



تأثیر ابعاد کلکتور خورشیدی صفحه تخت بر عملکرد آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی

علی ملکی^{۱*}، روح انگیز رحیمی^۲، شاهین بشارتی^۳

- ۱- استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد (drmaleki@iran.ir)
- ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد
- ۳- مربی و عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد

چکیده:

امروزه با افزایش روز افزون مصرف انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. در این میان انرژی خورشید به لحاظ عدم تولید آلاینده‌ها جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین وسیله‌ها برای جمع‌آوری انرژی خورشید، کلکتور خورشیدی صفحه تخت است. ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد کلکتورهایی هستند که برای گرم کردن هوا استفاده می‌شوند. بنابراین به منظور بررسی تأثیر ضخامت و نسبت طول به عرض کلکتور بر عملکرد کلکتور، ۳۵ مدل کلکتور با ابعاد مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی و تحلیل شدند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت کلکتور، دبی جرمی هوای خروجی افزایش خطی داشته، اما اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از کلکتور و بازده حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت طول به عرض کلکتور، دبی جرمی هوای خروجی کاهش، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی و بازده حرارتی کلکتور افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ابعاد کلکتور، انرژی خورشیدی، دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد کلکتور.

مقدمه

یکی از سیاست‌هایی که کشورهای توسعه یافته به ویژه در چند دهه اخیر به شدت دنبال کرده‌اند، سیاست جایگزینی سوخت‌های فسیلی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. مهمترین نوع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید بوده که میزان تابش آن، تنها بر سطح ایران بیش از دو برابر انرژی مصرفی کل جهان است.

ساده‌ترین و مؤثرترین وسیله‌ها برای جمع‌آوری انرژی خورشید به منظور استفاده در سیستم‌هایی که نیاز به انرژی حرارتی در درجه حرارت نسبتاً پایین دارند، کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت هستند. کلکتور صفحه تخت نسبت به انواع متمرکز کننده که در دماهای بالا استفاده می‌شوند، طراحی ساده و هزینه ساخت پایینی دارد و همچنین علاوه بر جذب تابش مستقیم قادر به جذب تابش دیفیوز نیز است. کلکتورهای صفحه تخت از یک پوشش شفاف برای عبور تابش خورشید و از یک صفحه جاذب برای جذب



تابش عبور داده شده تشکیل شده‌اند. ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد کلکتور هستند. جهت‌گیری و زاویه شیب کلکتور میزان تابش دریافتی توسط سطح کلکتور را تغییر می‌دهند بنابراین باید بهترین جهت‌گیری و زاویه شیب برای کلکتور تعیین شود. در نیمکره شمالی بهترین جهت برای نصب کلکتورها، جهت جنوب است و برای جذب حداکثر تابش کل سالانه زاویه شیب کلکتور برابر با عرض جغرافیایی منطقه در نظر گرفته می‌شود (Gunerhan and Hepbasli, 2007; Jamil Ahmad and Tiwari, 2009; عبدل‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

با توجه به این که ساخت کلکتور با ابعاد مختلف و تجهیزات آزمایش علاوه بر دشواری و صرف وقت هزینه زیادی را نیز دارد باید به دنبال روش دیگری به جای انجام آزمایش بود. دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) یا به اختصار CFD دربردارنده‌ی روش‌های تحلیلی سیستم‌های شامل جریان سیال و انتقال حرارت و سایر پدیده‌های همراه می‌باشد. تطبیق پذیری، دقت و کارآمد بودن این روش باعث افزایش کاربرد آن در اکثر فرآیندها شده است (Norton and Sun, 2006). حالت‌های ممکن قرارگیری سیستم تهویه مطبوع را برای دستیابی به بهترین مکان قرارگیری سیستم تهویه مطبوع در یک اتاق استاندارد اداری با استفاده از CFD توسط پژوهشگرانی شبیه‌سازی شد (Yongson *et al.*, 2007). افراد دیگری نیز از CFD برای تخمین میانگین سرعت و دما درون دودکش خورشیدی استفاده کردند. این افراد دودکش را به صورت دو بعدی، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و با فرض یکنواخت بودن توزیع دما در بعد سوم شبیه‌سازی کردند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع دودکش، سرعت و دمای هوای درون دودکش افزایش می‌یابد (Karapantsios *et al.*, 2007).

