

بررسی عددی نحوه‌ی عملکرد دودکش خورشیدی همراه با دیوار جاذب میانی

ایمان پیشکار* (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور

بهزاد قاسمی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دربی ۳-۳، شماره ۲، ص. ۶۶-۵۷

در این تحقیق عملکرد یک دودکش خورشیدی با شار حرارتی متفاوت خورشید روی آن و استفاده از دیواره جاذب در میان دودکش با استفاده از پدیده‌ی ترموسیفون مورد بررسی قرار گرفته است. شدت و تمرکز انتقال حرارت و پارامترهای هندسی مربوط به دودکش خورشیدی از قبیل محل ورودی، ضخامت و طول دیوار جاذب و محل دیوار جاذب در میزان دبی هوای جابه‌جا شده بررسی و مقادیر بهینه برای دبی هوای بیشینه استخراج شده است. معادلات مربوط به جریان درون دودکش خورشیدی با استفاده از تقریب بوزینسک و در نظر گرفتن خواص فیزیکی ثابت و جریان پایدار، طی یک تحلیل عددی با استفاده از روش حجم محدود حل شده است و صحت نتایج با نتایج عددی و تجربی دیگران بررسی شده است. همچنین در این پژوهش المان‌بندی دیوار جاذب به عنوان راهکاری جدید برای افزایش پدیده‌ی ترموسیفون و دبی هوای خروجی در دودکش خورشیدی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: دودکش خورشیدی، دیوار جاذب میانی، ترموسیفون، المان‌بندی.

۱. مقدمه

امروزه اولویت اصلی برای برنامه‌ریزی‌های ساختمانی داشتن سیستم‌های با کیفیت انرژی بالاست. از این رو در اکثر کشورهای پیشرفته کاهش انرژی مصرفی در بخش ساختمان در دستور کار قرار گرفته است. در این خصوص بر اساس دستورالعمل اروپایی EPBD^۱ میزان انرژی مصرفی کلیه ساختمان‌های ساخته شده از سال ۲۰۲۰ باید تقریباً برابر صفر باشد.^[۱] صفر بودن انرژی مصرفی یک ساختمان در واقع نشان‌گر بالا بودن عملکردهای انرژی (تقریباً خودکفا) و تأمین انرژی مورد نیاز در آن ساختمان از طریق منابع تجدیدپذیر انرژی است که در داخل خود سیستم تولید می‌شود.^[۲] تهویه طبیعی به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها تبدیل به یک استراتژی امیدوارکننده برای خنک‌کاری غیرفعال ساختمان‌ها شده تا از این طریق بخشی از مشکلات موجود در صنعت تهویه مطبوع کاهش یابد.^[۳]

به طور کلی در سیستم‌های تهویه مطبوع، هوای تازه بر اساس اختلاف فشار هوا به داخل ساختمان نفوذ می‌کند. این اختلاف فشار ممکن است به صورت طبیعی یا اجباری به وجود آید. روش‌های تهویه طبیعی نه تنها به کاهش انرژی مصرفی توسط سیستم‌های تهویه کمک می‌کند بلکه کیفیت هوای داخل ساختمان را نیز بهتر می‌کند. در تهویه طبیعی برخلاف تهویه اجباری از نیروی طبیعی باد یا شناوری که باعث ورود هوای تازه به داخل فضا می‌شود، استفاده می‌شود.

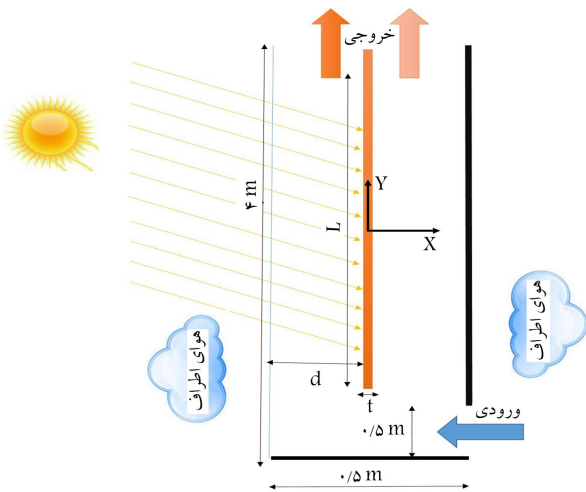
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۱۰/۱۳۹۶، اصلاحیه ۱۵/۲/۱۳۹۷، پذیرش ۳۷/۳/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J40.2018.10836.1454

یکی دیگر از روش‌های تهویه طبیعی ساختمان افزودن دودکش خورشیدی و دیواره‌ی ترمومب به سیستم بادگیرهای سنتی به منظور کمک به برقراری جریان هوای پایدار و در نهایت کمک به تهویه طبیعی ساختمان در مناطق گرم و خشک است. در این زمینه نیز مطالعاتی به شکل‌های مختلف توسط محققین مختلف انجام شده است.

دیوار ترمومب به عنوان یک سیستم گرمایش منفعل ساختمان اولین بار به عنوان دودکش خورشیدی اولیه توسط ترومب و میشل^[۶] در آزمایشگاه C.N.R.S فرانسه به کار گرفته شد. اونگ^[۷] برای بررسی میزان انتقال حرارت توسط دودکش خورشیدی برای تهویه ساختمان مدلی را توسعه داد و پس از آن مطالعاتی تجربی در این زمینه توسط اونگ و چو^[۸] ارائه شد. همچنین به منظور مطالعه‌ی تحلیلی دودکش خورشیدی، یک مدل ریاضی پایا به منظور بررسی و محاسبه‌ی میزان تغییر هوا در هر ساعت توسط باسیون و همکاران توسعه داده شد.^[۹] کیم و همکاران^[۱۰] با استفاده از حل دینامیک سیالات محاسباتی از طریق روش حجم محدود، تأثیر محل درجه‌های ورودی و خروجی در دیوار خورشیدی را بررسی کرده‌اند. میازاکی و همکاران^[۱۱] به کمک شبیه‌سازی عددی عملکرد گرمایی یک دودکش خورشیدی را برای اتاقی با مساحت ۳۶ متر مربع تحلیل کردند و تغییر بار گرمایی را برای آن در نظر گرفتند. بر اساس نتایج حاصله پهنای $3m$ / ° برای دودکش همخوانی بیشتری با داده‌های تجربی نشان می‌داد. آن‌ها در پایان نتیجه گرفتند که با این پهنای دودکش خورشیدی می‌توان به بیشترین نرخ جریان هوا به منظور تهویه ساختمان، دست یافت. گان^[۱۲] دریافت که اندازه‌ی میدان



شکل ۱. نمای جانبی دودکش خورشیدی با دیوار جاذب فلزی در قسمت میانی.

آنها مؤثر باشد. در اکثر طرح‌های پیشنهادی برای این دودکش‌ها دیوار جاذب یکی از دیواره‌های کناری است که با تابش نور خورشید و گرم شدن آن هوا در درون دودکش به جریان می‌افتد. با گرم شدن دیوار جاذب و افزایش گرادیان دما در آن، ناگزیر مقداری از گرما در این دیوار از طریق پدیده‌ی هدایت در ضخامت دیواره به بیرون یا محیط داخل ساختمان اتلاف می‌شود. در طرح پیشنهادی در پژوهش حاضر، دیوار جاذب در قسمت میانی دودکش قرار گرفته و از آن‌جا که پهنای بهینه برای دودکش بین 0.2 m تا 0.3 m معرفی شده، در طرح پیشنهادی فاصله‌ی هر دیواره تا دیوار جاذب میانی برابر 0.25 m در نظر گرفته شده است.^[۱۷] همچنین برای مطابقت با ساختمان‌های واقعی ارتفاع دودکش برابر 4 m در نظر گرفته شده است که این مقدار ۱ متر بیشتر از ارتفاع معمول یک ساختمان مسکونی بوده و علت آن بالاتر بودن دهانه‌ی خروجی دودکش از بام ساختمان است. برای دیوار جاذب به دلیل خاصیت هدایت حرارتی بالا فلز آلومینیوم انتخاب شده است. دیواره‌ی سمت چپ دودکش از جنس شیشه برای عبور نور انتخاب شده است. در شکل ۱ می‌توان هندسه‌ی مسئله‌ی مورد بررسی و نحوه‌ی عملکرد آن را به‌طور شماتیک مشاهده کرد.

