

تحلیل عددی اثر باد بر عملکرد کلکتور خورشیدی بدون پوشش نفوذپذیر

حسین خراسانی زاده^{۱*}، استادیار، مجید سبزویشانی^۲، استادیار، رضا عبداللهی طاهری^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۱ دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

khorasan@kashanu.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

spooshan@kashanu.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

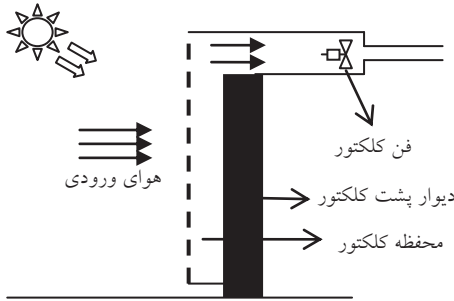
r.taheri@grad.kashanu.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۱۰

پذیرش مقاله: ۹۰/۸/۹

چکیده: مشکلات مربوط به مصرف سوخت‌های تجدیدناپذیر، مانند آلودگی محیط زیست و قیمت بالا، تلاش برای جایگزینی آن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر را باعث شده است. کلکتورهای خورشیدی بدون پوشش نفوذپذیر، دستاورد صنعتی جدیدی برای پیش‌گرمایش و گرمایش هوای تهویه و خشک کردن محصول‌های کشاورزی هستند. انتقال حرارت در این کلکتورها با عبور جریان هوا از میان روزنه‌های صفحه جاذب اتفاق می‌افتد. در این مطالعه عددی، اثر جریان آرام باد موازی با صفحه جاذب بر عملکرد این کلکتورها بر مبنای تعادل کلی انرژی و با توسعه معادلات حاکم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت باد، بسته به مقدار سرعت نزدیک شدن هوا به کلکتور، می‌تواند موجب کاهش یا افزایش بازده شود. این روند، نتیجه تقابل آثار تلفات حرارتی از صفحه جاذب کلکتور به محیط با اثر انتقال حرارت از این صفحه به هوای ورودی می‌باشد. همچنین به ازای مقادیر مختلف سرعت نزدیک شدن هوا، افزایش سرعت باد باعث افزایش ضریب تأثیر تبادل حرارتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کلکتور خورشیدی بدون پوشش نفوذپذیر، سرعت باد، بازده کلکتور، تحلیل عددی.



شکل (۱): نمای شماتیک از کلکتور خورشیدی نفوذپذیر بدون پوشش

۱. مقدمه

امروزه سیستم‌های گرمایشی، یکی از ارکان اصلی و کاربردی در صنعت و ساختمان‌اند. یکی از مدرن‌ترین این سیستم‌ها، گرمایش با استفاده از کلکتورهای خورشیدی است. با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی و آلودگی ناشی از مصرف آن‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از کلکتورهای خورشیدی در کنار سایر سیستم‌های گرمایشی در راستای بهبود مدیریت انرژی و بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌باشد. کلکتورهای خورشیدی نفوذناپذیر از ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین نوع کلکتورهای خورشیدی هستند. این کلکتورها ساختار ساده‌ای دارند، ولی پایین بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سیال و صفحه جاذب و بالا بودن اتلاف تشعشعی ناشی از بازتابش تشعشع خورشیدی از این صفحه به فضای اطراف از معایب کلکتورهای خورشیدی نفوذناپذیر است [۱].

در سال‌های اخیر، کلکتور خورشیدی نفوذپذیر مورد استفاده بیشتری قرار گرفته است. نصب آسان، هزینه تولید و نگهداری کم و گرمایش مستقیم هوای محیط، از مزایای کلکتورهای خورشیدی نفوذپذیر است. نمای شماتیک از کلکتور خورشیدی نفوذپذیر بدون پوشش^۱ در شکل (۱) نشان داده شده است. این کلکتور دارای یک صفحه فلزی تیره‌رنگ و جاذب تشعشع خورشیدی است که عموماً روی دیوار جنوبی محل مورد نظر نصب می‌شود. با مکش فن، هوا از روزنه‌هایی که روی این صفحه تعبیه شده، عبور نموده و در حین عبور از آن‌ها و همچنین از محفظه کلکتور از صفحه گرم می‌گیرد و در نهایت به داخل ساختمان منتقل می‌شود. صفحه جاذب به صورت مایل یا عمودی قرار می‌گیرد و به دیواره یا صفحه دیگری هم‌راستا با خودش وصل می‌شود. فاصله بین این دو صفحه، محفظه کلکتور^۲ نامیده می‌شود و معمولاً عمق آن حدود ۱۰ سانتیمتر است. ضمناً همه محیط پیرامونی محفظه کلکتور (بین صفحه کلکتور و دیوار پشت آن) آب‌بندی می‌شود.

مطالعات مختلفی بر روی این نوع از کلکتورها انجام شده است. کاتسچر و همکاران، اتلاف حرارتی مرتبط با کلکتورهای خورشیدی نفوذپذیر بدون پوشش را مورد بررسی قرار دادند [۲]. آن‌ها تئوری اتلاف حرارتی را بر اساس عبور جریان آرام موازی با صفحه جاذب دارای مکش یکنواخت، مدل‌سازی کردند و به‌طور خاص و به‌صورت تحلیلی رابطه‌ای برای افت جابجایی باد توسعه دادند.

