Ex_{in} = IA \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (29)$$

انرژی خروجی بدون افت فشار در رابطه (۳۰) تعریف شده است [۱۰].

$$Ex_u = \dot{m} \left[c_p (T_o - T_i) - T_a \left(c_v \ln \left(\frac{T_o}{T_i} \right) - R \ln \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \right) \right] \quad (30)$$

انرژی حاصل از کار فن به صورت رابطه زیر است که در آن T_a دمای هوای محیط و T_i دمای هوای ورودی می‌باشد:

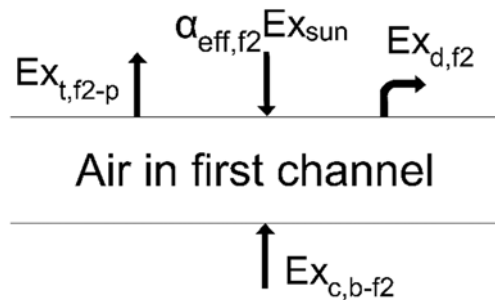
$$Ex_w = \frac{T_a}{T_i} w_{fan} \quad (31)$$

کار فن از رابطه (۳۲) به دست می‌آید [۱۰].

$$w_{fan} = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho \eta_{fan}} \quad (32)$$

اختلاف فشار حاصل از فن نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta p = \frac{4fLm^2}{2\rho D_h} \quad (33)$$



شکل ۷- دیاگرام موازنه انرژی در کانال هوا بین جاذب و صفحه زیرین

که f ضریب اصطکاک بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (34) \quad [10] \text{ در جریان آرام}$$

$$f = 0.0791 Re^{-0.25} \quad \text{در جریان آشفته}$$

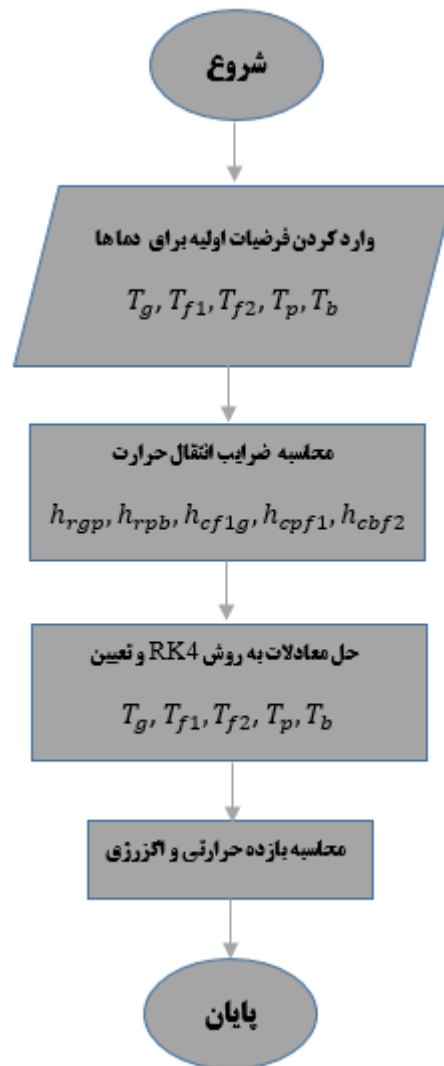
۳- حل عددی

معادلات موازنه انرژی حاکم بر هواگرمن دومسیره به کمک نرم‌افزار متلب^۱ حل شده است. در ابتدا فرض شده است که دمای اجزای سیستم برابر با دمای هوای محیط می‌باشد. سپس با استفاده از روش رانج کوتای مرتبه ۴ برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی، معادلات حاکم بر سیستم به طور همزمان حل گردیده است و دما در اجزای مختلف هواگرمن از جمله دمای هوای خروجی از آن حاصل شده است. پس از آن با استفاده از روابط مربوطه که در متن به آن اشاره شده است، بازده انرژی و انرژی خورشیدی سیستم به دست آمده است. فلوجارت حل معادلات در شکل (۸) مشخص شده است.

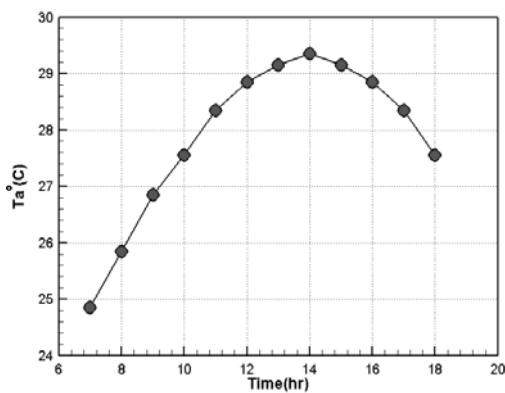
۴- اعتبارسنجی نتایج مدلسازی ریاضی

جهت معتبرسازی روند مدلسازی ریاضی و نتایج حاصل از کد نوشته شده با نرم‌افزار متلب، نتایج حاصله با نتایج تحقیق کریم و همکاران [۸] مقایسه شده است. نمودار تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای هوای محیط که در این تحقیق از آنها استفاده شده است در شکل شماره (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