۳. معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی

به منظور بررسی عددی نحوه‌ی عملکرد دودکش خورشیدی ابتدا به تشریح معادلات دوبعدی نویر-استوکس حاکم بر فیزیک جریان پرداخته می‌شود. جریان سیال تراکم ناپذیر فرض می‌شود و برای تغییرات چگالی از فرضیه بوزینسک استفاده شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیال در داخل ساختمان به عنوان حجم کنترل یا ناحیه محاسباتی عبارتند از:^[۱۸]

پیوستگی

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنتوم حاکم بر جریان معادلات متوسط‌گیری شده ناور استوکس خواهد بود.

مومنتوم x :

محاسباتی در محاسبات CFD تأثیر زیادی بر دبی هوا و ضرایب انتقال حرارت دارد و بر این اساس پیشنهاداتی ارائه کرد. او به مطالعه‌ی پارامتری دیوار ترومب (دودکش) برای خنک‌کاری منفعل ساختمان پرداخت. فاصله‌ی بین دیوارهای دودکش بین 0.1 m تا 0.4 m تغییر می‌کرد و با استفاده از نتایج به دست آمده رابطه‌ی برای محاسبه‌ی میزان دبی هوا و میزان تأثیر ارتفاع دیوار ذخیره‌ساز حرارت در شرایط کاری مختلف به دست آمد. چن و لی^[۱۳] وجود یک نسبت فاصله‌ی هوایی مناسب به ارتفاع دودکش را نشان دادند و نتایج را با نسبتی که به طراحی ورودی هوا به دودکش وابسته بود، سنجیدند. آنها بیان کردند که می‌توان در بچه‌ی ورودی بزرگ را با نسبت فاصله‌ی هوایی به ارتفاع بزرگ، بهینه ساخت. بچارودیس و همکاران^[۱۴] به تشریح پدیده‌ی جابه‌جایی طبیعی بین یک دودکش خورشیدی با یک دیوار آدیاباتیک و یک دیوار با شار حرارتی ثابت پرداختند. مهم‌ترین مسئله‌ی مورد بررسی آنها کارایی مدل‌های توربولانسی برای جریان القا شده درون دودکش بر اثر پدیده‌ی شناوری بود. در بین مدل‌های به کار گرفته شده مدل $k - \epsilon$ بهترین عملکرد را برای جریان لایه‌های مرزی دارای گرادیان فشار مخالف، نشان داد.

به منظور برآورد تأثیر کانال هوا یک مدل عددی برای نشان دادن فرایند جابه‌جایی طبیعی توسط آب‌سبا و همکاران^[۱۵] برای دو هندسه‌ی متفاوت دودکش تشریح و نتایج آن به شکل پروفایل دما و سرعت ارائه شد. حقیقی و همکاران^[۱۶] پدیده‌ی تهویه‌ی خورشیدی و گرمایش فضای داخلی یک ساختمان در روزهای آفتابی فصل زمستان را با استفاده از دودکش خورشیدی بررسی کردند و نتایج کارشان را برای دماهای متفاوتی از هوای محیط خارجی ارائه دادند. از جمله نتایج کار آنها این بود که با افزایش فاصله‌ی دیوار خورشیدی از جدار شیشه‌ی دمای اتاق روند کاهشی کمی خواهد داشت. الکس و همکاران^[۱۷] به مطالعه‌ی پارامتری دودکش‌های خورشیدی در مناطق گرمسیری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مادامی که پهنای دودکش تغییری نکند سرعت و دمای هوای خروجی نیز تغییر نمی‌کند. آنها دریافتند که پهنای دودکش بیشترین تأثیر را در عملکرد دودکش دارد و نیز مکان ورود هوا به ساختمان تأثیر چندانی در سرعت جریان و دمای هوای خروجی ندارد اگرچه این مکان هرچه بیشتر به سمت دودکش باشد سرعت هوا افزایش می‌یابد.

در تمامی طرح‌های ارائه شده برای دودکش‌های خورشیدی، دیوار جاذب یکی از دیواره‌های کنار دودکش و فاصله‌ی بین دهانه‌ی دودکش به‌صورت بهینه برابر 0.2 m یا 0.3 m در نظر گرفته شده است. چون دیوار جاذب در معرض اختلاف دمای زیاد قرار دارد، مقدار زیادی حرارت از خود عبور می‌دهد؛ لذا در این مطالعه پژوهشگر قصد دارد تا با قرار دادن دیوار جاذب در میان دودکش و رعایت فاصله‌ی آن با دیواره‌های کنار به میزان بهینه‌ی معرفی شده در مطالعات پیشین، جریان درون دودکش خورشیدی را بررسی کند و آن را بهبود بخشد. همچنین با تمهیداتی بر روی دیوار جاذب که تا به حال بررسی نشده، از جمله المان‌بندی آن، عملکرد دودکش خورشیدی را بهبود بخشد.

۲. هندسه‌ی مسئله

یکی از راه‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور کاهش انرژی مصرفی در ساختمان‌ها استفاده از دودکش‌های خورشیدی با هدف ایجاد گردش هوای تهویه و نیز گرمایش ساختمان است. دودکش‌های خورشیدی بر اثر تابش نور خورشید روی دیوار جاذب و خاصیت ترموسیفون کار می‌کنند و عوامل متعددی می‌تواند بر عملکرد

جدول ۱. خواص.

شیشه	آلومینیوم	هوا	خاصیت
۲۲۰۳	۲۷۰۲	۱٫۱۸۴۱۵	چگالی (Kg/m^3)
۸۴۰	۹۰۳	۱۰۰۳٫۶۲	گرمای ویژه ($J/kg.K$)
۱٫۰۵	۲۷	۰٫۰۲۶۰۳۰۵	رسانایی گرمایی ($W/m.K$)
-	-	۰٫۱۰۰۰۰۱۸۵۵۰۸	گرانروی (ویسکوزیته دینامیکی ($kg/m.s$))
-	-	۰٫۰۰۳۳	ضریب انبساط حرارتی ($1/K$)

جدول ۲. ضرایب ثابت جذب و پخش.

شیشه	دیواره‌ی جذب	ضریب جذب (α)	ضریب پخش (ϵ)
۰٫۰۶	۰٫۹۵		
۰٫۰۹	۰٫۹۵		

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}((\mu + \mu_t)\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}((\mu + \mu_t)\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}) - \frac{\gamma}{\beta}\rho\frac{\partial k}{\partial x} \quad (2)$$

مومتوم y :

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}((\mu + \mu_t)\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}((\mu + \mu_t)\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}) - \frac{\gamma}{\beta}\rho\frac{\partial k}{\partial y} + (\rho - \rho_0)g \quad (3)$$

انرژی:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}T_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}T_f)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}((\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{pr_t})\frac{\partial T_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}((\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{pr_t})\frac{\partial T_f}{\partial y}) \quad (4)$$

ویسکوزیته‌ی دینامیکی توربولانس: [۱۹]

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \frac{\rho k^\dagger}{e} \\ f_\mu = 1 - \exp(-a_1 Re_y - a_2 Re_y^\dagger - a_3 Re_y^{\dagger 2}) \\ a_1 = 1.75 \times 10^{-4}, a_2 = 5 \times 10^{-5}, a_3 = 1.75 \times 10^{-10}, \\ Re_y = k^{\dagger 2} y^\dagger / \nu \quad (5)$$