کائو و همکاران بر پایه نتایج آزمایشگاهی، روابطی برای ضریب تأثیر تبادل حرارتی بر روی یک صفحه با ردیفی از شکاف‌ها به عنوان روزنه‌های کلکتور، همراه با جریان متقاطع باد نسبت به این شکاف‌ها ارائه کردند [۳]. یک مدل تجربی برای صفحات نازک با روزنه‌های دایره‌ای و گام مثلثی، همراه با جریان باد موازی با صفحه به‌وسیله کاتسچر ارائه شد [۴]. وان‌دکر و همکاران، مقدار ضریب تأثیر تبادل حرارتی را برای صفحات نازک و ضخیم با روزنه‌های دایره‌ای و گام مربعی یا مثلثی، محاسبه و روابطی برای محاسبه ضریب تأثیر تبادل حرارتی با در نظر گرفتن داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه کردند. آن‌ها نتایج را به‌صورت معادلاتی شامل گروه‌های بدون بعد، همچون عدد رینولدز، نسبت سرعت نزدیک شدن هوا به سرعت باد و نسبت قطر به گام روزنه‌ها بیان نمودند [۵]. سامرس به بررسی و شبیه‌سازی گرمایی و برآورد اقتصادی سیستم‌های کلکتور خورشیدی نفوذپذیر غیرشیشه‌ای نصب شده در چندین ساختمان ایالت مدیسون آمریکا پرداخت [۶]. این شبیه‌سازی به کمک برنامه TRNSYS^۳ طراحی شده توسط آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه ویسکانسین آمریکا، انجام شد. همچنین سامرس، نتایج حاصل از این برنامه را با نتایج تجربی هالیک [۷]، به‌دست آمده از کلکتور خورشیدی NSTF^۴ نصب شده در تورنتو کانادا، مقایسه کرد. آرالاناندام و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی مکانیک سیالات محاسباتی، رابطه‌ای را برای مقدار ضریب تأثیر تبادل حرارتی ارائه کردند [۸]. آن‌ها ضریب تأثیر تبادل حرارتی

3. Transient System Simulation Program

4. National Solar Test Facility

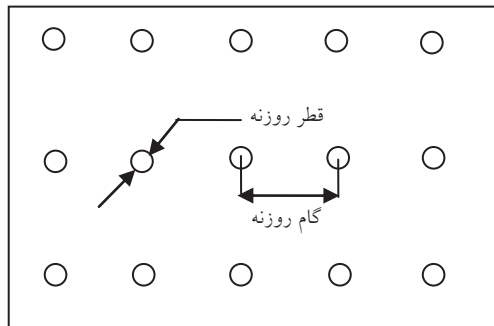
1. Unglazed Transpired Solar Collector

2. Plenum

یک سیستم گرمایشی با استفاده از کلکتور خورشیدی بدون پوشش نفوذپذیر بررسی شده است. در این مقاله، بخشی از نتایج مربوط به اثر باد بر روی کلکتورهای بدون پوشش نفوذپذیر ارائه شده است. سایر نتایج و همچنین نتایج مربوط به اثر تغییر پارامترهای هندسی بر عملکرد کلکتور بدون پوشش نفوذپذیر در [۱۴] ارائه شده است.

۲. هندسه کلکتور و فرضیات

در شکل (۲)، نمایی شماتیک از صفحه جاذب کلکتور بدون پوشش نفوذپذیر به همراه روزنه‌ها، قطر و گام آن‌ها نشان داده شده است.



شکل (۲): نمای شماتیک از صفحه جاذب کلکتور

در این مطالعه، از کلکتوری با هندسه‌ای مشابه کلکتور مورد استفاده در کار سامرس استفاده شده است [۶]. مشخصات صفحه جاذب و عمق محفظه کلکتور در جدول (۱) ارائه شده است. ضمناً ضریب جذب تشعشع آن برابر ۰/۹۹ و ضریب صدور آن برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات هندسی صفحه جاذب و محفظه کلکتور

مساحت	۴/۶۷۵ مترمربع
ارتفاع	۲/۴۴ متر
طول	۱/۸۳ متر
عمق محفظه	۰/۰۷۶۲ متر
قطر روزنه صفحه	۰/۰۰۱۵۹ متر
گام روزنه صفحه	۰/۰۱۵۱ متر

مشابه با تحلیل مبتنی بر موازنه کلی انرژی در [۶ و ۱۵]، در بررسی و تحلیل عملکرد کلکتور، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند: دمای سراسر سطوح صفحه جاذب و صفحه پشت به صورت یکنواخت (هم‌دما) و جریان هوای عبوری از روزنه‌ها نیز یکنواخت فرض می‌شود. از پدیده برگشت جریان از میان صفحه جاذب صرف نظر می‌شود. صفحه جاذب برای تمامی تشعشع جذب شده و صادر

را بر حسب پارامترهای هندسی کلکتور، عدد ناسلت و عدد رایلی، برای کلکتوری با روزنه‌های دایره‌ای و گام مربعی شکل و برای شرایط بدون باد محاسبه کردند. در همین زمینه و در مطالعه دیگری، وان‌دکر و همکاران، مقدار ضریب تأثیر تبادل حرارتی را برای کلکتوری با روزنه‌های دایره‌ای و گام مربعی و مثلی شکل به صورت عددی و تجربی محاسبه کردند. آن‌ها برای این ضریب، رابطه‌ای بر حسب اعداد رینولدز و پارامترهای هندسی کلکتور و در حضور باد ارائه کردند و مقادیر به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی در شرایط مشابه مورد مقایسه قرار دادند [۹]. آگوستاس لئون و کومار با استفاده از تحلیل عددی، به بررسی اثر تغییر پارامترهایی مانند دبی هوای ورودی و تشعشع خورشیدی بر عملکرد کلکتور پرداختند [۱۰].

یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد کلکتورهای نفوذپذیر بدون پوشش، اثر باد بر روی آن‌هاست. پسران و وپکه [۱۱] کاربرد کلکتورهای خورشیدی نفوذپذیر بدون پوشش را در سیکل سرمایشی با رطوبت‌گیر مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری به بررسی اثر مقدار تشعشع خورشیدی بر خوردی و سرعت نزدیک شدن هوا بر عملکرد کلکتور در حضور باد پرداختند. فلک و همکاران [۱۲] در مطالعات خود روی اثر باد در کلکتورهای خورشیدی، آزمایشاتی روی دو کلکتور انجام دادند. بررسی اثر باد بر روی بازده کلکتور نشان داد که بیشینه بازده در سرعت باد بین ۱ تا ۲ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. گانویک و همکاران [۱۳] مطالعه خود را بر روی ساختمان‌هایی در مختصات جغرافیایی متفاوت و در حضور باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه بیشتر کردند و نشان دادند که این سرعت باعث تقویت عوامل منجر به برگشت جریان از کلکتور می‌شود.