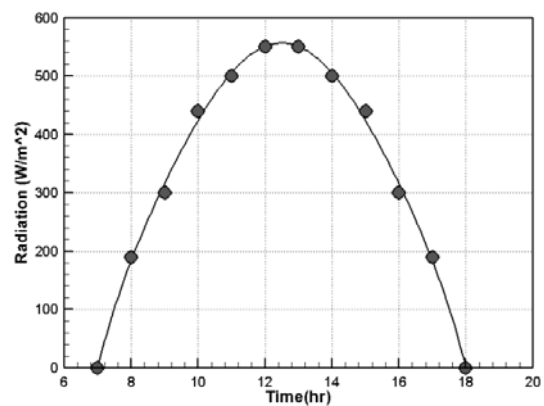
¹ MATLAB R2017b



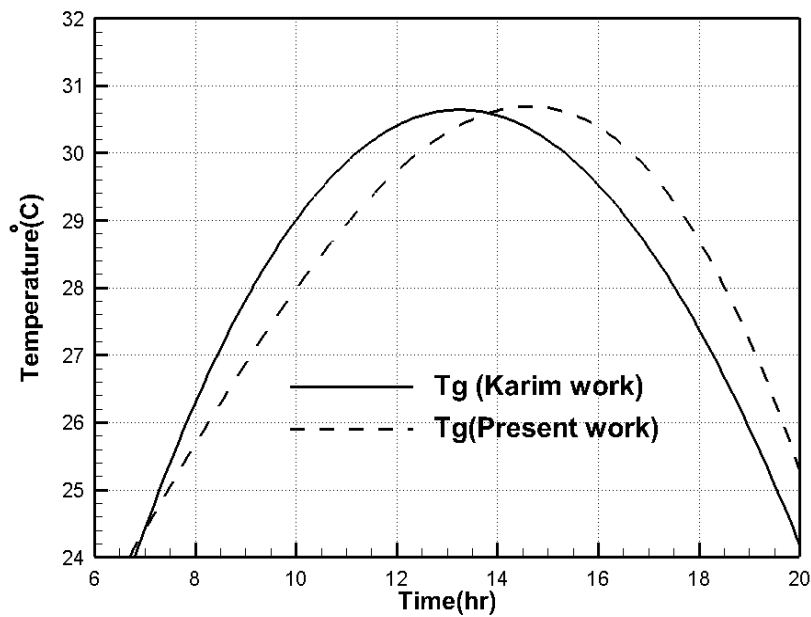
شکل ۸- فلوجارت نحوه حل مسئله



شکل ۱۰- تغییرات دمای هوای محیط بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

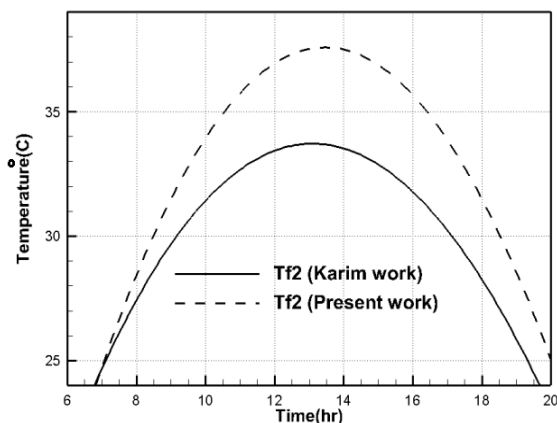


شکل ۹- تغییرات شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

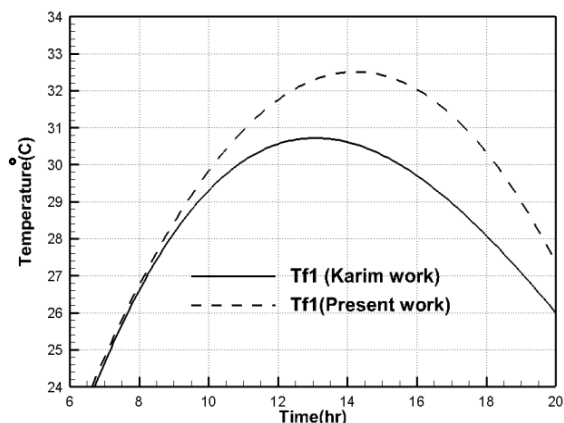


شکل ۱۱- مقایسه تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

در شکل شماره (۱۱) نتایج کریم و همکاران [۸] و مطالعه حاضر، برای تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای هواگرمکن بر حسب زمان برای دبی جرمی هوای $0.35 \frac{kg}{m^2 s}$ مقایسه شده است. حداکثر میزان خطا بین نتایج تجربی و مدلسازی در حدود ۴ درصد است. شکل‌های شماره (۱۲) و (۱۳) نمودار تغییرات دمای هوای موجود در کانال بین شیشه و جاذب و همچنین هوای موجود در کانال بین جاذب و صفحه زیرین با دبی جرمی $0.35 \frac{kg}{m^2 s}$ را نشان می‌دهد. بیشینه خطای موجود بین نتایج تجربی و مدلسازی انجام شده در این مطالعه حدود ۹ درصد است.

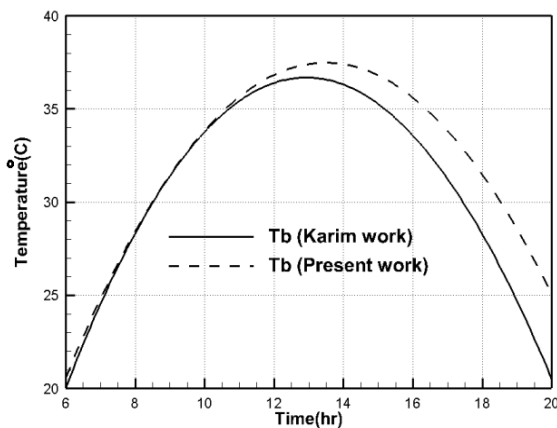


شکل ۱۳- مقایسه تغییرات دمای هوا بین صفحه جاذب و صفحه زیرین بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

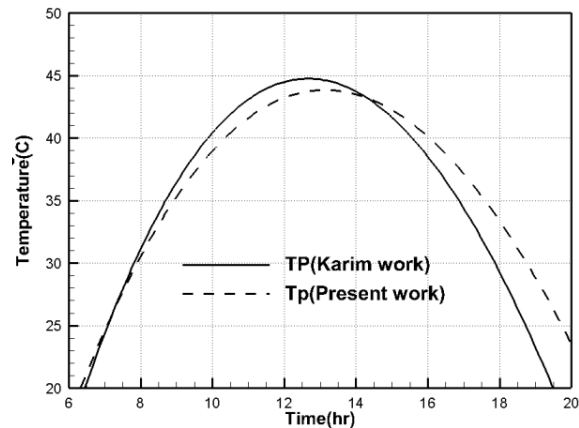


شکل ۱۲- مقایسه تغییرات دمای هوا بین پوشش شیشه‌ای و صفحه جاذب بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

تغییرات دمای صفحه جاذب و همچنین صفحه زیرین بر حسب زمان در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) قابل مشاهده است. در این حالت نیز حداکثر خطای موجود بین نتایج تجربی مقاله کریم و همکاران [۱۸] و نتایج مدل‌سازی این تحقیق ۱۰ درصد است.