پژوهشگرانی با استفاده از مدل ریاضی و مدل CFD دوبعدی شیب بهینه‌ای که باعث جذب ماکزیمم تشعشع و ماکزیمم جریان هوا در دودکش‌های خورشیدی می‌شود را تعیین کردند. آن‌ها دودکش خورشیدی را توسط نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی و از مدل انتقال تنش برشی $(k-\omega)$ برای مدل تلاطم استفاده کردند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش شیب دودکش سرعت جریان هوا افزایش و دمای هوا کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که همبستگی قابل قبولی بین نتایج تجربی، مدل ریاضی و مدل CFD وجود داشت (Sakonidouet *al.*, 2008).

پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از CFD و آزمایشات تجربی تأثیر ضخامت و شیب دودکش‌های خورشیدی را بر جریان هوای خروجی دودکش‌های خورشیدی بررسی کرده‌اند. آن‌ها با بکارگیری روش حجم محدود معادلات بقای جرم، پیوستگی و معادله‌ی انرژی را برای دودکش خورشیدی حل کردند. دودکش به صورت دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی شد و جریان هوا به صورت جریان متلاطم و غیرپایدار در نظر گرفته شد. فشار در ورودی و خروجی دودکش برابر با فشار اتمسفر تعریف شد همچنین از مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای مدل تلاطم استفاده شد. با بررسی نتایج مشخص شد که با افزایش فاصله بین صفحه‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای جریان هوای دودکش خورشیدی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشات نشان داد که تطابق خوبی بین این دو وجود دارد (Saifi *et al.*, 2012).

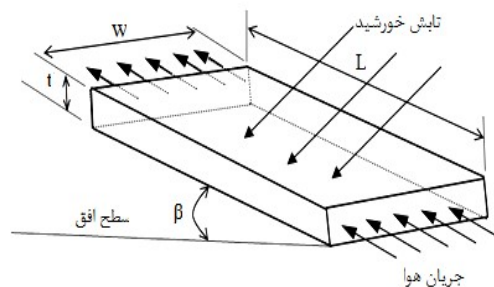


برخی جریان هوا را در یک دودکش خورشیدی از طریق CFD و روش حجم محدود بررسی کردند. آن‌ها به منظور بررسی اثر افزایش ارتفاع، عرض دهانه ورودی دودکش و افزایش گرادیان حرارتی دیواره‌ها بر میزان بهبود کارایی دودکش خورشیدی، ۴۸ مدل را با استفاده از نرم‌افزار فلونت تحلیل کردند. آن‌ها برای ایجاد شبکه از نرم‌افزار گمبیت و شبکه سازمان یافته استفاده کردند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع دودکش، نرخ جرمی جریان هوای خروجی از دودکش افزایش می‌یابد همچنین با افزایش عرض دهانه ورودی دودکش میزان سرعت و نرخ جرمی جریان هوا افزایش می‌یابد (شمسایی و همکاران، ۱۳۹۰).

تأثیر نسبت طول به عرض کلکتور صفحه تخت را بر بازده کلکتور به صورت تئوری و آزمایشگاهی نیز توسط محققانی بررسی شده است. نتایج این افراد نشان داد که در یک سطح کلکتور ثابت با افزایش نسبت طول به عرض و با توجه به ثابت نگه داشتن دبی، سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد که این افزایش منجر به افزایش بازده کلکتور می‌شود (Yeh and Lin, 1995). با بررسی تحقیقات انجام شده مشخص گردید که پژوهشی در مورد شبیه‌سازی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت نگرفته است و با توجه به کارآمد بودن این روش در شبیه‌سازی سیستم‌های شامل جریان سیال و انتقال حرارت در تحقیق حاضر از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی کلکتور خورشیدی صفحه تخت به منظور بررسی تأثیر ضخامت و نسبت طول به عرض کلکتور بر عملکرد کلکتور استفاده شد.