انرژی جنبشی توربولانس: [۱۹]

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}((\mu + \mu_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}((\mu + \mu_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial y}) + P_k + G_b - \rho e - \gamma v \frac{\partial k^{\dagger 2}}{\partial y} \quad (6)$$

نخ اضمحلال انرژی جنبشی توربولانس: [۱۹]

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}e)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}e)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}((\mu + \mu_t/\sigma_e)\frac{\partial e}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}((\mu + \mu_t/\sigma_e)\frac{\partial e}{\partial y}) + c_{1e} f_1 (P_k + c_{te} G_b) - c_{te} f_2 \rho e \frac{e^\dagger}{k} + \gamma \mu_t (\frac{\partial^\dagger u}{\partial y^\dagger})^\dagger \quad (7)$$

تولید برشی و تولید اضمحلال انرژی جنبشی توربولانس بویانسی:

$$P_k = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\gamma}{\beta} \rho k \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ G_b = \rho g_i \frac{\mu_t}{pr_t} \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \quad (8)$$

ثابت‌های مورد استفاده: [۲۰]

$$C_{1e} = 1.44, C_{te} = 1.92, C_{re} = 1.0, C_\mu = 0.09 \\ f_1 = 1.0, f_2 = 1.0, \sigma_k = 1.0, \sigma_e = 1.3 \quad (9)$$

شرایط مرزی برای این مسئله به این شرح است: دمای هوای ورودی به دودکش برابر $20^\circ C$ و فشار نسبی در ورودی برابر صفر پاسکال در نظر گرفته شده و تمامی دیوارها به غیر از دیوار جذب، آدیاباتیکی فرض شده است. سیال مورد استفاده‌ی هوا دارای خواصی مطابق با جدول ۱ است. انتقال حرارت هدایتی در دیواره‌ی جذب میانی در نظر گرفته شده است. همچنین سایر خواص در جدول ۲ آورده شده است. بالانس انرژی روی شیشه برای به دست آوردن T_g : [۲۱]

$$S_g A_g + hr_{abs-g} A_{abs} (T_{abs} - T_g) = h_{g-fsc} A_g (T_g - T_{fsc}) + U_{g-a} A_g (T_g - T_a) \quad (10)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت بین شیشه و هوا: [۲۱]

$$U_{g-a} = h_{wind} + hr_{g-sky} \quad (11)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی توسط باد: [۲۲]

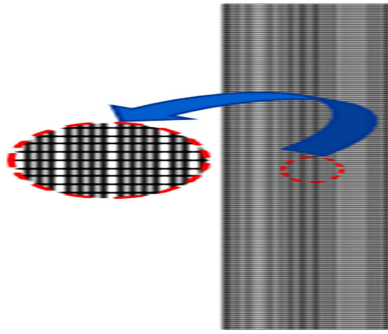
$$h_{wind} = 2.78 + 3.7 u_{wind} \quad (12)$$

محاسبه‌ی شار حرارتی جذب شده از خورشید توسط شیشه:

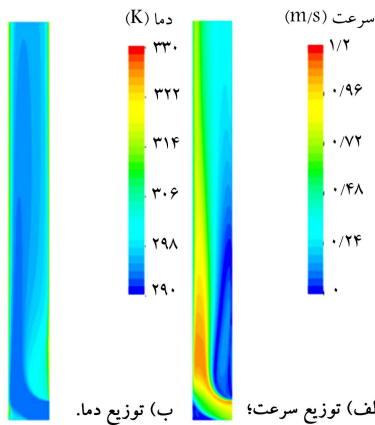
$$S_g = \alpha_g I \quad (13)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین شیشه و آسمان:

$$hr_{g-sky} = \frac{\sigma_r \epsilon_g (T_g + T_{sky})(T_g^\dagger + T_{sky}^\dagger)(T_g - T_{sky})}{(T_g - T_a)} \\ T_{sky} = 0.552 T_a^{1.5} \quad (14)$$



شکل ۲. شبکه‌ی ایجاد شده برای حل عددی.



شکل ۳. نتایج حل عددی جریان در دیوار ترومب، مورد استفاده برای اعتبارسنجی [۲۶، ۲۵] نتایج حل عددی.

۵. صحت‌سنجی حل عددی

به منظور صحت‌سنجی دبی هوای راه‌یافته درون دودکش خورشیدی، جریان درون یک دودکش خورشیدی دوبعدی با ارتفاع ۲ متر، پهنای (فاصله‌ی دو دیوار ۰/۲ متر، عرض دهانه‌ی ورودی ۰/۱ متر و با دمای دیواره ثابت به صورت عددی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳). سپس دبی جرمی هوا درون دودکش با دبی جرمی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی توسط بوچیر و همکاران [۲۵] و دبی پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی عددی توسط گان و همکاران [۲۴] مقایسه شده است. نتایج حاصل برای میزان جریان جرمی راه‌یافته درون دودکش با میزان حداکثر ۷ درصد اختلاف با دیگران گویای قابل اطمینان بودن نتایج است.

۶. بررسی نتایج

هدف از اجرای سیستم تهویه مطبوع غیرفعال برقراری جریان درون ساختمان و ایجاد شرایط مطلوب سکونتی برای ساکنان یک ساختمان در حین به‌کار بردن کمترین انرژی مصرفی است. پارامترهای مختلفی در عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع خورشیدی اثرگذار است. برای عملکرد هرچه بهتر این سیستم‌ها باید تا حد ممکن میزان گردش هوای درون ساختمان را بالا برد. براین اساس دودکش خورشیدی با بالاترین گردش هوا و کمترین فضای اشغال شده، با استفاده از میزان تابش متوسط خورشید مطلوب‌ترین سیستم تهویه منفعل خورشیدی خواهد بود. منبع انرژی خورشیدی تقریباً همیشه و همه‌جا در دسترس است، بنابراین هرچه بتوان با صرف هزینه‌ی کمتر امکاناتی را

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت بین شیشه و دیواره‌ی جاذب:

$$hr_{abs-g} = \frac{\sigma_r(T_g^4 + T_{abs}^4)(T_g + T_{abs})}{(\sqrt{\varepsilon_g} + \sqrt{\varepsilon_{abs}} - 1)} \quad (15)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت بین شیشه و هوای دودکش:

$$h_{g-fsc}(T_g - T_{fsc}) = -\lambda_{fsc} \frac{\partial T_{fsc}}{\partial x} \Big|_{x=-(t/2+d)} \quad (16)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت بین دیوار جاذب و هوای داخل دودکش:

$$h_{abs}(T_{fsc} - T_{abs}) = -\lambda_{fsc} \frac{\partial T_{fsc}}{\partial x} \Big|_{x=-t/2} \quad (17)$$

بالانس انرژی برای به دست آوردن دمای دیواره جاذب T_{abs} :

$$S_{abs} A_{abs} = h_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{fsc}) + hr_{abs-g} A_{abs} (T_{abs} - T_g) + U_{abs-r} A_{abs} (T_{abs} - T_{fr}) \quad (18)$$

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت پشت دیواره جاذب و هوای دودکش:

$$U_{abs-r} = \frac{1}{(1/h_r + t/\lambda_{abs})} \quad (19)$$

در معادله‌ی ۱۹ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی پشت دیواره‌ی جاذب با هوای مجاور است.