شکل ۱۵- مقایسه تغییرات دمای صفحه زیرین بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

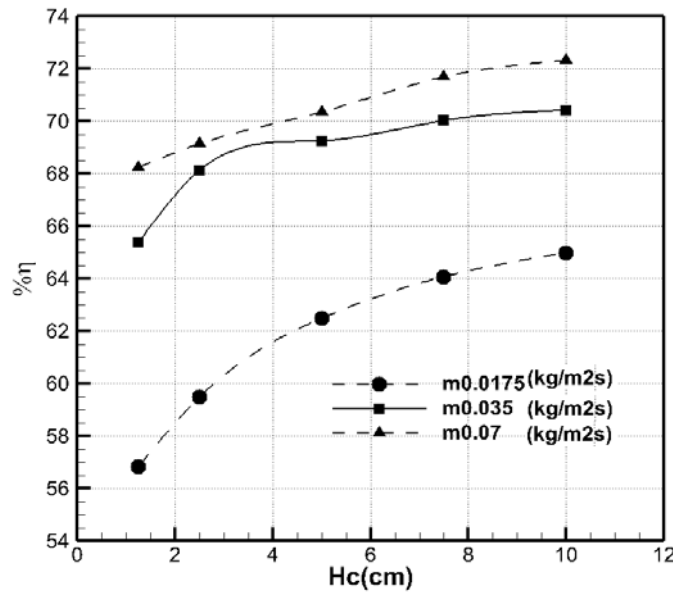


شکل ۱۴- مقایسه تغییرات دمای صفحه جاذب بر حسب زمان در کار کریم و همکاران [۸] و کار حاضر

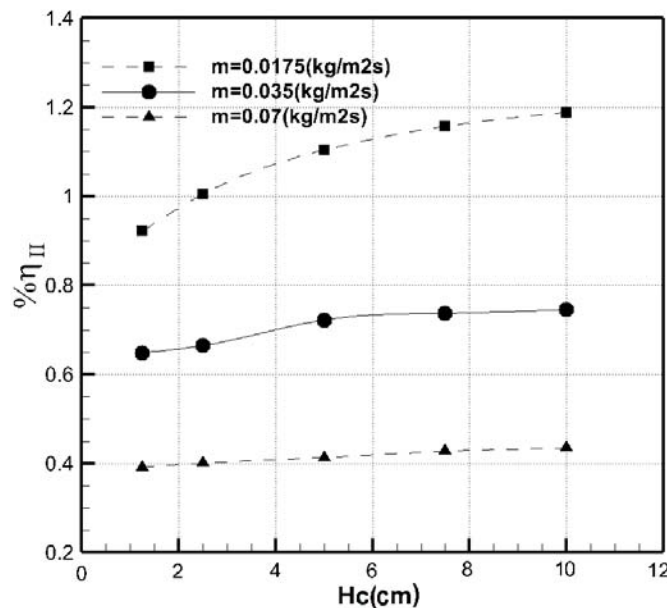
۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- تغییرات بازده انرژی و بازده انرژی بر حسب فاصله بین شیشه و صفحه جاذب

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات بازده حرارتی و بازده انرژی بر حسب فواصل مختلف بین شیشه و صفحه جاذب برای دبی‌های مختلف جرمی می‌باشد. برای هر سه مقدار دبی جرمی با افزایش فاصله بین شیشه و صفحه جاذب، مقدار بازده حرارتی به طور متوسط حدود ۹ درصد و بازده انرژی حدود ۱۸ درصد افزایش یافته است. در واقع با افزایش فاصله بین شیشه و صفحه جاذب، عدد رینولدز طبق رابطه (۹) بزرگتر شده و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. طبق بررسی‌های انجام شده، در دبی جرمی $0.035 \frac{kg}{m^2 s}$ با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب از $1/25$ سانتیمتر تا ۱۰ سانتیمتر، محدوده عدد رینولدز از ۲۵۰۰ تا ۳۸۰۰ تغییر می‌کند. بنابراین اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی از هواگرمن بیشتر می‌شود. در نتیجه میزان بازده قانون اول و بازده قانون دوم مطابق با روابط ارائه شده برای بازده افزایش می‌یابد. همچنین با زیاد شدن مقدار دبی جرمی از $0.0175 \frac{kg}{m^2 s}$ تا $0.035 \frac{kg}{m^2 s}$ و $0.035 \frac{kg}{m^2 s}$ تا $0.07 \frac{kg}{m^2 s}$ ، مقدار بازده حرارتی به ترتیب حدود ۱۴ و ۳ درصد افزایش یافته است. مقدار بازده انرژی نیز از دبی جرمی $0.0175 \frac{kg}{m^2 s}$ تا $0.035 \frac{kg}{m^2 s}$ و $0.035 \frac{kg}{m^2 s}$ تا $0.07 \frac{kg}{m^2 s}$ به ترتیب حدود ۶۵ درصد و ۵۸ درصد کاهش یافته است. علت کاهش بازده انرژی در دبی‌های جرمی بالاتر به دلیل افزایش تولید انترپی است. چرا که با افزایش تولید انترپی، بازگشت‌ناپذیری سیستم زیاد شده و نرخ انهدام انرژی افزایش می‌یابد. بنابراین طبق رابطه بازده قانون دوم (رابطه ۲۷)، بازده انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶- تغییرات بازده حرارتی بر حسب فواصل مختلف بین شیشه و جاذب با تغییر دبی جرمی