تئوری تحقیق

با توجه به نکات تأثیرگذار بر جریان هوا در کلکتور و جذب گرما در کلکتور که ناشی از قوانین و ماهیت پدیده‌های علوم مکانیک سیالات، انتقال حرارت و جابه‌جایی آزاد می‌باشند، دو پارامتر هندسی مهم که بر بازده کلکتور مؤثر بود، انتخاب شد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است دو پارامتر هندسی ضخامت (t) و نسبت طول به عرض کلکتور (L/W) به عنوان پارامترهای تأثیرگذار انتخاب شدند. صفحه بالایی که در شکل دیده می‌شود پوشش شفاف است که موجب عبور تابش خورشید به داخل کلکتور می‌شود و صفحه پایینی صفحه جاذب است که تابش عبور داده شده از پوشش شفاف را جذب می‌کند. شیشه با ضریب عبور $0/88$ به عنوان پوشش شفاف و آلومینیم با پوشش تیره با ضریب جذب $0/95$ به عنوان صفحه جاذب انتخاب شد (Duffie and Beckman, 1991).



شکل ۱- شماتیکی از یک کلکتور صفحه تخت



در مدلسازی کلکتور، مساحت کلکتور با مقدار $1/4$ متر مربع ثابت در نظر گرفته شد و عامل ضخامت در 7 سطح با مقادیر $4, 5, 6, 7, 8, 9$ و 10 سانتی متر و نسبت طول به عرض کلکتور در 5 سطح با مقادیر $1, 1/5, 2, 2/5$ و 3 لحاظ شد و در مجموع 35 کلکتور مدل شد. زاویه شیب کلکتور با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه شهر کرد که در عرض جغرافیایی $32/17$ درجه و طول جغرافیایی $50/51$ درجه قرار دارد، 32 درجه نسبت به افق انتخاب شد.

تولید شبکه

برای ایجاد مدل و شبکه‌بندی از نرم‌افزار Gambit 2.3.16 استفاده شد. به دلیل تقارن کلکتور در راستای عرضی نصف کلکتور به صورت سه بعدی مدل شد. برای افزایش سرعت محاسبات از شبکه سازمان‌یافته برای شبکه‌بندی مدل استفاده شد و همچنین با توجه به این که استفاده از سلول‌های شش‌وجهی (Hexahedral) موجب کاهش تعداد کل سلول‌های شبکه و کاهش زمان محاسبات می‌شود (دهقانی، ۱۳۸۷) از این نوع سلول در شبکه‌بندی مدل استفاده شد. به دلیل متلاطم بودن جریان و به منظور افزایش دقت محاسبات، در لایه‌های مرزی تا حد امکان سلول‌ها ریزتر انتخاب شد.

در شبیه‌سازی عددی جریان سیالات کیفیت شبکه بسیار مهم می‌باشد و نقش عمده‌ای را در دقت و پایداری شبکه ایفا می‌کند. با توجه به نوع سلول به کار برده شده در شبکه‌بندی مدل، پارامترهای نسبت ظاهری (Aspect Ratio) و مورب بودن (Skewness) بررسی شد. برای یک شبکه سه بعدی با کیفیت مناسب باید نسبت ظاهری کمتر از 5 و میزان مورب بودن سلول‌ها کمتر از $0/4$ باشد (دهقانی، ۱۳۸۷).

مدل تلاطمی

مدل $k-\epsilon$ استاندارد، ساده‌ترین و کامل‌ترین مدل دو معادله‌ای است که توانایی و دقت قابل قبولی در محدوده‌ی وسیعی از جریان‌های متلاطم را دارد. در مدل‌های $k-\epsilon$ میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر بیان می‌شود:

- انرژی جنبشی جریان آشفته (k)

- نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی (ϵ)

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_j'^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \nu \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \quad (2)$$

در این معادلات $\overline{u_1}$ متوسط زمانی مولفه سرعت (در جریان آشفته) در جهت $\overline{u_1}$ دستگاه مختصات بر حسب m/s ، u_1' نوسان

مولفه سرعت (در جریان آشفته) در جهت $\overline{u_1}$ دستگاه مختصات بر حسب m/s و ν لزجت سینماتیکی بر حسب m^2/s می‌باشد.