فقط تعداد کمی از تحقیقات انجام شده به بررسی اثر باد بر عملکرد کلکتور بدون پوشش نفوذپذیر پرداخته‌اند و در خصوص اثر باد بر روی بازده، نظریات متناقضی اعلام شده است. برای نمونه، کانسچر و همکاران [۲] وجود باد را باعث کاهش راندمان اعلام کرده‌اند، ولی فلک و همکاران [۱۲] در کار تجربی خود، باد تا سرعت حدود ۱/۵ متر بر ثانیه را باعث بهبود راندمان تشخیص داده‌اند. همچنین در تحقیقات گذشته، شرایط محل انجام گرمایش مجاور با محفظه کلکتور، و اثرات تبادل حرارتی آن بر جریان هوای داخل محفظه کلکتور در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق، به بررسی عددی عملکرد این کلکتور با در نظر گرفتن اثر باد به صورت جریان موازی با صفحه کلکتور پرداخته شده است. در این خصوص بر مبنای معادلات کلی تعادل انرژی، روند تغییرات بازده، ضریب تأثیر تبادل حرارتی و مقادیر مختلف انتقال حرارت ناشی از جابجایی و تشعشع در

یافته T_{plen} نامیده شود، انتقال حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به هوا از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Q_{conv,col-air} = \dot{m}_{air,out} \times c_p (T_{amb} - T_{plen}) \quad (5)$$

تبادل انرژی بر روی دیوار پشت کلکتور به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$Q_{cond,wall} - Q_{conv,wall-air} - Q_{rad,wall-col} = 0 \quad (6)$$

در این رابطه، انتقال حرارت جابجایی از دیوار پشت به هوا و انتقال حرارت هدایتی از میان دیوار پشت به ترتیب عبارت‌اند از:

$$Q_{conv,wall-air} = h_{conv,wall-air} A (T_{wall} - T_{plen}) \quad (7)$$

$$Q_{cond,wall} = U_{wall} A (T_{room} - T_{wall}) \quad (8)$$

در رابطه (۸) به ضریب انتقال حرارت کلی بین دیواره پشتی و هوای اتاق مورد گرمایش اشاره دارد.

اتلاف حرارتی جابجایی اجباری در اثر عبور جریان باد از روی کلکتور و موازی با صفحه آن، با فرض عدد پراوتل برابر با ۰/۷۱ برای هوا، به صورت رابطه (۹) است [۲].

$$Q_{wind} = 0.82 \frac{V_w V}{V_a} W [\rho c_p V_a (T_{col} - T_{amb})] \quad (9)$$

با توجه به اتلاف حرارتی در اثر جریان باد، رابطه (۱) به رابطه (۱۰) تبدیل می‌شود.

$$-Q_{rad,wall-col} + Q_{conv,col-air} + Q_{rad,col-sur} + Q_{wind} = Q_{abs} \quad (10)$$

ضریب تأثیر تبادل حرارتی^۱ به ضریب انتقال حرارت کلی هوای عبوری از صفحه جاذب بستگی دارد و طبق رابطه (۱۱) عبارت از نسبت افزایش دمای هوای عبوری به حداکثر افزایش قابل تصور، یعنی رسیدن دمای هوا به دمای کلکتور، می‌باشد.

$$\varepsilon_{HX} = \frac{T_{plen} - T_{amb}}{T_{col} - T_{amb}} \quad (11)$$

بازده کلکتور با توجه به رابطه (۱۲)، نسبت انرژی مفید دریافتی به وسیله کلکتور به کل انرژی خورشیدی ورودی به کلکتور می‌باشد [۴].

$$\eta = \frac{\dot{m}_{air,out} \times c_p \times (T_{air,out} - T_{amb})}{I_T \times A_s} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) اشاره به دمای هوای خروجی از کلکتور (ورودی به محل مورد گرمایش) دارد که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$T_{air,out} = (Q_{conv,wall-air} / \dot{m}_{air,out} c_p) + T_{plen} \quad (13)$$

شده، دیفیوز و خاکستری فرض می‌شود. همچنین از اتلاف حرارتی در محیط پیرامونی محفظه کلکتور صرف نظر می‌شود.

۳. معادلات تعادل انرژی

سیستم حرارتی لحاظ شده شامل محیط، صفحه جاذب، محفظه کلکتور، دیواره پشتی و فضای آن سوی دیوار پشتی (اتاق گرم شونده) است. معادله‌های تعادل انرژی، شامل معادله بقای جرم و معادله موازنه انرژی برای بخش‌های مختلف کلکتور از جمله هوای محفظه، صفحه کلکتور و دیواره پشت آن می‌باشند. این معادله‌ها شامل هفت معادله مربوط به تعادل انرژی روی بخش‌های مختلف کلکتور به علاوه رابطه ضریب تأثیر تبادل حرارتی، تشکیل یک دستگاه معادله غیرخطی می‌دهند. با حل این دستگاه، هشت مجهول شامل انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و هوای ورودی، انتقال حرارت جابجایی بین دیوار پشت کلکتور و هوای محفظه، تشعشع بین صفحه جاذب و محیط، تشعشع بین صفحه جاذب و دیوار پشت کلکتور، هدایت از میان دیوار پشت، دمای صفحه کلکتور، دمای دیوار پشت کلکتور و دمای هوای محفظه به دست می‌آیند. لازم به ذکر است که در تحقیقات قبلی، اثر باد لحاظ نشده، ولی در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی حاصل از وجود باد با استفاده از نتایج کاتسچر و همکاران [۲] در نظر گرفته شده است.