شکل ۱۷- تغییرات بازده آگرژی بر حسب فواصل مختلف بین شیشه و جاذب با تغییر دبی جرمی

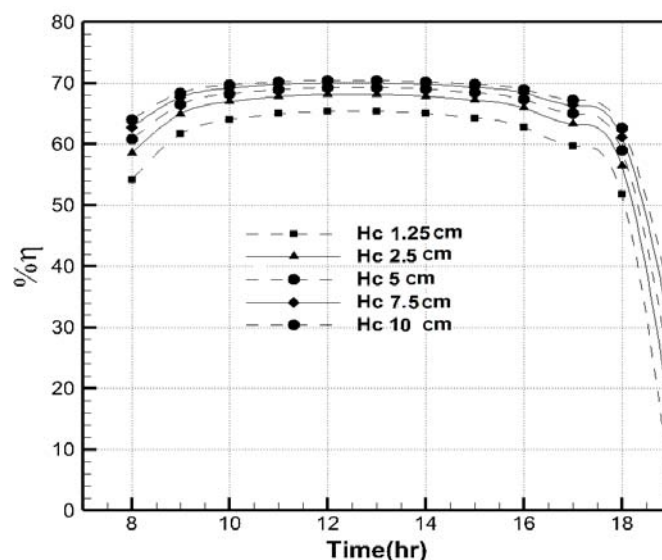
۵-۲- تغییرات بازده حرارتی و بازده آگرژی بر حسب زمان در فاصله‌های مختلف بین شیشه و صفحه جاذب (H_c)

میزان تغییرات بازده حرارتی بر حسب زمان در فاصله‌های مختلف ۱/۲۵، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ سانتیمتر بین شیشه و صفحه جاذب برای دبی جرمی $0.035 \frac{kg}{m^2s}$ در شکل (۱۸) رسم گردیده است. با توجه به شکل مذکور تا ساعت ۱۲ ظهر که شدت تابش خورشید بیشینه می‌باشد، مقدار بازده حرارتی زیاد شده و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین شیشه و صفحه جاذب تا ۱۰ سانتیمتر، مقدار

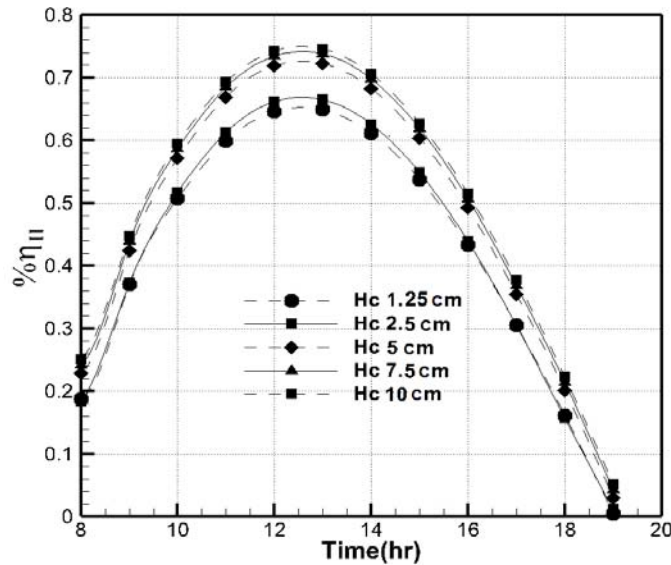
بازده حرارتی به علت ازدیاد اختلاف دما بین شیشه و جریان هوای ورودی به کانال افزایش یافته است. توضیح اینکه با افزایش فاصله بین شیشه و جاذب قطر هیدرولیکی طبق رابطه (۷) زیاد شده و در نتیجه سرعت هوا درون کانال بالایی کاهش می‌یابد و سیال فرصت بیشتری برای انتقال حرارت خواهد داشت. در نتیجه بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد و بازدهی سیستم ایجاد می‌شود. تغییرات بازده اگزرژی نیز بر حسب زمان برای فواصل مختلف بین شیشه و صفحه جاذب در شکل (۱۹) رسم شده است. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشخص است، با افزایش فاصله بین شیشه و صفحه جاذب از ۱/۲۵ سانتیمتر تا ۱۰ سانتیمتر میزان بازده اگزرژی به میزان ۱۹ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله بین شیشه و صفحه جاذب ضریب انتقال حرارت جابجایی زیاد شده و بنابراین انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود. در نتیجه با کاهش نرخ انهدام اگزرژی طبق روابط ارائه شده در بخش معادلات (روابط ۲۷ تا ۳۰)، بازده اگزرژی افزایش می‌یابد.

۵-۳- تغییرات بازده اگزرژی بر حسب زمان در دبی‌های جرمی مختلف

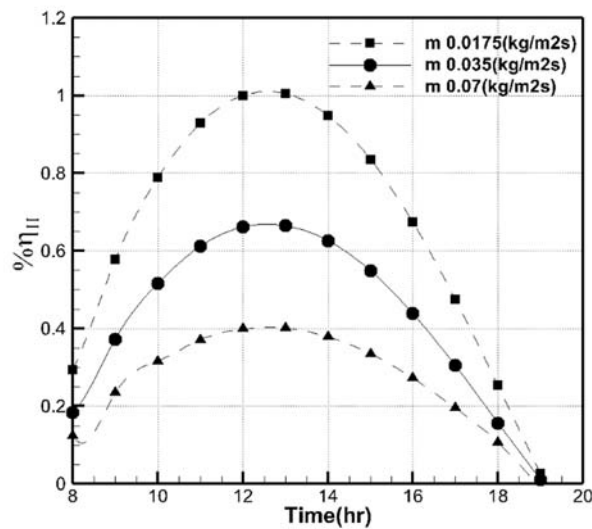
تغییرات بازده اگزرژی بر حسب زمان در دبی‌های جرمی $\frac{kg}{m^2 s}$ ۰/۱۷، ۰/۳۵ و ۰/۰۷ در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش دبی جرمی میزان بازده اگزرژی کاهش می‌یابد. در حقیقت تغییر انتروپی ناشی از افزایش دبی جرمی سبب کاهش بازده اگزرژی شده است. زیرا با افزایش دبی جرمی تولید انتروپی و بازگشت‌ناپذیری سیستم زیاد شده است. بنابراین طبق روابط موجود بازده اگزرژی کاهش می‌یابد. همچنین طبق شکل (۲۰) در هر دبی جرمی مشخص تا ساعت ۱۲ ظهر مقدار بازده اگزرژی به علت بیشینه بودن شدت تابش خورشید در این ساعات افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸- تغییرات بازده حرارتی بر حسب زمان برای فواصل مختلف بین شیشه و صفحه جاذب (H_c)