مدل $k-\epsilon$ استاندارد مقادیر k و ϵ توسط معادلات نیمه تجربی زیر به دست می‌آید:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_j \right]_j + G + B - \rho \epsilon \quad (3)$$



$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_j = \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_j \right]_{,i} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 \times (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

که در آن C_1 و C_2 و C_3 ضرایب تجربی بوده و σ_ε و σ_k نیز به ترتیب اعداد پراوتل و اشمیت آشفته‌گی می‌باشند. عبارات $C_1(\varepsilon/k)G$ و $C_2\rho(\varepsilon^2/k)$ در معادله آخر به ترتیب بیانگر فرآیندهای تولید برشی و فرآیندهای اتلاف ویسکوز و عبارت $C_1(1 - C_3)(\varepsilon/k)B$ بیانگر اثرات شناوری است. عبارت G معرف میزان تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی ناشی از برهم‌کنش بین جریان متوسط و میدان جریان آشفته می‌باشد و از این رو به آن اصطلاحاً عبارت تولید برشی گفته می‌شود. عبارت B نیز بیانگر عبارت تولید اتلاف شناوری ناشی از میدان چگالی نوسان کننده جریان می‌باشد. روابط صریح برای G و B به صورت زیر هستند:

$$G = -\overline{\rho u_i' u_j' u_i' u_j'} \quad (5)$$

$$B = \overline{\rho' u_i' g_i} \quad (6)$$

u_i' نوسان مولفه سرعت در جریان متلاطم در جهت i ام دستگاه مختصات، g_i شدت جاذبه در جهت i ام دستگاه مختصات و ρ' نوسان در جرم مخصوص است.

معادلات حاکم بر CFD

برای جریان هوای درون کلکتور، فلونت معادلات بقای جرم (Continuity)، مومنوم (Navier-Stokes equation) و معادله

انرژی را حل می‌کند.

معادله بقای جرم

معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (7)$$

که ρ بر حسب kg/m^3 و u_i بر حسب m/s به ترتیب چگالی و سرعت سیال در راستای i ام مختصات و S_m بر حسب $\text{kg/m}^3\text{s}$ آهنگ جرم اضافه شده می‌باشند (رحیمی و سلطانی، ۱۳۸۹).

معادله بقای مومنوم (ناویر- استوکس)

معادله بقای مومنوم در جهت i به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (8)$$

که p فشار استاتیک بر حسب N/m^2 ، τ_{ij} تانسور تنش بر حسب N/m^2 ، ρg_i بر حسب N/m^3 و F_i بر حسب N/m^3 به ترتیب نیروهای جسمی گرانشی و جسمی خارجی در جهت i می‌باشد. F_i همچنین می‌تواند شامل جملات نظیر مدل محیط متخلخل شود. تانسور تنش τ_{ij} به صورت زیر است:



$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_t}{\partial x_t} \delta_{ij} \quad (9)$$

که μ لزجت مولکولی، جمله دوم از سمت راست تاثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی و δ_{ij} دلتای کرونگر است که به صورت زیر تعریف می‌شود (دهقانی، ۱۳۸۷).

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1; & i = j \\ 0; & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

معادله انرژی

فلوئنت معادله انرژی را به شکل زیر در نظر می‌گیرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j' J_j' + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (11)$$

که k_{eff} بر حسب W/m^2C ضریب هدایت حرارتی موثر می‌باشد و برابر است با $k_f + k_s$ (که k_f ضریب هدایت گرمایی جریان مغشوش، با توجه به مدل اغتشاش به کار رفته و k_s ضریب هدایت ماده جامد است). p فشار استاتیک، T درجه حرارت سیال و J_j' شار پخشی از گونه‌های j است. سه ترم اول در سمت راست معادله به ترتیب بیان کننده انتقال انرژی به صورت هدایت، پخش گونه‌ها و پراکندگی لزجت می‌باشد. S_h شامل حرارت واکنش‌های شیمیایی و دیگر عبارات حرارتی حجمی که کاربر با آن مواجه خواهد شد است. E مجموع انرژی جریان به صورت زیر بیان می‌شود (رحیمی و سلطانی، ۱۳۸۹).

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_t^2}{2} \quad (12)$$

h آنتالپی محسوس است و برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = \sum_i m_j' h_j' + \frac{p}{\rho} \quad (13)$$

در معادله بالا m_j' نسبت جرمی از جز j

$$h_j' = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (14)$$

که $T_{ref} = 298/15$ K می‌باشد. برای حل معادلات حاکم بر مسئله از نرم‌افزار Fluent 6.3.26 استفاده شد.