در بسیاری از مطالعات قبلی از افت جابجایی از صفحه جاذب کلکتور به هوای محیط ناشی از جابجایی آزاد و یا اثر باد صرف نظر شده است [۶ و ۱۰]. با این فرض، تعادل انرژی بر روی صفحه کلکتور به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$-Q_{rad,wall-col} + Q_{conv,col-air} + Q_{rad,col-sur} = Q_{abs} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، انتقال حرارت تشعشعی بین صفحه جاذب و محیط و همچنین بین دیوار پشتی و صفحه جاذب به ترتیب عبارت‌اند از:

$$Q_{rad,col-sur} = \varepsilon_{col} \sigma_{sb} A_s (T_{col}^4 - T_{sur}^4) \quad (2)$$

$$Q_{rad,wall-col} = \sigma_{sb} A (T_{wall}^4 - T_{col}^4) / (1/\varepsilon_{wall} + 1/\varepsilon_{col} - 1) \quad (3)$$

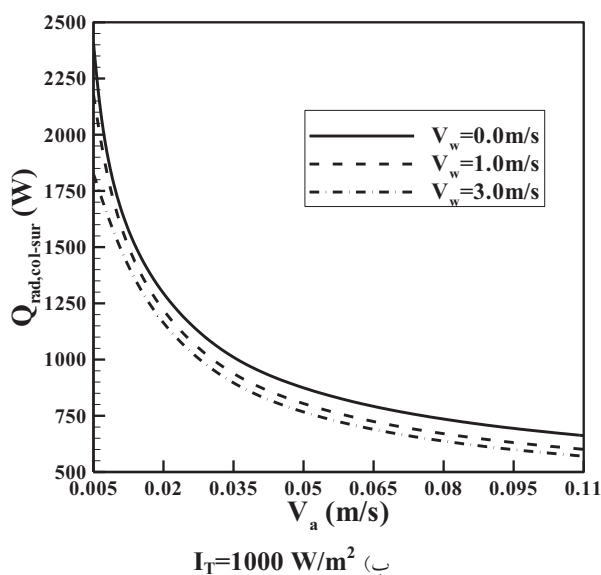
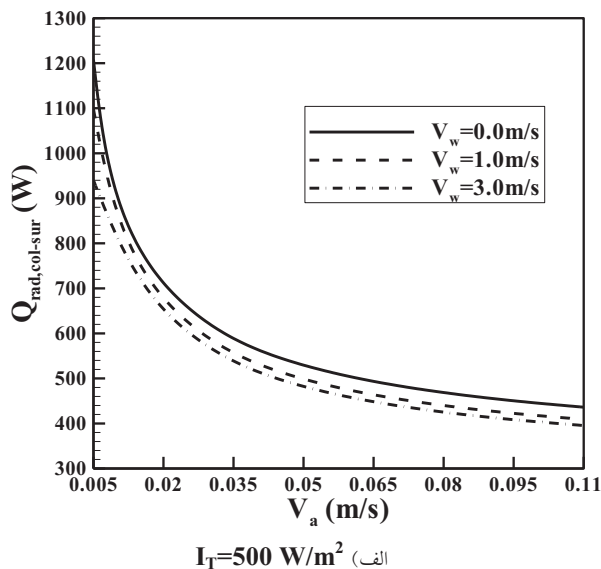
در رابطه (۲)، دمای محیط اطراف با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید و این رابطه تنها برای سطوح جاذب عمودی معتبر می‌باشد [۶].

$$T_{sur}^4 = 0.5(T_{gnd}^4 + T_{sky}^4) \quad (4)$$

در اثر جابجایی بین صفحه جاذب کلکتور و هوای ورودی به محفظه کلکتور، دمای هوا افزایش می‌یابد. به فرض اینکه دمای افزایش

می‌شود [۱۲ و ۱۳]. سرعت نزدیک شدن هوا عبارت از نسبت دبی حجمی هوای ورودی از طریق روزنه‌های کلکتور به مساحت آن است. در تحقیقات تجربی پیشین و بر اساس دبی کلی هوای ورودی، این سرعت بین صفر تا ۰/۱۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۲ و ۴]. شار تابشی خورشیدی برخوردی با توجه به شرایط آب و هوایی و جغرافیایی متفاوت است، با وجود این در مراجع مختلف، حداکثر مقدار شار تابشی خورشیدی برخوردی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است [۶ و ۱۰]. در مدل‌سازی‌های این تحقیق، سرعت باد بین ۱ تا ۵ متر بر ثانیه، سرعت نزدیک شدن هوا بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۱۱ متر بر ثانیه و شار تابشی خورشیدی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

شکل (۴)، نرخ انتقال حرارت تشعشی از صفحه جاذب کلکتور به محیط اطراف را بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا و سرعت باد برای دو شار تابشی برخوردی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع نشان می‌دهد.



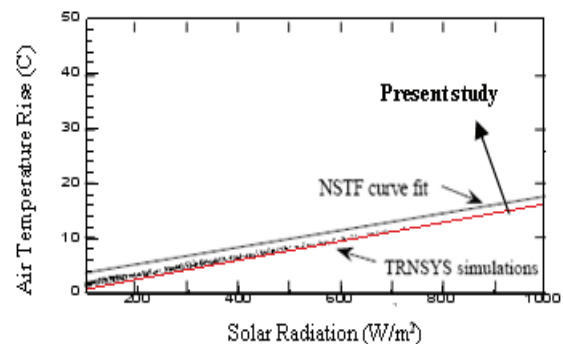
شکل (۴): انتقال حرارت تشعشی از کلکتور به محیط بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا

۴. معتبرسازی برنامه و بررسی صحت نتایج

برای حل دستگاه معادله غیرخطی حاصله، یک برنامه کامپیوتری تهیه شده است که معادله‌ها را به روش نیوتن حل می‌کند. در این برنامه، پارامترهای ورودی شامل مشخصات هندسی کلکتور و هوای محیط به صورت مقادیری ثابت یا قابل تنظیم معرفی می‌شوند. برای نمونه، چگالی و لزجت هوا همیشه ثابت در نظر گرفته می‌شوند، ولی قطر یا گام روزنه‌ها و سرعت نزدیک شدن هوا قابل تنظیم می‌باشند. برای حل دستگاه معادله غیرخطی، ابتدا مقادیری به صورت پیش‌فرض برای مجهول‌ها به برنامه معرفی می‌شود و حل به روش نیوتن تا همگرایی کامل و رسیدن مقدار خطا به مقداری کمتر از خطای تعیین شده تکرار می‌شود. مزیت برنامه کامپیوتری تهیه شده در مقایسه با برنامه مربوط به شبیه‌سازی سامرس [۶]، علاوه بر لحاظ شدن اثر باد، استفاده از روش حل نیوتن و کاهش حجم برنامه است.

برای معتبرسازی برنامه کامپیوتری، مقادیر افزایش دمای هوا $(T_{plen}-T_{amb})$ بر حسب مقدار تشعشع خورشیدی برخوردی به کلکتور به دست آمده و با نتایج ارائه شده توسط سامرس [۶] و نتایج تجربی هالیک [۷] در شکل (۳) مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخصات هندسی کلکتور استفاده شده برای انجام مقایسه همان مشخصات ارائه شده در جدول (۱) می‌باشد.

در شکل (۳)، نتایج شبیه‌سازی عددی سامرس به دست آمده از برنامه TRNSYS به صورت نقاط و نتایج تجربی هالیک توسط یک منحنی تطبیق شده، نشان داده شده‌اند. وجود نقاط متعدد به این علت است که نتایج سامرس بر حسب شرایط واقعی آب و هوایی ایالت مدیسون و برای ساعت‌های مختلف در سال و در دمای محیط بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس به دست آمده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر، انطباق خوبی با نتایج سامرس [۶] و نتایج تجربی هالیک [۷] دارد.

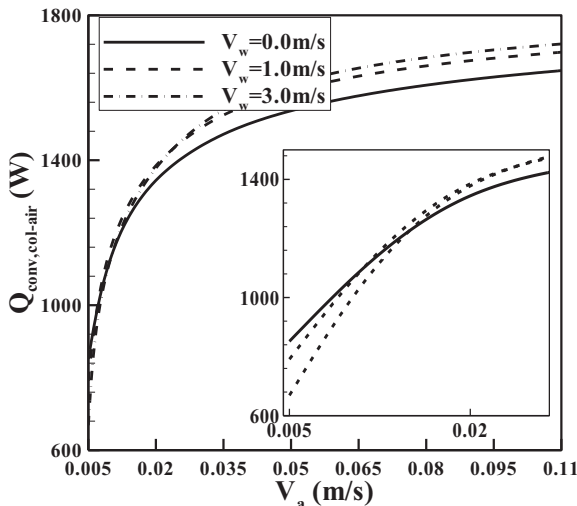


شکل (۳): افزایش دمای هوا بر حسب شار تابشی برخوردی در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه

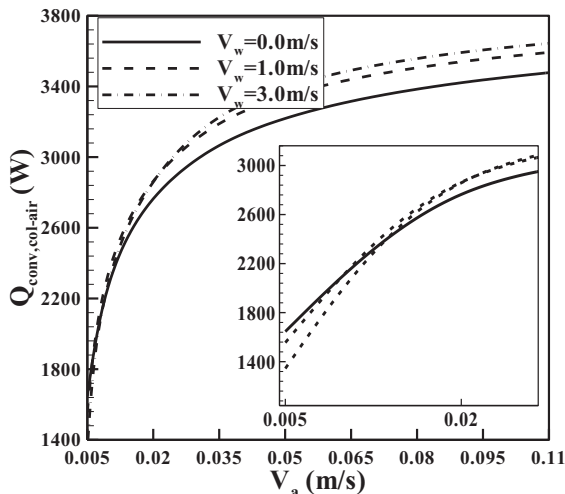
۵. نتایج تحلیل عددی اثر باد بر عملکرد کلکتور

حداکثر سرعت باد در مناطق شهری، ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته

در شکل (۶)، انتقال حرارت جابجایی بین کلکتور و هوای ورودی بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا به‌ازای مقادیر مختلف سرعت باد و شار تابشی برخوردی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع نشان داده شده است. در محدوده سرعت نزدیک شدن هوای اندکی کمتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود که مقدار انتقال حرارت جابجایی با کاهش سرعت باد افزایش می‌یابد، در حالی که در محدوده سرعت هوای نزدیک شدن بیشتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه، کاهش سرعت باد باعث کاهش انتقال حرارت جابجایی بین کلکتور و هوای ورودی می‌شود. برای مثال در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه و شار تابشی برخوردی ۵۰۰ وات بر مترمربع با کاهش سرعت باد از سه به صفر متر بر ثانیه، مقدار انتقال حرارت جابجایی در حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه و در شرایط مشابه، مقدار انتقال حرارت جابجایی در حدود ۴ درصد کاهش می‌یابد.