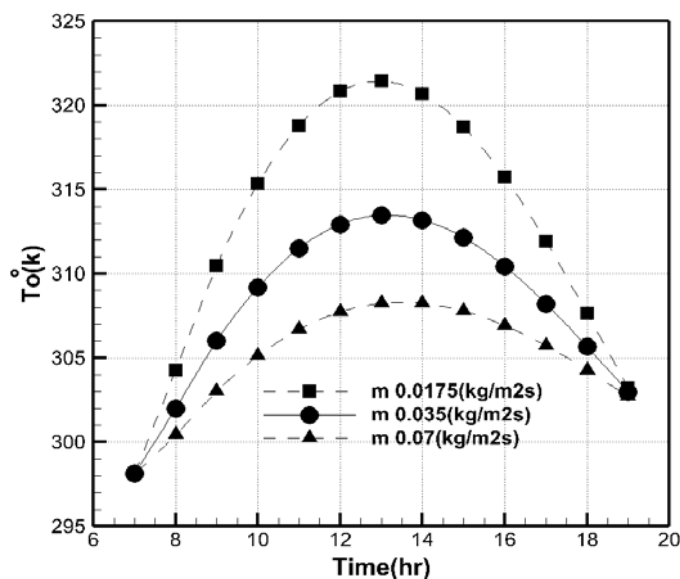
شکل ۱۹- تغییرات بازده آگزرژی بر حسب زمان با تغییر فاصله بین شیشه و صفحه جاذب



شکل ۲۰- تغییرات بازده آگزرژی بر حسب زمان برای دبی‌های جرمی مختلف

۴-۵- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرمکن بر حسب زمان

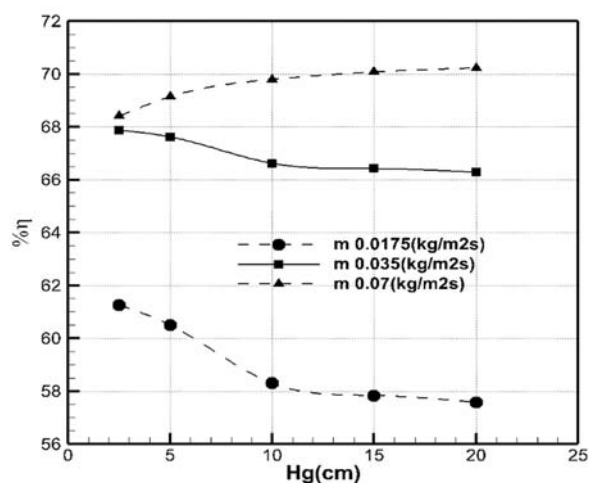
شکل (۲۱) نشان‌دهنده تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرمکن بر حسب زمان برای دبی‌های جرمی مختلف است. در ساعت ۱۲ ظهر که بیشینه دما در آن زمان وجود دارد، با افزایش دبی جرمی از $0.017 \frac{kg}{m^2s}$ تا 0.07 میزان دمای هوای خروجی حدود ۳ درصد کاهش پیدا کرده است. علت این امر کاهش میزان انتقال حرارت تابشی و جابجایی به هوای درون کانال با افزایش دبی هوای درون کانال است. همچنین دمای هوای خروجی در هر دبی جرمی ابتدا افزایش و پس از ساعات بیشینه تابش خورشیدی، کاهش می‌یابد. زیرا به دلیل کاهش تشعشع خورشیدی، انرژی دریافتی توسط جریان هوا کمتر شده و دمای هوای خروجی نیز کاهش می‌یابد.



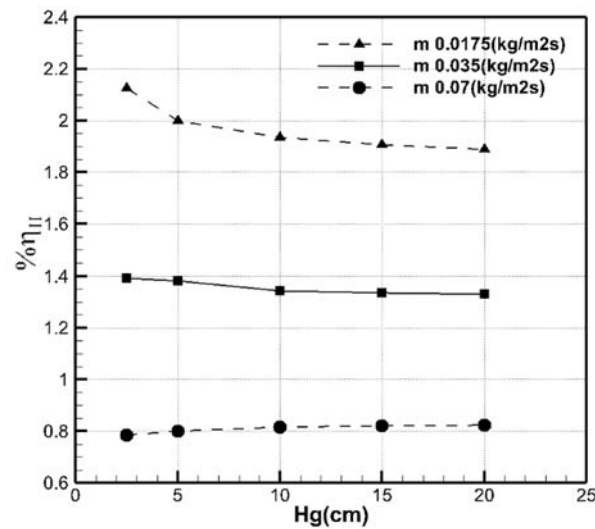
شکل ۲۱- تغییرات دمای هوای خروجی از هواگرمکن بر حسب زمان برای دبی های جرمی مختلف (m)

۵-۵- تغییرات بازده حرارتی و بازده اگزرژی بر حسب ارتفاع دندانهای صفحه جاذب

در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) اثر ارتفاع دندانهای وی شکل صفحه جاذب H_g بر روی بازده حرارتی و بازده اگزرژی برای سه دبی جرمی مختلف رسم شده است. با افزایش ارتفاع دندانهای صفحه جاذب به ازای مقادیر بالاتر از ۱۰ سانتیمتر میزان بازده انرژی و اگزرژی هواگرمکن کمی روند کاهشی داشته و تقریباً ثابت مانده است. علت این امر به دلیل کاهش انتقال حرارت به هوای درون کانال با افزایش ارتفاع دندانهای وی- شکل صفحه جاذب است. زیرا افت فشار ناشی از افزایش بیش از حد ارتفاع دندانها در کاهش انتقال حرارت موثر می‌باشد. زیرا با کاهش فشار، سیال زمان کافی برای تبادل حرارت را نخواهد داشت. همچنین با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به هواگرمکن از ۰/۰۱۷۵ تا $۰/۰۷ \frac{kg}{m^2s}$ میزان بازده حرارتی ۱۸ درصد افزایش یافته و بازده اگزرژی حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است.