شرایط مرزی

برای حل عددی مسئله حاضر ضروری است که شرایط مرزی برای نرم‌افزار تعریف شود. در ورودی کلکتور شرط مرزی فشار ورودی با مقادیر فشار نسبی صفر و دمای ۳۰۰ کلوین، در خروجی کلکتور شرط مرزی فشار خروجی با مقدار فشار نسبی صفر، برای صفحه جاذب شرط مرزی دیوار با مقدار شار حرارتی W/m^2 ۱۶/۵۶۶ (محاسبه شده از فرمول ۱۵) و برای دیواره‌های جانبی و پوشش شیشه‌ای شرط مرزی دیوار با مقادیر شار حرارتی صفر (دیواره‌ها کاملاً عایق فرض شدند) انتخاب شد.



همچنین دمای محیط (۲۷°C) ۳۰۰ K، فشار محیط ۸۰ kPa برای منطقه شهرکرد و شتاب گرانش $9/81 \text{ m/s}^2$ به عنوان شرایط کاری برای نرم‌افزار فلوئنت تعریف شد. از حل کننده Pressure Based با الگوریتم SIMPLE و از مدل تلاطم $k-\epsilon$ استاندارد برای شبیه‌سازی تلاطم استفاده شد. شار حرارتی روی صفحه جاذب از طریق فرمول زیر محاسبه شد:

$$Q = \frac{H_T}{t \times 3600} \tau \times \alpha \quad (15)$$

در این رابطه H_T شدت تابش کل روزانه روی سطح افق برای ماه جولای با مقدار $24/4 \text{ MJ/m}^2$ (بی‌نام، ۱۳۹۰)، t میانگین ساعات آفتابی برای ماه جولای (۱۰ ساعت)، α ضریب جذب صفحه جاذب و τ ضریب عبور پوشش شیشه‌ای است. بازده کلکتور به صورت نسبت توان حرارتی خروجی کلکتور به توان حرارتی دریافتی از خورشید در یک بازه زمانی تعریف می‌شود و از طریق رابطه زیر محاسبه شد (Yeh and Lin, 1995).

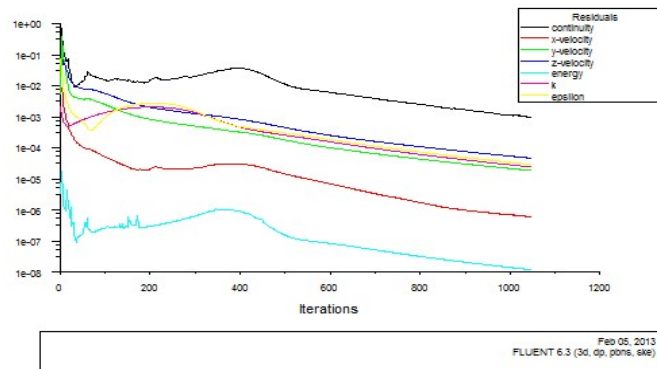
$$\eta = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\left(\frac{H_T}{t}\right) A} \quad (16)$$

در این رابطه \dot{m} دبی جرمی بر حسب kg/s ، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوای گرم بر حسب J/kg.K ، ΔT اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور بر حسب K و A مساحت کلکتور بر حسب m^2 است.

برای تمامی ۳۵ مدل کلکتور، مقادیر دبی جرمی و دمای کل هوا در سطح مقطع خروجی کلکتور از نرم‌افزار فلوئنت استخراج شد و با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن تاثیر عامل‌های ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر دبی جرمی، اختلاف دمای ایجاد شده و بازده کلکتور مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

نتایج و بحث

نمودار مربوط به باقی‌مانده‌های حل عددی معادلات در داخل کلکتور در شکل ۲ آورده شده است. اگر چه توافق واحدی برای معیار همگرایی وجود ندارد ولی برای اغلب مسائل کاهش مقدار باقی‌مانده‌ها برای تمام معادلات به مقدار 10^{-3} و برای معادله انرژی مقدار 10^{-6} معیار همگرایی است (ادیب زاده، ۱۳۸۲).