بالانس انرژی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت پشت دیواره‌ی جاذب با هوای دودکش:

$$U_{abs-r} A_{abs} (T_{abs} - T_{fr}) = -\lambda_{fr} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=t/2} \quad (20)$$

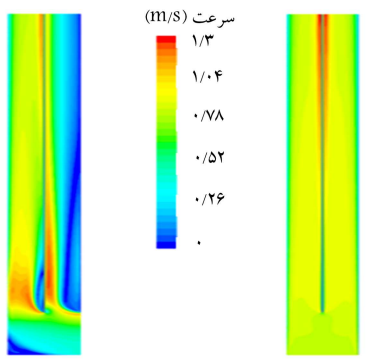
شار حرارتی جذب شده توسط دیوار جاذب:

$$S_{abs} = \alpha_{abs} I \quad (21)$$

۴. معرفی روش عددی

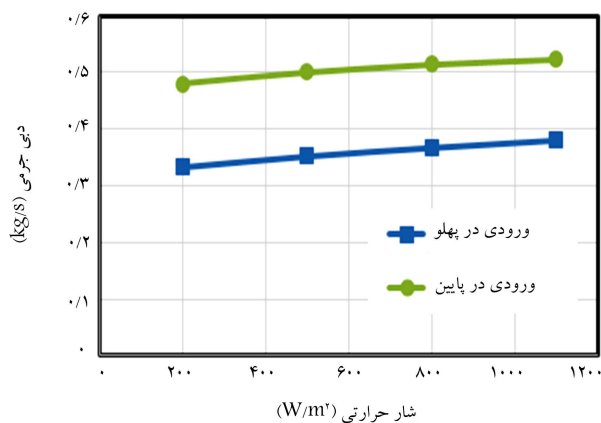
به‌منظور شبیه‌سازی میدان جریان، معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی به‌صورت دوبعدی و با فرض دائم، تراکم ناپذیر و مغشوش بودن جریان به‌صورت هم‌زمان حل شده است. برای حل معادلات از یک کد دانشگاهی براساس زبان فورترن و الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. با توجه به مغشوش بودن جریان هوا درون میدان حل، از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ به دلیل کارایی خوب این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های لایه‌ی مرزی با گرادیان‌های فشار معکوس بالا، استفاده شده است. [۲۳، ۲۴] برای اثبات حرکت ارادی هوا در داخل دودکش خورشیدی بر اثر عملکرد دیوار ترومب، میدان جریان به‌طور کامل حل شده است. در این حالت مشاهده می‌شود که دبی حجمی قابل توجهی از هوا از طریق دهانه ورودی داخل شده و از طریق دهانه‌ی خروجی دیوار ترومب خارج می‌شود.

به‌منظور حل عددی جریان با استفاده از مطالعه‌ی شبکه، استقلال حل از شبکه انجام گرفت و شبکه با اجزای مربعی و با تعداد 350×350 جزء انتخاب شده است (شکل ۲).



الف) ورودی در پایین؛ ب) ورودی در دیوار جانبی در
 $I=500 \text{ W/m}^2, t=0.1 \text{ m}, L=3.7 \text{ m}$

شکل ۵. مقایسه‌ی سرعت در داخل دودکش خورشیدی برای دو حالت.

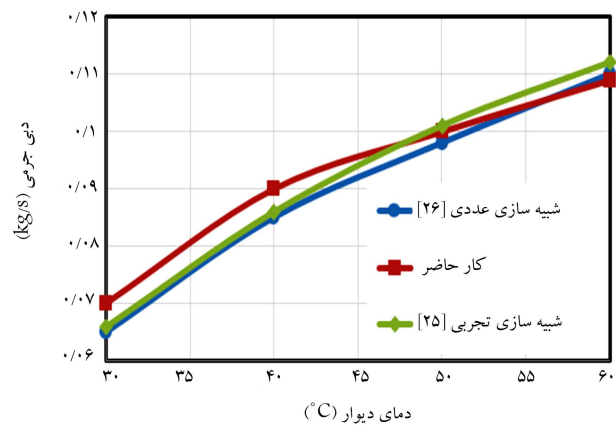


شکل ۶. مقایسه‌ی دبی جرمی هوای عبوری از دودکش خورشیدی برای دو حالت ورودی در دیوار جانبی (پهلوی) و ورودی در کف در $I = 500 \text{ W/m}^2, t = 0.1 \text{ m}, L = 3.7 \text{ m}$.

شبه‌سازی شده و نتایج آن شامل کانتور سرعت برای شار حرارتی 500° وات بر متر مربع در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان متوسط سرعت در دو طرف دیوار جاذب در حالت ورودی از کف بیشتر است. برای بررسی میزان کارایی هر کدام، دبی جرمی تولید شده توسط دودکش به صورت نمودار در شکل ۶ با هم مقایسه شده است. مطابق انتظار، با افزایش شار حرارتی بر روی دیوار جاذب، میزان دبی جرمی جریان سیال ایجاد شده درون دودکش نیز بیشتر خواهد بود؛ همچنین در حالتی که ورودی جریان به دودکش در قسمت کف قرار دارد، این میزان به طور متوسط 0.15 kg/s بیشتر از حالتی است که محل ورودی جریان به دودکش در دیوار جانبی قرار دارد.

۲.۶. مقایسه‌ی ضخامت دیوار جاذب فلزی

دودکش‌های خورشیدی، چنان‌که از نامشان نیز مشخص است، با تابش نور خورشید کار می‌کنند. برای این‌که بتوان دودکشی با پهنای زیاد را به دو دودکش با پهنای کمتر و عملکرد بهتر تبدیل کرد، باید سازوکاری را فراهم کنیم تا به وسیله‌ی آن بتوان شار حرارتی تابانده شده از خورشید به دودکش را میان هر دو قسمت تقسیم کرد؛ ضمن این‌که در میزان انرژی جذب شده از خورشید نیز نباید تغییری ایجاد شود. با قرار دادن یک دیوار جاذب در میان دودکش، دیگر تابش خورشید برای قسمت پشت آن وجود نخواهد داشت و بنابراین باید انرژی خود را از همین دیوار دریافت کند. برای دریافت



شکل ۴. مقایسه‌ی و صحت‌سنجی دبی جرمی ایجاد شده در دودکش مورد مطالعه با ارتفاع ۲ متر، پهنای 0.2° متر و دهانه‌ی ورودی 0.1° متر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی [۲۶] و تجربی [۲۵].

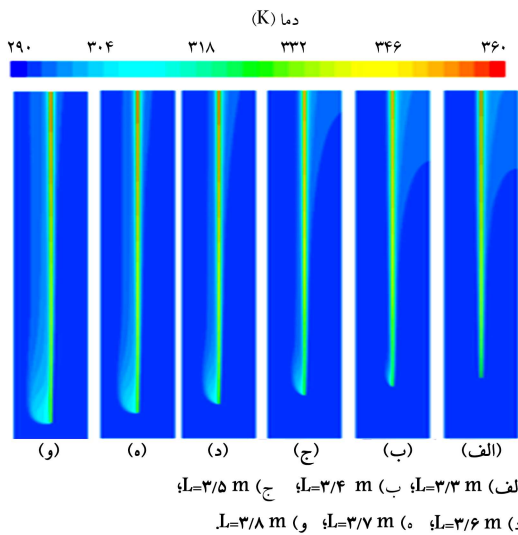
برای استفاده‌ی بهینه از آن فراهم کرد، آن سیستم مورد اقبال بیشتری واقع خواهد شد و در نهایت استفاده از منابع دیگر انرژی کاهش خواهد یافت. چنان‌که پیش‌تر نیز گفته شد دودکش خورشیدی بر اساس پدیده‌ی ترموسیفون و نیروی شناوری ایجاد شده در سیال هوا بر اثر گرم شدن سیال مذکور کار می‌کند. سیال هوا در داخل دودکش با قرار گرفتن در معرض دیوار با دمای بالاتر گرم‌تر و سبک‌تر شده و شروع به حرکت به سمت بالا می‌کند و با تداوم این عمل پدیده‌ی ترموسیفون در داخل دودکش باعث به وجود آمدن جریان پایدار هوا خواهد شد. پارامترهای زیادی بر عملکرد دودکش خورشیدی اثرگذار است که از آن جمله می‌توان به پهنای دودکش، ارتفاع دودکش، شکل و ابعاد دهانه‌ی ورودی، میزان تابش خورشید اشاره کرد.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی گفته شد، هدف این مطالعه بررسی اثر قرار دادن دیوار جاذب فلزی در میان دودکش خورشیدی است. به این منظور با قرار دادن یک دیوار جاذب فلزی دارای طول، ضخامت و نیز محل قرارگیری مختلف درون یک دودکش خورشیدی با ارتفاع 4° متر و پهنای 0.5° متر، اثر پارامترهایی همچون میزان شار حرارتی ورودی به دیواره، پهنای دودکش، ضخامت دیوار جاذب، طول دیوار جاذب و فاصله‌ی محل قرارگیری دیوار جاذب تا دیواره‌های جانبی دودکش مورد بررسی قرار گرفته و نرخ جریان هوای تولید شده توسط دودکش در حالت‌های مختلف مقایسه شده است. همچنین به عنوان یک نوآوری جدید المان‌بندی دودکش برای دست‌یابی به بیشینه دبی جریان بررسی شده است.