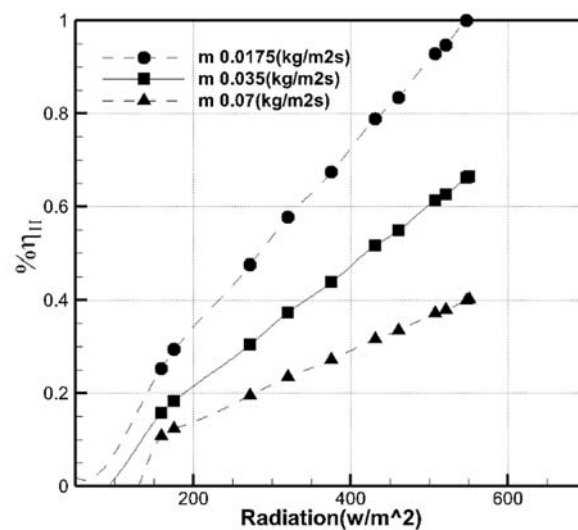
شکل ۲۲- تغییرات بازده حرارتی بر حسب ارتفاع های مختلف دندانهای V شکل صفحه جاذب (H_g)



شکل ۲۳- تغییرات بازده انرژی بر حسب ارتفاع های مختلف دندانه های وی شکل صفحه جاذب (H_g)

۵-۶- تغییرات بازده انرژی بر حسب شدت تابش خورشید

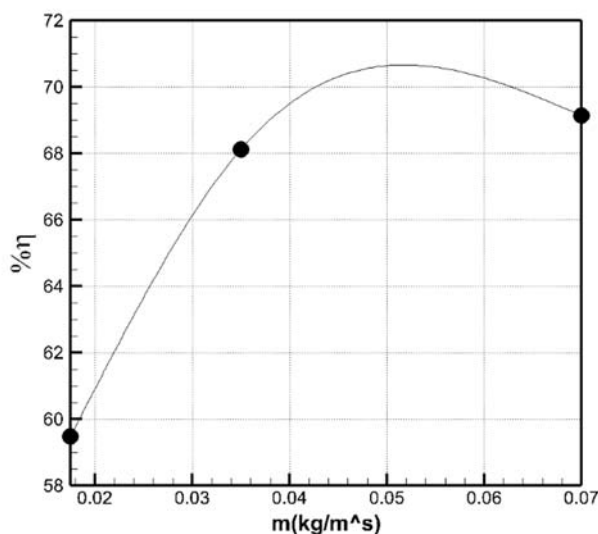
تغییرات بازده انرژی بر حسب شدت تابش خورشید در شکل شماره (۲۴) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد با افزایش شدت تابش خورشید بازده انرژی هواگرمن در دست مطالعه برای دبی های جرمی 0.0175 ، 0.035 ، $0.07 \frac{kg}{m^2s}$ به ترتیب به میزان 29 ، 40 ، 61 درصد افزایش می یابد. علت این افزایش مربوط به ازدیاد انتقال حرارت به سطح جاذب و کاهش نرخ انهدام انرژی در شدت های تابش بالاتر می باشد که از روابط (۲۷) تا (۲۹) استنتاج می شود.



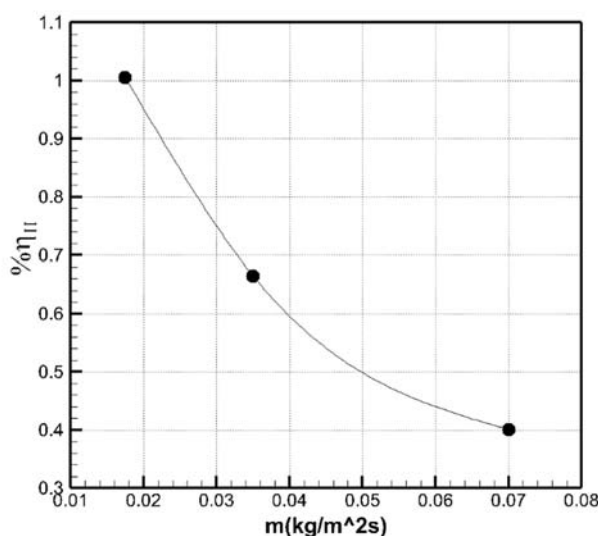
شکل ۲۴- تغییرات بازده انرژی بر حسب شدت تابش خورشید برای دبی های مختلف جرمی (H_g)

۵-۷- تغییرات بازده حرارتی و بازده انرژی بر حسب دبی جرمی

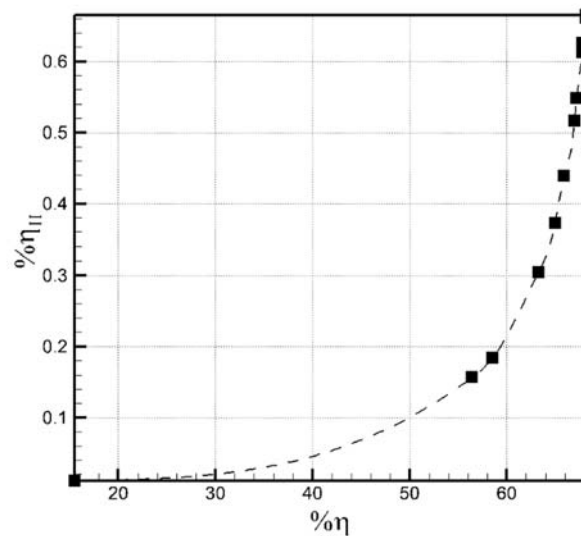
در این تحقیق اثر تغییر دبی جرمی بر روی بازده حرارتی و بازده انرژی هواگرمکن مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از شکل‌های شماره (۲۵) و (۲۶) مشاهده می‌گردد با افزایش دبی جرمی، میزان بازده حرارتی حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است. ولی میزان بازده انرژی با افزایش دبی جرمی هوای ورودی، حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. طبق رابطه (۱۷) در مورد بازده حرارتی، دبی جرمی با بازده حرارتی رابطه مستقیم داشته و با افزایش آن بازده حرارتی نیز افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش دبی جرمی، تولید انرژی افزایش یافته و نرخ تخریب انرژی زیاد شده و طبق رابطه (۲۷) بازده انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۲۵- تغییرات بازده حرارتی بر حسب دبی های مختلف جرمی