شکل ۲- نمودار باقی‌مانده‌ها حل عددی معادلات در داخل کلکتور



در شبیه‌سازی‌های CFD برای اطمینان از حل مسئله باید شبکه به گونه‌ای انتخاب شود که با ریزتر شدن شبکه نتایج حل تقریباً ثابت بماند در این حالت می‌توان با اطمینان بیان کرد که حل مساله مستقل از شبکه است. به همین دلیل برای هر مدل، پنج شبکه با در نظر گرفتن پارامترهای کیفیت شبکه ایجاد شد و هر پنج شبکه تحلیل و بزرگترین شبکه‌ای که با ریزتر کردن شبکه نتایج حل تقریباً ثابت می‌ماند به عنوان بهترین شبکه انتخاب شد. البته در انتخاب بهترین شبکه زمان محاسبات نیز در نظر گرفته شد. پس از مشخص شدن بهترین شبکه از نظر دقت و زمان محاسبات، تحلیل نهایی براساس این شبکه انجام شد. برای ۳۵ مدل بعد از حل مساله مقادیر دبی جرمی و دمای هوا در خروجی کلکتور از نرم‌افزار استخراج شد و اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور و بازده کلکتور محاسبه شد. جدول ۱ نتایج واریانس برای دبی جرمی کلکتور، اختلاف دمای ایجاد شده و بازده کلکتور ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر دبی جرمی هوای خروجی از کلکتور و اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از کلکتور و همچنین بازده کلکتور در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

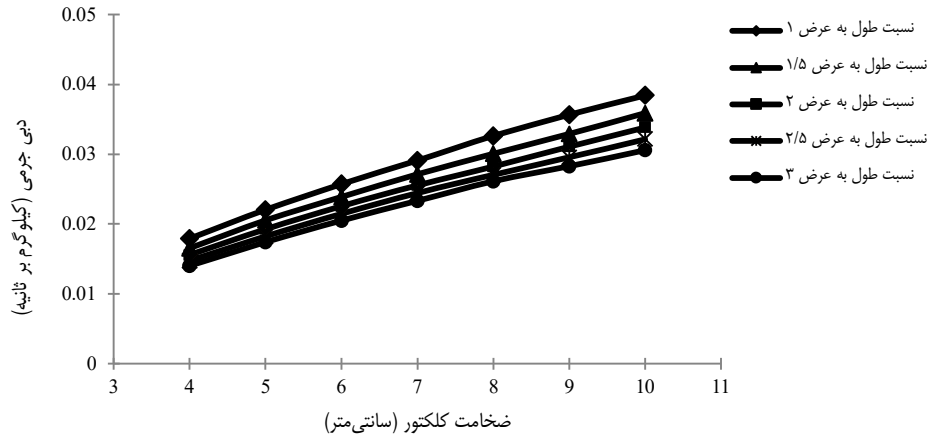
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس عامل‌های ضخامت و نسبت طول به عرض کلکتور بر دبی جرمی (kg/s)، اختلاف دمای هوای

خروجی از کلکتور (K) و بازده کلکتور

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات			میانگین مربعات	
		دبی جرمی	اختلاف دما	بازده	دبی جرمی	اختلاف دما
ضخامت	۶	۰/۰۰۱	۲۴۸۹/۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱**	۴۱۵**
نسبت طول به عرض	۴	۰/۰۰۰	۲۶۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰**	۶۵/۵**
خطا	۳۴	۰/۰۰۰	۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۸۵
کل	۳۴	۰/۰۰۱	۲۷۷۲	۰/۰۱۲		

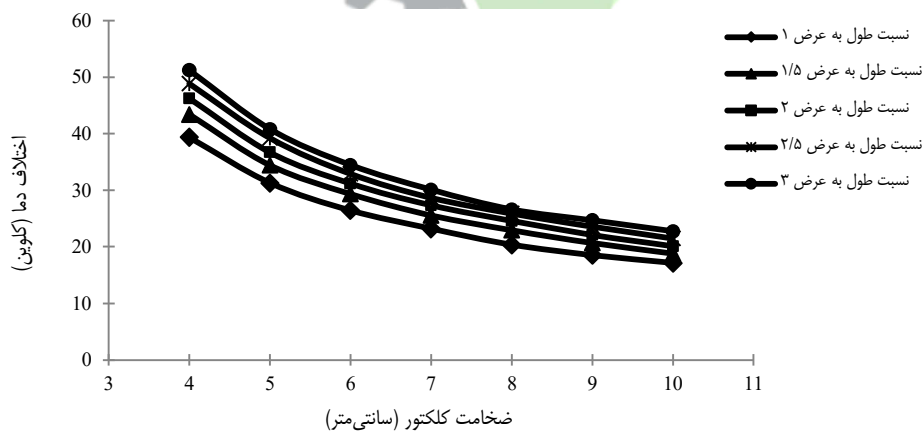
**وجود تفاوت معنی‌داری در سطح آماری ۱ درصد را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳ که اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر دبی جرمی هوای خروجی از کلکتور نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که در تمام سطوح نسبت طول به عرض کلکتور، با افزایش ضخامت کلکتور دبی جرمی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد که با تحقیقات انجام شده بر روی دودکش خورشیدی مطابقت دارد (Saifi et al., 2012). همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول به عرض کلکتور دبی جرمی هوای خروجی از کلکتور کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان چنین توجیح کرد که با افزایش نسبت طول به عرض کلکتور، به دلیل کاهش سطح مقطع ورودی کلکتور و افزایش اصطکاک در اثر افزایش مسیر جریان هوا، دبی جرمی کاهش می‌یابد.