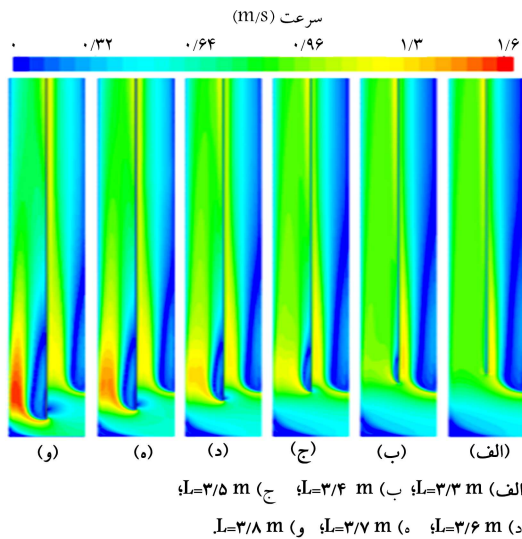
۱.۶. اثر محل قرارگیری ورودی جریان به دودکش

یکی از پارامترهایی که تا حد زیادی بر عملکرد دودکش خورشیدی اثرگذار است ابعاد و محل ورودی دودکش است. بسته به این‌که بتوان دودکش را طوری نصب کرد که محل ورود جریان به آن از سمت دیوار جانبی یا از پایین آن باشد، دودکش خورشیدی عملکرد متفاوتی خواهد داشت. برای بررسی این موضوع میزان پهنای دودکش به صورت ثابت و برابر 0.5 m فرض شده و به طور کلی دو محل برای قرارگیری ورودی دودکش در نظر گرفته شده است: ورودی از پایین‌ترین قسمت دیوار جانبی و ورودی از پایین دودکش.

برای بررسی اثر محل قرارگیری ورودی جریان به دودکش خورشیدی ارتفاع و ضخامت دیوار جاذب به ترتیب برابر 3.7 m و 0.1 m در نظر گرفته شده و با قرار دادن مقادیر شار حرارتی مختلف روی دیوار جاذب، جریان درون دودکش

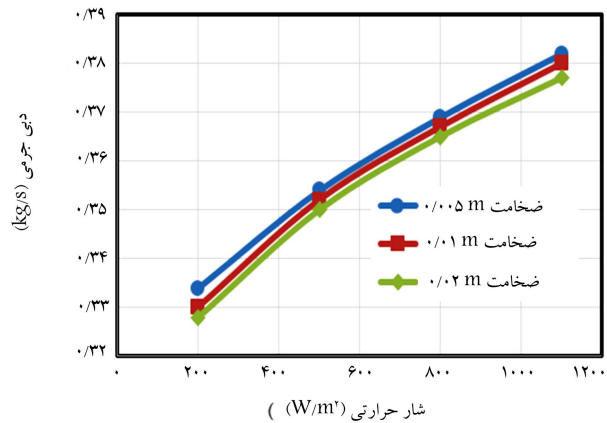


شکل ۸. توزیع دما در داخل دودکش برای دیوار جاذب فلزی با طول‌های مختلف در $T = 50^\circ\text{C}$, $t = 0^\circ\text{C}$



شکل ۹. مقایسه توزیع سرعت در داخل دودکش برای دیوار جاذب فلزی با طول‌های مختلف در $T = 50^\circ\text{C}$, $t = 0^\circ\text{C}$

افزایش طول دیوار جاذب می‌توان از شدت جریان‌های گردابی در لبه پایین آن کاست و به بهبود عملکرد دودکش کمک کرد. در این جا با تغییر طول دیوار جاذب فلزی و تغییر موقعیت لبه‌ی پایین آن نسبت به دهانه ورودی جریان درون دودکش و با قرار دادن مقادیر مختلف شار حرارتی روی دیوار جاذب، جریان درون دودکش خورشیدی شبیه‌سازی شده است. در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان به ترتیب توزیع دما و سرعت درون دودکش خورشیدی به همراه دیوار جاذب فلزی با طول‌های مختلف را برای شار حرارتی 50°C وات بر متر مربع مشاهده کرد. چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقدار متوسط دما در اطراف دیوار جاذب و به‌خصوص در نزدیکی لبه‌ی پایین دیوار جاذب، با افزایش طول آن و قرار گرفتن در مقابل دهانه‌ی ورودی (شکل ۸، $L = 3/7\text{ m}$)، بیشتر می‌شود. همچنین در شکل ۹ نیز می‌توان دید که با افزایش طول دیوار جاذب مقدار بیشینه و مقدار متوسط سرعت، افزایش می‌یابد. اما این روند فقط تا همین طول برای دیوار جاذب ادامه دارد و از این مقدار به بعد میزان دبی درون دودکش کاهش می‌یابد. برای مقایسه‌ی بهتر میزان دبی جرمی هوای راه یافته به درون دودکش، تغییرات برای



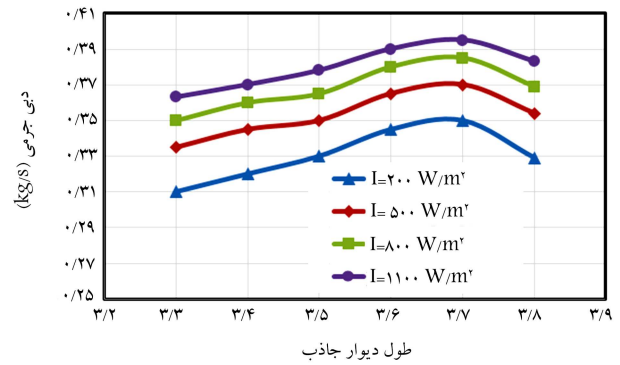
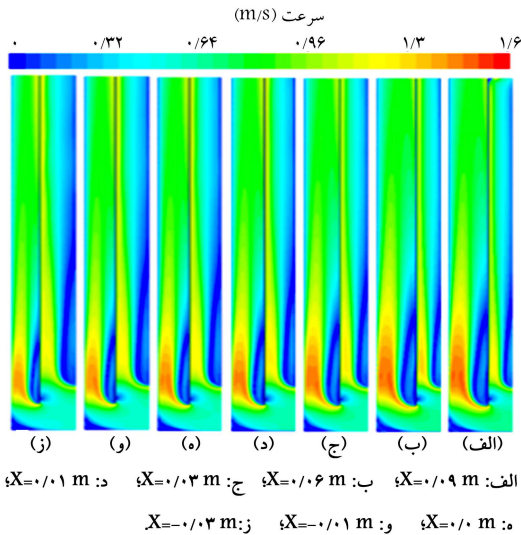
شکل ۷. مقایسه‌ی دبی جرمی هوا درون دودکش برای سه ضخامت مختلف دیوار جاذب فلزی در $L = 3/5\text{ m}$

بیشینه انرژی تابشی خورشید و جلوگیری از بازتاب آن لازم است سطح دیوار جاذب که رو به تابش خورشید است تا حد ممکن تیره و کدر شود. برای این که مقداری از انرژی گرمایی دریافت شده توسط دیوار جاذب به قسمت پشتی آن انتقال یابد، نیز لازم است تا این دیوار دارای هدایت حرارتی کافی باشد. با توجه به خاصیت انتقال حرارت و هدایت بالای فلز آلومینیوم و در دسترس بودن آن، این فلز برای قرار گرفتن در قسمت میانی دودکش به منظور دیوار جاذب انتخاب شده است. همچنین برای بیشینه‌سازی میزان انرژی جذب شده توسط آن، این دیوار باید با رنگ سیاه و کدر پوشانده شود.