الف - $I_T=500 \text{ W/m}^2$



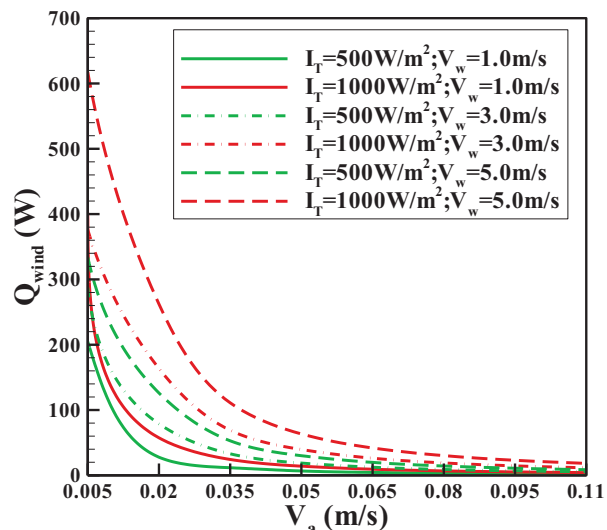
ب - $I_T=1000 \text{ W/m}^2$

شکل (۶): انتقال حرارت جابجایی از کلکتور به هوای ورودی بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا

به نظر می‌آید در سرعت‌های نزدیک شدن هوای کمتر از ۰/۰۲ متر

با توجه به شکل (۴) در سرعت ثابت نزدیک شدن هوا، کاهش سرعت باد منجر به افزایش اتلاف حرارتی تشعشعی می‌شود. برای نمونه، با کاهش سرعت باد از سه به صفر متر بر ثانیه در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه و شار تابشی برخوردی ۵۰۰ وات بر مترمربع، مقدار اتلاف تشعشعی گرما ۹ درصد افزایش می‌یابد. همین روند برای شار تابشی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع نیز دیده می‌شود. در سرعت ثابت باد افزایش سرعت نزدیک شدن هوا منجر به کاهش این اتلاف می‌شود. برای نمونه، برای سرعت باد سه متر بر ثانیه و شار تابشی برخوردی ۵۰۰ وات بر مترمربع با افزایش سرعت نزدیک شدن هوا از ۰/۰۰۵ به ۰/۱۱ متر بر ثانیه مقدار کاهش اتلاف تشعشعی گرما برابر ۵۸ درصد است. همین روند برای شار تابشی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع نیز با نرخ بیشتری دیده می‌شود، به گونه‌ای که کاهش اتلاف با افزایش سرعت نزدیک شدن هوا از ۰/۰۰۵ به ۰/۱۱ متر بر ثانیه حدود ۶۷ درصد است.

در شکل (۵)، انتقال حرارت اتلافی توسط جریان باد بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا به‌ازای مقادیر مختلف شار تابشی برخوردی و سرعت باد نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵)، افزایش سرعت باد منجر به افزایش اتلاف گرما در سرعت ثابت نزدیک شدن هوا می‌شود و در سرعت باد ثابت افزایش سرعت نزدیک شدن هوا منجر به کاهش این اتلاف می‌شود. برای نمونه، مقدار کاهش اتلاف حرارتی باد با افزایش سرعت نزدیک شدن هوا از ۰/۰۰۵ به ۰/۱۱ متر بر ثانیه در شار تابشی برخوردی ۵۰۰ وات بر مترمربع و سرعت باد سه متر بر ثانیه، حدود ۹۹ درصد می‌باشد. همچنین تغییر اتلاف گرما با تغییر سرعت باد در سرعت‌های کم نزدیک شدن هوا بیشتر است. به عبارت دیگر، هر چه سرعت نزدیک شدن هوا بیشتر می‌شود، تأثیر افزایش سرعت باد بر روی اتلاف جابجایی کمتر می‌شود.

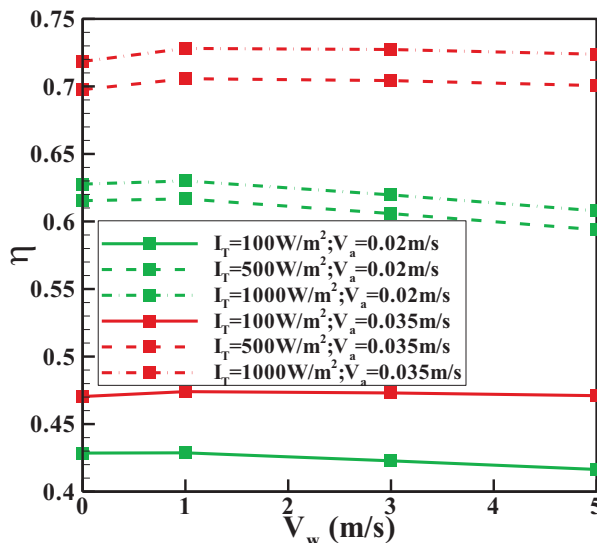


شکل (۵): اتلاف حرارتی باد بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در هر سرعت ثابت نزدیک شدن هوا، افزایش سرعت باد باعث افزایش ضریب تأثیر تبادل حرارتی می‌شود. این به دلیل کاهش دمای صفحه جاذب و در نتیجه، کاهش افت تشعشعی به محیط است. لازم به ذکر است نرخ افزایش این ضریب با افزایش سرعت باد در مقادیر سرعت نزدیک شدن هوای کمتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه کمتر از نرخ افزایش آن برای مقادیر سرعت نزدیک شدن هوای بزرگ‌تر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه می‌باشد، چون در سرعت‌های کم نزدیک شدن هوا افزایش افت حرارتی جابجایی به محیط هم اهمیت پیدا می‌کند. برای مثال، با افزایش سرعت باد از صفر به ۵ متر بر ثانیه، مقدار این ضریب به‌زای سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه حدود ۵ درصد افزایش می‌یابد، ولی به‌زای سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۵ متر بر ثانیه، این افزایش حدود ۳۱ درصد می‌باشد.

در شکل (۸)، بازده کلکتور بر حسب سرعت باد برای مقادیر مختلف شار تابشی برخوردی و دو سرعت نزدیک شدن هوا نشان داده شده است. به‌طور عمومی بازده کلکتور با افزایش سرعت نزدیک شدن هوا و یا افزایش تشعشع برخوردی افزایش می‌یابد. این روند با توجه به افزایش دمای صفحه جاذب در اثر افزایش شار تابشی و همچنین افزایش جابجایی بین صفحه جاذب و هوای ورودی ناشی از افزایش سرعت نزدیک شدن هوا توجیه می‌شود. این موضوع در [۱۴] به‌طور مفصل بحث شده است.