شکل ۳- اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر دبی جرمی کلکتور

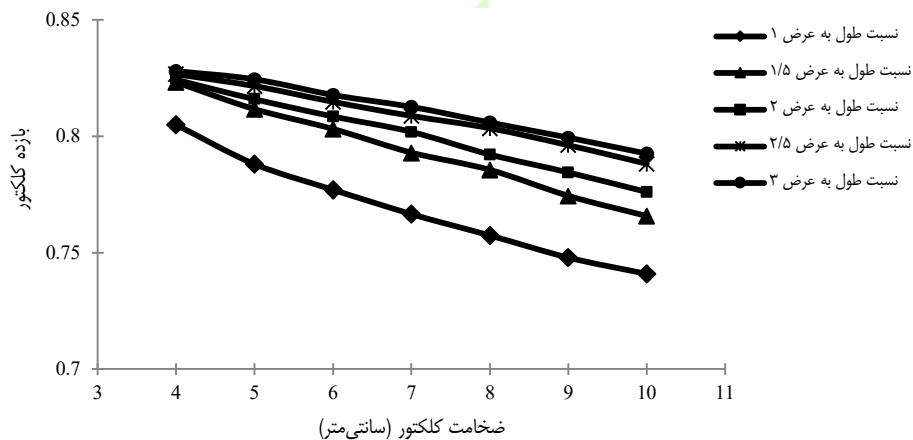
در شکل ۴ اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که در تمام سطوح نسبت طول به عرض کلکتور با افزایش ضخامت کلکتور، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور کاهش می‌یابد همچنین مشخص است که با افزایش ضخامت کلکتور، روند کاهش اختلاف دما شدت کمتری پیدا می‌کند. با افزایش ضخامت کلکتور به دلیل افزایش سطح مقطع عبور جریان هوا و کاهش اثر اصطکاکی دیواره‌ها، دبی جرمی افزایش می‌یابد و افزایش دبی جرمی کاهش دمای هوا را در پی خواهد داشت. همچنین می‌توان بیان کرد که با افزایش نسبت طول به عرض کلکتور، به دلیل افزایش اثر اصطکاکی دیواره‌ها و کاهش سرعت جریان هوا، جریان هوا زمان بیشتری را برای دریافت حرارت از دیوار جاذب پیدا می‌کند که این موجب افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور می‌شود. این روند تغییرات با تحقیقات محققان دیگر بر روی دودکش خورشیدی مطابقت دارد (Karapantsios *et al.*, 2007; Sakonidouet *al.*, 2008).



شکل ۴- اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از کلکتور



در شکل ۵ اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر بازده کلکتور نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص است که در تمام سطوح نسبت طول به عرض کلکتور با افزایش ضخامت کلکتور، بازده کلکتور کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت کلکتور روند کاهش اختلاف دما بر افزایش دبی جرمی غلبه می‌کند و منجر به کاهش توان حرارتی کلکتور می‌شود و کاهش توان حرارتی، کاهش بازده حرارتی کلکتور را به دنبال دارد. همچنین با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول به عرض کلکتور، بازده کلکتور افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با تحقیقاتی که به صورت تئوری و آزمایشگاهی بر روی کلکتور انجام شده است مطابقت دارد (Yeh and Lin, 1995).