اکنون با فرض این که دیوار جاذب فلزی با شرایط یاد شده در بالا فراهم شده و در قسمت میانی دودکش قرار گرفته، باید دید که ضخامت دیوار مذکور تا چه حد می‌تواند بر عملکرد کلی دودکش اثرگذار باشد. به این منظور سه ضخامت 0.005 m ، 0.01 m و 0.02 m برای دیوار جاذب با جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده و با قرار دادن آن‌ها در میان دودکش و اعمال شرایط مرزی مشابه برای هر سه ضخامت مذکور، عملکرد دودکش خورشیدی در هر سه حالت مقایسه شده است. هرچه ضخامت دیوار جاذب کمتر باشد، حرارت به قسمت پشتی راحت‌تر منتقل می‌شود و متوسط دما در این قسمت تا حدی نسبت به حالت‌های دیگر افزایش می‌یابد. برای مقایسه‌ی بهتر، مقادیر دبی جرمی هوای عبوری از دودکش (نمودار شکل ۷) با مقادیر شار حرارتی مختلف مقایسه شده است. یکی از معایب سیستم‌های انرژی غیرفعال هزینه‌ی فراهم‌سازی اولیه‌ی آنهاست. چنان‌که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با کاهش ضخامت دیواره، میزان دبی جرمی نه تنها کاهش نیافته بلکه مقداری نیز افزایش یافته است؛ از آن جا که فلزات با هدایت گرمایی بالا همیشه قیمت بالایی دارند، کاهش ضخامت مورد نیاز دیوار جاذب در دودکش خورشیدی به کاهش هزینه‌ی لازم برای ساخت دودکش منجر خواهد شد و در نتیجه از نظر اقتصادی نیز تهیه‌ی این سیستم مقرون به صرفه خواهد بود.

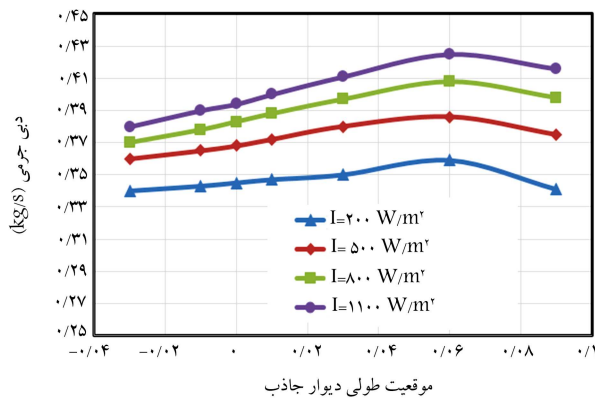
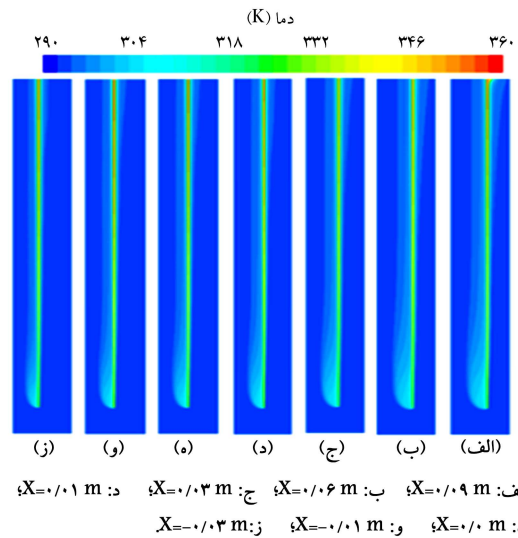
۳.۶. مقایسه‌ی طول دیوار جاذب

یکی از پارامترهایی که می‌تواند بر عملکرد دودکش خورشیدی با دیوار جاذب فلزی در قسمت میانی تأثیرگذار باشد، طول دیوار جاذب و موقعیت آن نسبت به دهانه ورودی است. هرچه طول دیوار جاذب کمتر باشد فاصله‌ی لبه‌ی پایین آن از محل ورودی نیز بیشتر خواهد بود. با دور شدن لبه‌ی پایینی دیوار جاذب فلزی از دهانه‌ی ورودی، جریان‌های گردابی ثانویه در اطراف این لبه نیز بیشتر شده و در نهایت باعث کاهش عملکرد دودکش خورشیدی به همراه دیوار جاذب میانی می‌شود. از سوی دیگر با



شکل ۱۰. مقایسه‌ی دبی جرمی هوا درون دودکش خورشیدی برای طول‌های مختلف دیوار جاذب در $I = 500 \text{ W/m}^2$, $t = 0/0.1 \text{ m}$.

شکل ۱۲. توزیع سرعت در داخل دودکش برای محل‌های مختلف قرارگیری جاذب فلزی در راستای عرضی در $I = 500 \text{ W/m}^2$, $t = 0/0.1 \text{ m}$, $L = 3/7 \text{ m}$.



شکل ۱۱. توزیع دما در داخل دودکش برای محل‌های مختلف قرارگیری جاذب فلزی در راستای عرضی در $I = 500 \text{ W/m}^2$, $t = 0/0.1 \text{ m}$, $L = 3/7 \text{ m}$.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی دبی جرمی هوا درون دودکش خورشیدی برای مکان‌های مختلف دیوار جاذب در دودکش $I = 500 \text{ W/m}^2$, $t = 0/0.1 \text{ m}$, $L = 3/7 \text{ m}$.

می‌یابد و به دنبال آن میزان دبی جرمی هوای عبوری از دودکش نیز افزایش خواهد یافت. این مطلب به وضوح در نمودار شکل ۱۳ برای شارهای حرارتی مختلف قابل مشاهده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود برای مقادیر شار حرارتی بالاتر میزان اختلاف دبی جرمی درون دودکش نیز افزایش یافته است. اما این روند فقط تا مکان $X = 0/0.6 \text{ m}$ برای دیوار جاذب ادامه داشته و از این نقطه به بعد دوباره میزان دبی جرمی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت بهترین مکان از میان مکان‌های بررسی شده مکان $X = 0/0.6 \text{ m}$ برای دیوار جاذب است.

طول‌های مختلف دیوار جاذب در نمودار شکل ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی مقادیر شار حرارتی با افزایش طول دیوار جاذب فلزی تا طول $3/7 \text{ m}$ مقدار دبی جرمی هوای درون دودکش نیز افزایش یافته است.