شکل ۲۶- تغییرات بازده انرژی بر حسب دبی های مختلف جرمی



شکل ۲۷- تغییرات بازده حرارتی بر حسب بازده انرژی

۵-۸- تغییرات بازده انرژی بر حسب بازده حرارتی

نمودار تغییرات بازده انرژی بر حسب بازده حرارتی برای هواگرمن در دست مطالعه در دبی جرمی بیشینه $0.07 \frac{kg}{m^2 s}$ در ساعات مختلف شبانه‌روز در شکل (۲۷) رسم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در حالی که بازده حرارتی با گذشت زمان روند افزایشی دارد، بازده انرژی نیز در بازه زمانی در نظر گرفته شده افزایش می‌یابد. در واقع با بهبود بازده حرارتی، نرخ تخریب انرژی در سیستم کاهش یافته و بازده انرژی افزایش می‌یابد. در کل بازه زمانی در نظر گرفته شده، میزان افزایش بازده حرارتی حدود ۴ درصد و میزان افزایش بازده انرژی حدود ۱۶ درصد می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار متلب یک هواگرمن خورشیدی دو مسیره با صفحه جاذب دارای دندان‌های وی‌شکل مدلسازی ریاضی شده است. معادلات موازنه انرژی و انرژی برای اجزای هواگرمن استخراج شده‌اند. با استفاده از مدل ریاضی، دما در اجزای مختلف هواگرمن محاسبه شده و با نتایج مربوطه در مقالات منتشر شده مورد مقایسه قرار گرفته است که مطابقت خوبی بین آنها وجود دارد. اثر پارامترهای مختلف مانند شدت تابش خورشید، دبی هوای ورودی به کلکتور، دمای هوای خروجی از کلکتور و همچنین اثر پارامترهای هندسی مانند ارتفاع دندان‌های وی‌شکل صفحه جاذب و فاصله بین پوشش شیشه‌ای و جاذب بر روی بازده قانون اول و بازده قانون دوم در هواگرمن دو مسیره مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

۱- با افزایش فاصله بین پوشش شیشه‌ای و صفحه جاذب، بازده حرارتی حدود ۹ درصد و بازده انرژی حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد.

- ۲- با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به کلکتور در هواگرمکن، بازده حرارتی حدود ۱۴ درصد افزایش یافته و بازده انرژی حدود ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.
- ۳- بازده حرارتی و بازده انرژی با گذشت زمان تا ساعت ۱۲ ظهر افزایش یافته و پس از آن با کاهش شدت تابش خورشید روند کاهشی دارند.
- ۴- مقدار بازده انرژی در هر ساعت بسیار کمتر از مقدار بازده انرژی است. حداکثر مقدار بازده انرژی و انرژی در این تحقیق به ترتیب حدود ۷۲ درصد و ۲/۱ درصد است.
- ۵- با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به هواگرمکن، دمای هوای خروجی از آن به طور متوسط ۳ درصد کاهش می‌یابد.
- ۶- با افزایش ارتفاع دندانه‌های صفحه جاذب بیش از ۱۰ سانتیمتر، در میزان بازده انرژی و بازده انرژی تغییرات محسوسی حاصل نمی‌شود.
- ۷- با افزایش شدت تابش خورشید بازده انرژی به طور متوسط ۴۴ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Torres-Reyes, E., Cervantes-de Gortari, J.G., Ibarra-Salazar, B.A., and Picon-Nunez, M., "A Design Method of Flat-plate Solar Collectors Based on Minimum Entropy Generation", *Exergy, An International Journal*, Vol. 1, pp. 46-52, (2001).
- [2] Kurtbas, I., and Durmuş, A., "Efficiency and Exergy Analysis of a New Solar Air Heater", *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1489-1501, (2004).
- [3] Naphon, P., "On the Performance and Entropy Generation of the Double-Pass Solar Air Heater with Longitudinal Fins", *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1345-1357, (2005).
- [4] Karsli, S., "Performance Analysis of New-design Solar Air Collectors for Drying Applications", *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1645-1660, (2007).
- [5] Esen, H., "Experimental Energy and Exergy Analysis of a Double-flow Solar Air Heater Having Different Obstacles on Absorber Plates", *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1046-1054, (2008).
- [6] Oztop, H.F., Bayrak, F., and Hepbasli, A., "Energetic And Exergetic Aspects of Solar Air Heating (Solar Collector) Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 59-83, (2013).
- [7] Alim, M.A., Abdin, Z., Saidur, R., Hepbasli, A., Khairul, M.A., and Rahim, N.A., "Analyses of Entropy Generation and Pressure Drop for a Conventional Flat Plate Solar Collector using Different Types of Metal Oxide Nanofluids", *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 289-296, (2013).
- [8] Karim, M.A., Perez, E., and Amin, Z.M., "Mathematical Modelling of Counter Flow V-Groove Solar Air Collector", *Renewable Energy*, Vol. 67, pp. 192-201, (2014).