شکل ۵- اثر ضخامت کلکتور و نسبت طول به عرض کلکتور بر بازده کلکتور

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کلکتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت کلکتور صفحه تخت، بازده کلکتور کاهش و با افزایش نسبت طول به عرض، بازده کلکتور افزایش می‌یابد. با توجه به انطباق نتایج حاصل از شبیه‌سازی کلکتورهای صفحه تخت با تحقیقاتی که در موارد مشابه و به صورت آزمایشگاهی توسط محققان دیگر انجام شده است می‌توان بیان کرد که دینامیک سیالات محاسباتی روش مناسبی برای شبیه‌سازی کلکتورهای صفحه تخت است.

منابع

۱. ادیب‌زاده، و. ۱۳۸۲. بررسی وضعیت آلودگی و تهویه زیرگذر زند شیراز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.
۲. بی‌نام. ۱۳۹۰. آمارنامه اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری.
۳. دهقانی سانچ، م. ا. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Fluent 6.3. شرکت ناقوس اندیشه. تهران.



۴. رحیمی، ر.، و م. سلطانی. ۱۳۸۹. دینامک سیالات محاسبات به کمک نرم‌افزار Fluent. چاپ هفتم. نشر طراح.
۵. شمسایی، ا.، ب. محمودی، م. سرلک، و ح. وثوقی‌فر. ۱۳۹۰. مدل‌سازی عددی جریان هوا در دودکش خورشیدی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری. دانشکده فنی. دوره ۴۵. شماره ۴. صفحات ۴۳۷ تا ۴۴۲.
۶. عبدالزاده، م.، س. جعفری، م. رهنما، و م. عامری. ۱۳۸۷. تعیین زاویه بهینه پانل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشی در کرمان. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران. جلد ۱۹. شماره ۱۰. صفحات ۹۱-۹۸.
7. Duffie, J. A., and W. A. Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons. New York.
8. Gunerhan, H., and A. Hepbasli. 2007. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. Journal Building and Environment 42: 779-783.
9. Jamil Ahmad, M., and G. N. Tiwari. 2009. Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation. Journal of Open Renewable Energy 2: 19-24.
10. Karapantsios, T. D., A. I. Balouktsis., D. Chassapis., and M. D. Petala. 2007. CFD model to estimate the effect of tilt and height on the natural air flow inside a solar chimney. 7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Venice. Italy.
11. Norton. T., and D. W. Sun. 2006. Computational fluid dynamics (CFD) -An effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review", Trends in Food Science & Technology 17: 600-620.
12. Saifi. N., N. Settou., B. Dokkar., B. Negrou. and N. Chennouf. 2012. Experimental study and simulation of airflow in solar chimneys. Energy Procedia 18: 1289-1298.
13. Sakonidou, E. P., T. D. Karapantsios., A. I. Balouktsis., and D. Chassapis. 2008. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. Solar Energy 82: 80-94.
14. Yeh, H. M., and T. T. Lin. 1995. The effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of Flat-Plate Solar Air Heaters. Journal of Energy 20: 1041-1047.
15. Yongson, O., I. A. Badruddin., Z. A. Zainal., and P. A. A. Narayana. 2007. Airflow analysis in an air conditioning room. Journal of Building and Environment 42: 1531-1537.



The Effect of Collector Dimensions on Flat-Plate Solar Collector Performance using Computational Fluid Dynamics Method

Ali Maleki^{1*}, Rohangiz Rahimi², Shahin Besharati³

1. Assistant professor of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University (drmaleki@iran.ir)
2. MSc. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University
3. Scholar professor of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University

Abstract

Today, increasing of energy use cause renewable energy become more important. The sun's energy has found a special place in terms of lack of emissions. One of the simplest and most effective ways of collecting solar energy is flat-plate solar collector. Collector thickness and its aspect ratio are main parameters affecting on performance. Therefore, in order to investigate the effect of collector thickness and aspect ratio on the collector performance, 35 collector models with different dimensions using computational fluid dynamics modeling software were analyzed. Results showed that by increasing of collector thickness, exhaust air mass flow rate increased linearly, but the difference temperature between the inlet and outlet of the collector and the thermal efficiency decreased. Also, by increasing the collector aspect ratio, exhaust air mass flow rate reduced and difference temperature between inlet and outlet of the collector and the thermal efficiency increased.

Keywords: Collector Dimensions, Solar Energy, Computational Fluid Dynamics, Collector Performance.