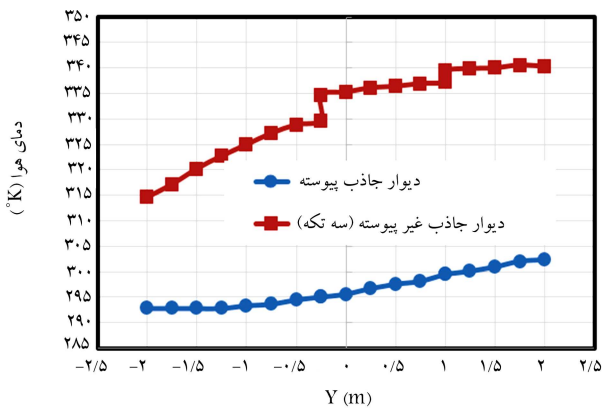
۴.۶. مقایسه‌ی محل قرارگیری دیوار جاذب در جهت عرضی

چنان‌که در قسمت‌های قبلی گفته شد فاصله‌ی دیواره‌های دودکش نقش مهمی در میزان دبی جرمی جریان راه یافته به آن دارد. در این جا نیز با قرار دادن دیوار جاذب فلزی می‌توان گفت که تقریباً دو دودکش با عملکرد ترموسیفون به وجود آمده که البته با توجه به شرایط مرزی آن‌ها، نمی‌توان عملکرد مشابه از آن‌ها انتظار داشت.

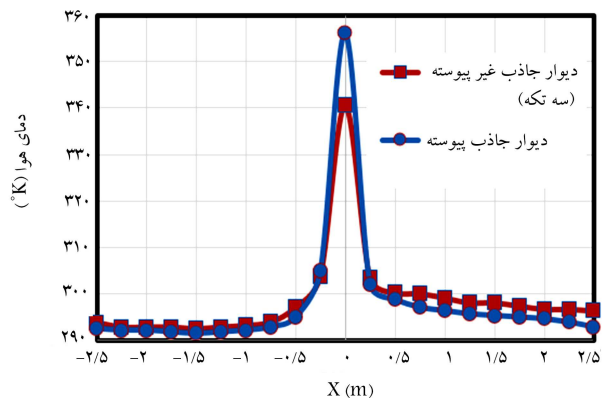
۵.۶. المان بندی دیوار جاذب

دیوار جاذب به دلیل تابش مستقیم نور خورشید دارای دمای نسبتاً بالایی است که با قرار گرفتن آن در معرض سیال باعث ایجاد جریان جابه‌جایی طبیعی می‌شود. بنابراین با حرکت سیال هوا از روی دیوار جاذب به مرور بر دمای سیال اطراف دیوار افزوده شده و از دمای دیوار کاسته می‌شود. در صورتی که این دیوار به صورت یکپارچه تا انتهای دودکش امتداد یابد به دلیل وجود گرادیان دما در انتهای آن و محیط بیرون، پدیده‌ی هدایت انتقال حرارت در آن به سمت بالا صورت گرفته و در نتیجه بخشی

تاکنون دیوار جاذب فلزی دقیقاً در قسمت میانی دودکش قرار داده شده بود که با توجه به تفاوت عملکردی دو دودکش در دو طرف دیوار جاذب، در این قسمت فاصله‌ی دیوار جاذب تا دیواره‌های دو طرف تغییر کرده و نتایج آن را برای شار حرارتی 500 W/m^2 در بر متر مربع به صورت کانتور دما در شکل ۱۱ و کانتور سرعت در شکل ۱۲ با یکدیگر مقایسه شده است. چنان‌که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با نزدیک‌تر شدن دیوار جاذب فلزی به سمت دیوار سمت چپ (دیوار شیشه‌یی) میزان متوسط دما و سرعت در دودکش سمت چپ کاهش یافته و با نزدیک شدن این دیوار به دیوار سمت راست دودکش میزان متوسط دما و سرعت در دودکش سمت چپ افزایش



شکل ۱۶. مقایسه‌ی توزیع دمای هوا در نزدیک دیوار جاذب ($X = 0.3m$) برای دو حالت دیوار یکپارچه و سه تکه $L = 3.7m, t = 0.1m, I = 500 W/m^2$.

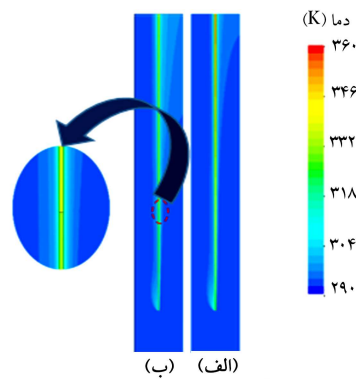


شکل ۱۷. مقایسه‌ی توزیع دما در نزدیک دهانه‌ی خروجی ($Y = 1.98m$) برای دو حالت دیوار جاذب یکپارچه و سه تکه $L = 3.7m, t = 0.1m, I = 500 W/m^2$.

یافته است. در شکل ۱۷ نیز می‌توان مشاهده کرد که در حالتی که دیواره به سه قسمت تقسیم شده میزان دما در داخل دیواره در نزدیکی دهانه‌ی خروجی دودکش کمتر از حالتی است که دیواره به صورت یکپارچه است و در عوض متوسط دمای هوا در نقاط دور از دیواره در این حالت افزایش یافته است. برای مقایسه‌ی عملکرد دودکش مقدار دبی هوای خروجی از دودکش برای دو حالت دیوار جاذب یکپارچه و دیوار جاذب چندتکه در نمودار شکل ۱۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار دبی هوای خروجی از دودکش در اثر المان‌بندی دیوار جاذب به قطعات کوتاه‌تر به شکل چشم‌گیری افزایش یافته است. می‌توان با تقسیم‌بندی دیوار جاذب به قطعات بیشتر نحوه‌ی عملکرد دودکش خورشیدی را ملاحظه کرد که به‌عنوان تحقیق بیشتر به خوانندگان واگذار می‌شود.

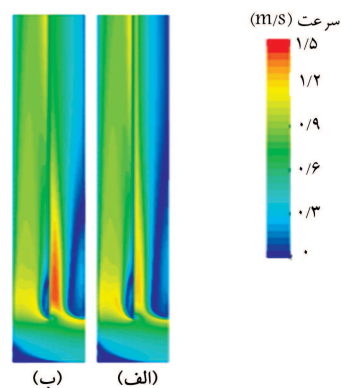
۶.۶. انتخاب دودکش با بهترین عملکرد

تاکنون اثر پارامترهای مختلف از قبیل محل ورود جریان به دودکش، فاصله‌ی دیواره‌های دودکش، ضخامت دیوار جاذب، طول دیوار جاذب و موقعیت آن نسبت به دهانه ورودی و همچنین فاصله‌ی دیوار جاذب از دیواره‌های جانبی دودکش مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده تاکنون، می‌توان دودکش با دیوار جاذب با جنس آلومینیوم و ضخامت $5m$ و طول $3.7m$ و نزدیک به دیوار سمت راست یعنی $X = 0.6m$ و به صورت غیریکپارچه (به‌عنوان مثال



شکل ۱۴. مقایسه‌ی توزیع دما در داخل دودکش برای دو حالت. الف) دودکش یکپارچه؛ ب) دودکش سه تکه $L = 3.7m, t = 0.1m, I = 500 W/m^2$.

شکل ۱۴. مقایسه‌ی توزیع دما در داخل دودکش برای دو حالت.



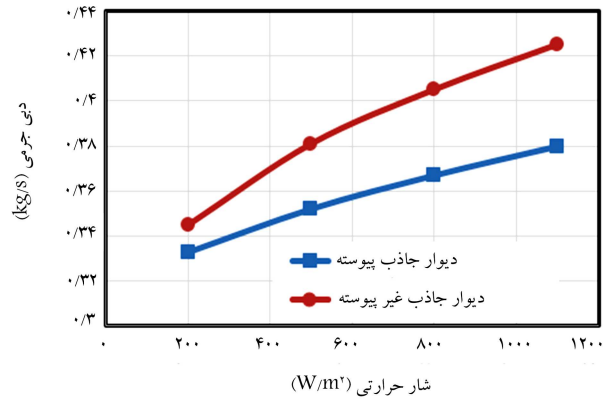
شکل ۱۵. مقایسه‌ی توزیع سرعت در داخل دودکش برای دو حالت. الف) دودکش یکپارچه؛ ب) سه تکه $L = 3.7m, t = 0.1m, I = 500 W/m^2$.