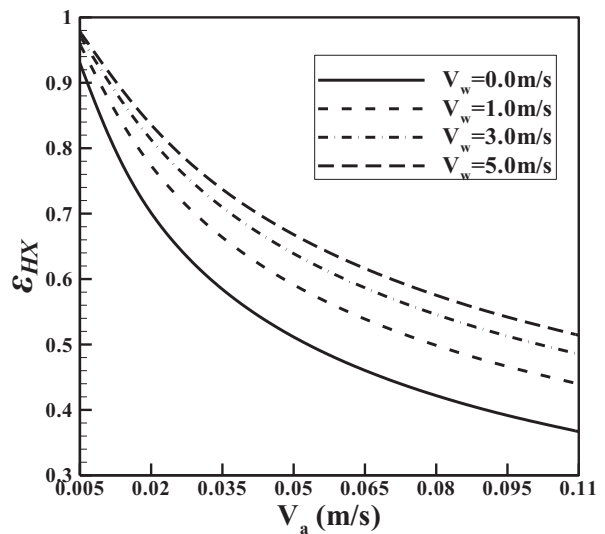
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۸)، بازده کلکتور در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه با افزایش سرعت باد ابتدا افزایش و سپس به کندی کاهش می‌یابد. برای مثال، به‌زای شار تابشی برخوردی ۵۰۰ وات بر مترمربع و سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه با افزایش سرعت باد از صفر به ۱ متر بر ثانیه بازده کلکتور ابتدا روندی افزایشی و سپس با افزایش سرعت باد از ۱ به ۵ متر بر ثانیه روندی کاهشی دارد. این روند با نتایج کار تجربی فلک و همکاران [۱۲] به‌طور کلی تطابق دارد، ولی برداشت تقریبی ایشان، این بوده است که بیشترین بازده در سرعت باد ۱/۵ متر بر ثانیه رخ می‌دهد.



شکل (۸): بازده کلکتور بر حسب سرعت باد به‌زای مقادیر مختلف شار تابشی برخوردی و سرعت نزدیک شدن هوا

بر ثانیه اثر افزایش اتلاف حرارتی جابجایی ناشی از باد بیش از اثر باد در کاهش اتلاف تشعشعی از صفحه جاذب می‌باشد. به همین دلیل است که کاهش سرعت باد، باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی به هوای ورودی می‌شود. از طرف دیگر با توجه به رابطه (۹) در یک سرعت ثابت باد هر چه سرعت نزدیک شدن هوا کمتر شود، اتلاف حرارتی جابجایی ناشی از اثر باد افزایش می‌یابد. به همین دلیل برای سرعت نزدیک شدن هوای کم ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه بیشترین مقدار انتقال حرارت جابجایی از کلکتور به هوا در شرایط بدون حضور باد به دست آمده است. همچنین شکل (۶) نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت جابجایی با افزایش مقدار تشعشع برخوردی افزایش می‌یابد. این تغییر به دلیل افزایش دمای صفحه جاذب ناشی از جذب شار تابشی بیشتر می‌باشد. برای نمونه، با افزایش شار تابشی برخوردی از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۳۵ متر بر ثانیه و سرعت باد سه متر بر ثانیه مقدار انتقال حرارت جابجایی در حدود ۵۲ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل (۷)، ضریب تأثیر تبادل حرارتی بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا برای سرعت‌های مختلف باد و شار تابشی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر سرعت باد، با افزایش سرعت نزدیک شدن هوا این ضریب کاهش می‌یابد. این به دلیل کاهش دمای هوای محفظه ناشی از افزایش دبی حجمی عبوری از روزه‌های صفحه جاذب است. این روند برای شرایط بدون باد در نتایج آگوستاس لئون و کومار [۱۰] نیز مشاهده می‌شود. آن‌ها مقدار این ضریب را در سرعت نزدیک شدن هوای ۰/۰۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۷ به دست آوردند و نتایج تحقیق حاضر، این ضریب را برای $V_w=0$ برابر ۰/۶۹ پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۷): ضریب تأثیر تبادل حرارتی کلکتور بر حسب سرعت نزدیک شدن هوا

به‌سزایی بر بازده کلکتور دارند. در سرعت نزدیک شدن هوای کمتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه، افزایش سرعت باد منجر به کاهش بازده کلکتور می‌شود، در حالی که در سرعت نزدیک شدن هوای بزرگ‌تر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه بیشترین مقدار بازده به شرط وجود باد و به‌ازای یک مقدار بهینه از سرعت باد رخ می‌دهد.

سپاسگزاری

از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور و پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی تشکر می‌شود.

فهرست علائم و اختصارات

A	مساحت کل کلکتور، m^2
A_s	مساحت سطح کلکتور، m^2
c_p	گرمای ویژه هوا، $kJ/kg.K$
I_T	شار تابشی خورشیدی برخوردی به کلکتور، W/m^2
\dot{m}_{air}	نرخ جرمی هوای ورودی به کلکتور، kg/s
Q	مقدار انتقال حرارت، W
T	دما، K
U	ضریب کلی انتقال گرما، $W/(m^2.K)$
V	سرعت، m/s
W	پهنای کلکتور، m
زیر نویس ها	
a	جریان هوا به سمت کلکتور
abs	تشعشع خورشیدی جذب شده
amb	محیط
col	صفحه کلکتور
$cond$	هدایت
$conv$	جابجایی
gnd	زمین
out	خروجی از کلکتور
$plen$	محفظه کلکتور
rad	تشعشع
$room$	محل مورد گرمایش
sur	محیط اطراف
sky	آسمان
$wall$	دیوار پشت کلکتور
$w, wind$	جریان باد