- [9] Dehghan, A.A., Afshari, A., and Rahbar, N., "Thermal Modeling and Exergetic Analysis of a Thermoelectric Assisted Solar Still", *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 277-288, (2015).
- [10] Bahrehmand, D., Ameri, M., and Gholampour, M., "Energy and Exergy Analysis of Different Solar Air Collector Systems with Forced Convection", *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 1119-1130, (2015).
- [11] Abuşka, M., and Şevik, S., "Energy, Exergy, Economic and Environmental (4E) Analyses of Flat-plate and V-groove Solar Air Collectors Based on Aluminium and Copper", *Solar Energy*, Vol. 158, pp. 259-277, (2017).
- [12] Ansari, M., and Bazargan, M., "Optimization of Heat Transfer and Pressure Drop in a Solar Air Heater with Ribbed Surface", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, pp. 137-146, (2017).
- [13] Abuşka, M., "Energy and Exergy Analysis of Solar Air Heater Having New Design Absorber Plate with Conical Surface", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 131, pp. 115-124, (2018).
- [14] Ural, T., "Experimental Performance Assessment of a New Flat-plate Solar Air Collector Having Textile Fabric as Absorber using Energy and Exergy Analyses", *Energy*, Vol. 188, pp. 116-116, (2019).
- [15] Reddy, J., Debnath, S., and Das, B., "Energy and Exergy Analysis of Wavy Plate Solar Air Collector using a Novel Hybrid Expert System", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, pp. 397, (2019).
- [16] Fudholi, A., and Sopian, K., "A Review of Solar Air Flat Plate Collector for Drying Application", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102, pp. 333-345, (2019).
- [17] Raam Dheep, G., and Sreekumar, A., "Experimental Studies on Energy and Exergy Analysis of a Single-Pass Parallel Flow Solar Air Heater", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 142, (2020).
- [18] Hatami, S., Payganeh, G., and Mehrpanahi, A., "Energy and Exergy Analysis of an Indirect Solar Dryer Based on a Dynamic Model", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 244, pp. 118809, (2020).
- [19] Ma, Z., Ren, H., and Sun, Z., "Energy and Exergy Analysis of a Desiccant Cooling System Integrated with Thermal Energy Storage and Photovoltaic/Thermal-Solar Air Collectors", *Science and Technology for the Built Environment*, Vol. 26, pp. 12-27, (2020).

فهرست نمادهای انگلیسی

A: مساحت (m^2) C_p : گرمای ویژه هوا ($\frac{J}{kgK}$) D_h, D_{hprim} : قطر هیدرولیکی در کانال بالایی و پایینی (m)

f: ضریب اصطکاک

 $h_{cgf}, h_{cga}, h_{cf2p}, h_{cf2b}, h_{cf1p}, h_{cf1g}$: ضرایب انتقال حرارت جابجایی ($\frac{W}{m^2K}$) h_{rij} : ضریب انتقال حرارتی تابشی بین دو سطح ($\frac{W}{m^2K}$) h_w : ضریب انتقال حرارت باد ($\frac{W}{m^2K}$) Ex_{c-b-f2} : انرژی انتقال یافته از صفحه زیرین به سیال کانال ۲ (watt) Ex_{c-p-f1} : انرژی انتقال یافته از صفحه جاذب به سیال کانال ۱ (watt) Ex_{c-f-2p} : انرژی انتقال یافته از صفحه جاذب به سیال کانال ۲ (watt) Ex_{d-b} : انهدام انرژی در صفحه زیرین (watt) Ex_{d-f} : انهدام انرژی در کانال هوا (watt) Ex_{d-g} : انهدام انرژی در پوشش شیشه‌ای (watt) Ex_{d-p} : انهدام انرژی در صفحه جاذب (watt) Ex_{dest} : انهدام انرژی کل سیستم (watt) $Ex_{loss,b}$: انرژی از دست رفته در صفحه زیرین (watt) Ex_Q : انتقال انرژی از سیستم در دمای T (watt) Ex_{sun} : انرژی تابش خورشید (watt) $Ex_{t,f1,g}$: مجموعه انرژی مرتبط با انتقال حرارت بین سیال کانال ۱ و

شیشه (watt)

 $Ex_{t,g,a}$: مجموعه انرژی مرتبط با انتقال حرارت بین هوا و شیشه (watt)I: تابش خورشیدی ($\frac{W}{m^2}$)k: هدایت حرارتی ($\frac{W}{mK}$)

k_i : هدایت حرارتی عایق ($\frac{w}{mk}$)

L: طول کلکتور (m)

m: دبی جرمی هوای ورودی ($\frac{kg}{m^2s}$)

Nu: عدد ناسلت

P_{in} : فشار ورودی (atm)

P_{out} : فشار خروجی (atm)

\dot{Q}_s : حرارت جذب شده توسط جاذب

R: ثابت جهانی گازها ($\frac{kJ}{kgk}$)

t: زمان (s)

T_a : دمای هوای محیط (K)

T_{fi} : دمای هوای اولیه (K)

T_{f1}, T_{f2} : دمای متوسط سیال (K)

T_o : دمای هوای خروجی (K)

T_{sun} : دمای خورشید (K)

U_b : ضریب افت حرارت صفحه عایق زیرین ($\frac{w}{m^2k}$)

x_g : ضخامت شیشه (m)

x_p : ضخامت جاذب (m)

نمادهای یونانی

α_g : ضریب جذب جاذب

α_p : ضریب جذب شیشه

Δh : تغییرات آنتالپی

ϵ : ضریب گسیل اجزای هواگرمن

η_1 : بازده حرارتی

η_2 : بازده انرژی

ρ : چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)

اندیس‌ها

a : محیط

b : صفحه زیرین

c : جابجایی

d : انهدام

$dest$: انهدام

f : سیال

f_1 : سیال در کانال ۱

f_2 : سیال در کانال ۲

g : شیشه

O : خروجی

p : جاذب

r : تابشی

t : کلی

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of distance between glass cover and absorber plate, the height of the V groove in the absorber plate, the mass flow rate of the air inlet to the collector, on the energy and exergy efficiencies of a solar air collector with V groove absorber plate, by mathematical modeling. The heater is of dual pass type and its length, width and height are 2, 1 and 0.2 meters, respectively. The distance between the glass and the absorber plate is 12.5, 25, 50, 75, 100 mm, respectively. The results show that by increasing the distance between the glass and the absorber, the thermal efficiency increases by 9% and the exergy efficiency by 30%. Also increasing the height of the V groove more than 10 cm will not cause significant changes in the efficiency of the first and second laws.