به‌طور کلی وجود باد، دو اثر متناقض بر عملکرد کلکتور دارد. باد از یک طرف، باعث افزایش اتلاف حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به محیط اطراف می‌شود و می‌تواند منجر به کاهش راندمان شود و از طرف دیگر، باعث کاهش اتلاف تشعشعی از صفحه جاذب به محیط اطراف می‌شود که می‌تواند راندمان را افزایش دهد. همچنین اتلاف حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به محیط وابسته به سرعت نزدیک شدن هواست که این باعث پیچیده شدن موضوع می‌شود. در سرعت نزدیک شدن هوای برابر با ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه، انتقال حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به هوای ورودی با توجه به شکل (۶) کمترین مقدار و انتقال حرارت تشعشعی از صفحه کلکتور به محیط در این حالت با توجه به شکل (۴) بیشترین مقدار می‌باشد. در نتیجه با افزایش سرعت باد و افزایش اتلاف حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به محیط بازده کاهش می‌یابد، ولی در سرعت‌های نزدیک شدن هوای بزرگ‌تر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه، بیشترین مقدار بازده در کمترین مقدار سرعت باد رخ نمی‌دهد. در این محدوده از مقادیر سرعت نزدیک شدن هوا، افزایش سرعت باد، اثر قابل توجهی در کاهش اتلاف حرارت تشعشعی و افزایش انتقال حرارت جابجایی از صفحه کلکتور به هوای ورودی دارد. در نتیجه، یک شرایط بهینه از نظر سرعت باد وجود دارد که افزایش بیشتر از آن، اثر قابل توجهی در کاهش انتقال حرارت تشعشعی از صفحه کلکتور به محیط ندارد، ولی باعث بیشتر شدن اتلاف حرارتی جابجایی از صفحه کلکتور به محیط می‌شود و بازده را کاهش می‌دهد.

۶. نتیجه گیری

مطالعه عددی اثر باد بر عملکرد کلکتور نشان می‌دهد که:

- (الف) با کاهش سرعت باد، مقدار انتقال حرارت جابجایی از کلکتور به هوا در سرعت نزدیک شدن هوای کمتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، در حالی که در سرعت نزدیک شدن هوای بیشتر از ۰/۰۲ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. چون در سرعت‌های کم نزدیک شدن هوا، اثر افزایش اتلاف حرارتی جابجایی ناشی از سرعت بیشتر باد بیش از اثر باد در کاهش اتلاف تشعشعی از صفحه جاذب است.
- (ب) به‌ازای مقادیر مختلف سرعت نزدیک شدن هوا، افزایش سرعت باد، دمای صفحه جاذب را کاهش می‌دهد و افت تشعشعی را کم می‌کند و باعث افزایش ضریب تأثیر تبادل حرارتی می‌شود.
- (ج) افزایش سرعت نزدیک شدن هوا و افزایش سرعت باد، هر دو باعث کاهش افت تشعشعی به محیط می‌شوند.
- (د) دو پارامتر سرعت باد و سرعت نزدیک شدن هوا، تأثیر

- [7] Hollick, J.C., "Unglazed Solar Wall Air Heaters", Renewable Energy, Vol. 5, No. 1, 1994.
- [8] Arulanandam, S.J., Hollands, K.G.T., and Brundrett, E., "A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions", Solar Energy, Vol. 67, Nos. 1-3, 1999.
- [9] Van Decker, G.W.E., Hollands, K.G.T., and Brunger, A.P., "Heat exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch", Solar Energy, Vol. 71, No. 1, 2001.
- [10] Augustus Leon, M., and Kumar, S., "Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors", Solar Energy, Vol. 81, No. 1, 2007.
- [11] Pesaran, A., and Wipke, K., "Use of unglazed transpired solar collectors for desiccant cooling", Solar Energy, Vol. 52, No. 5, 1994.
- [12] Fleck, B.A., Meier, R.M., and Motovic, M.D., "A filed study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar", Solar Energy, Vol. 73, No. 3, 2002.
- [13] Gunnewiek, L.H., Brundrett, E., and Hollands, K.G.T., "Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors", Solar Energy, Vol. 72, No. 4, 2002.
- [۱۴] عبداللهی طاهری، رضا، مطالعه و مدل‌سازی عملکرد سیستم‌های گرمایش هوا با استفاده از کلکتورهای خورشیدی غیرشیشه‌ای نفوذپذیر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، کاشان، ۱۳۹۰.
- [15] Dymond, C., Kutscher, C.F., "Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors", Solar Energy, Vol. 60, No. 5, 1997.

علامه یونانی

چگالی هوا، kg/m^3	ρ
لزجت هوا، kg/(m-s)	ν
ضریب صدور	ε
ثابت استفان-بلتزنمن، $\text{W/(m}^2\text{K}^4)$	σ_{sb}

مراجع

- [1] Xinshi, Ge., and Hong, Ye., "Solar air heating system", Solar Energy, Vol. 1, No. 1, 2003
- [2] Kutscher, C.F., Christensen, C., and Barker, G., "Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory", ASME Journal of Solar Engineering, Vol. 115, No. 3, 1993.
- [3] Cao, S., Hollands, K.G.T., and Brundrett, E., "Heat exchange effectiveness of unglazed transpired-plate solar collector in 2D flow", Proceedings of ISES Solar World Congress 1993, Budapest, Hungary, Vol. 5, pp. 351-366, 1993.
- [4] Kutscher, C.F., "Heat exchange effectiveness and pressure drop for air flow through perforated plates, with and without crosswind", ASME Journal of Heat Transfer, 116, No. 2, 1994.
- [5] Van Decker, G.W.E., Hollands, K.G.T., and Brunger, A.P., "Heat exchange effectiveness of unglazed transpired-plate solar collector in 3D flow", Proceedings of Euro Sun 96, Germany, pp. 130-846, 1996.
- [6] Summers, D.N., *Thermal Simulation and Economic Assessment of Unglazed Transpired Collector System*, MS Thesis, Wisconsin Energy Bureau, University of Wisconsin, USA, 1996.