شکل ۱۵. مقایسه‌ی توزیع سرعت در داخل دودکش برای دو حالت.

از انرژی حرارتی درون دیوار که باید صرف گرم کردن سیال هوا و کمک به پدیده‌ی ترموسیوفون داخل دودکش شود، هدر می‌رود.

می‌توان با کمک تقسیم‌بندی دیوار جاذب به طول‌های کوچک‌تر و ایجاد اتصال بین قطعات با میزان مقاومت حرارتی بالا از انتقال حرارت هدایتی درون دیوار جاذب جلوگیری کرده و به انتقال حرارت جابه‌جایی بهتر بین دیوار جاذب و سیال هوا کمک کرد. در این جا نشان داده شده که با تقسیم دیوار جاذب به سه طول با مقاومت محل اتصال بالا در نهایت عملکرد دودکش خورشیدی بهتر و میزان هوای جابه‌جا شده بیشتر شده است. برای میزان شار حرارتی $500 W/m^2$ وات بر متر مربع روی دیوار جاذب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مقایسه‌ی توزیع دما و سرعت درون دودکش با دیوار جاذب سه تکه با مقاومت محل اتصال بالا و دیوار جاذب یکپارچه، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود المان‌بندی دیوار جاذب به قطعات با طول‌های کم‌تر باعث افزایش انتقال حرارت به سیال هوا درون دودکش شده و متوسط دمای هوا و به دنبال آن میزان متوسط سرعت افزایش یافته است. همچنین برای صفحه‌ی $X = 0.3m$ در نزدیک دیوار جاذب و صفحه‌ی $Y = 1.98m$ در نزدیک دیوار جاذب خروجی دودکش مقادیر دما به صورت نمودار برای دو حالت دیوار جاذب یکپارچه و دیوار جاذب چندتکه، به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ ترسیم شده است. چنان‌که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود با تقسیم دیوار جاذب به سه تکه‌ی مجزا و دارای مقاومت محل اتصال بالا، مقدار دمای هوا در نزدیکی دیواره به شدت افزایش

- g : شتاب گرانش (m/s^2)؛
 e : اضمحلال ویسکوز (m^2/s^2)؛
 h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2 K$)؛
 hr : ضریب انتقال حرارت تشعشعی ($W/m^2 K$)؛
 I : تشعشع خورشیدی کلی وارد به سطح (W/m^2)؛
 k : انرژي جنبشی توربولانس (m^2/m^2)؛
 L : طول دیوار جاذب (m)؛
 p : فشار نسبی (pa)؛
 s : انرژي خورشیدی جذب شده توسط صفحه‌ی جاذب (W/m^2)؛
 T_f : دمای هوای دودکش (K)؛
 t : ضخامت دیواره‌ی جاذب (m)؛
 \bar{u}, \bar{v} : متوسط زمانی مؤلفه‌های سرعت (m/s)؛
 U : ضریب انتقال حرارت کلی ($W/m^2 K$)؛
 x, y : سیستم مختصات (m).



شکل ۱۸. مقایسه‌ی دبی جرمی هوای جابه‌جا شده درون دودکش با دیوار جاذب یکپارچه و سه‌تکه $L = 3/7 m$, $t = 0/5 \lambda m$, $I = 500 W/m^2$. در این جا سه‌تکه بهتر است را دودکشی با بهترین عملکرد برای هر دو نوع «ورودی در دیوار جانبی» و «ورودی در پایین» دانست.

نمادهای یونانی

- α : ضریب جذب؛
 ϵ : ضریب پخش؛
 λ : ضریب هدایت حرارتی (W/mK)؛
 μ : ویسکوزیته‌ی آرام (kg/ms)؛
 μ_t : ویسکوزیته‌ی مغشوش (kg/ms)؛
 ν : ویسکوزیته‌ی سینماتیکی (m^2/s)؛
 ρ : چگالی (kg/m^3)؛
 σ_r : ثابت استفان بولتزمن ($W/m^2 K^4$) (5.67×10^{-8}) ؛
 σ_k : عدد پرانتل برای k ؛
 σ_e : عدد پرانتل برای e .

ترم‌های بدون بعد

- Pr : عدد پرانتل ($C_f \mu_f / K_f$)؛
 Pr_v : عدد پرانتل مغشوش؛
 Re_y : عدد رینولدز مغشوش نزدیک دیواره (k^{+}/v)؛

زیروندها

- a : هوای اطراف؛
 abs : دیواره‌ی جاذب؛
 fr : جریان هوای پشت دیواره‌ی جاذب؛
 fsc : جریان هوای جلوی دیواره‌ی جاذب؛
 g : شیشه؛
 i, j : زیروند؛
 r : دودکش؛
 sw : دیوار خورشیدی.

۷. نتیجه‌گیری

- در این مطالعه برای جلوگیری از اتلاف حرارت از دیواره‌های دودکش خورشیدی با قرار دادن دیوار جاذب فلزی میان دودکش خورشیدی و قرار دادن مقادیر شار حرارتی مختلف و تغییر پارامترهای هندسی در داخل دودکش خورشیدی جریان درون دودکش مذکور به صورت عددی شبیه‌سازی شد و نتایج زیر به دست آمد:
۱. مطالعه‌ی محل ورود جریان به داخل دودکش نشان داد که با قرار گرفتن محل ورود جریان هوا در قسمت پایین دودکش، میزان دبی هوای جابه‌جا شده در دودکش را افزایش خواهد یافت.
 ۲. مطالعه‌ی اثر ضخامت دیوار جاذب نشان داد که با کاهش ضخامت دیوار جاذب می‌توان از هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت دودکش خورشیدی کاست و به بهبود عملکرد آن نیز کمک کرد.
 ۳. مطالعه‌ی اثر طول دیوار جاذب و قرارگیری آن نسبت به دهانه‌ی ورودی نشان داد که با افزایش طول دیوار مذکور می‌توان به بهبود عملکرد دودکش کمک کرد.
 ۴. هرچه دیوار جاذب به سمت دیواره‌ی جانبی که ورودی جریان در قسمت انتهایی آن قرار دارد نزدیک شود، باعث بهبود عملکرد دودکش خواهد شد.
 ۵. تقسیم‌بندی دیوار جاذب به قطعات با طول‌های کمتر باعث جلوگیری از انتقال حرارت هدایتی از درون دیواره شده و در نهایت می‌توان با این کار به بهبود عملکرد دودکش کمک کرد.
 ۶. در پایان بر اساس نتایج به دست آمده دودکش با ابعاد بهینه انتخاب شد.

فهرست علائم

- C_p : گرمای ویژه ($J/kg K$)؛
 C_e, C_μ : ثابت‌های تجربی در مدل $k - e$ ؛
 D : عرض دودکش خورشیدی (m)؛

پانوش

1. energy performance of building directive

(References) منابع

1. Deng, S., Wang, R.Z. and Dai, Y.J. "How to evaluate performance of net zero energy building-a literature research", *A Literature Research Energy*, **71**, pp.1-16 (2014).
2. Salata, F., de Lieto Vollaro, A. and de Lieto Vollaro, R. "A case study of technical and economic comparison among energy production systems in a complex of historic buildings in rome", *Energy Procedia*, **45**, pp. 482-491 (2014).
3. Peruzzi, L., Salata, F., de Lieto Vollaro, A. and et al. "The reliability of technological systems with high energy efficiency in residential buildings", *Energy Build*, **68**, pp.19-24 (2014).
4. Daghigh, R. "Assessing the thermal comfort and ventilation in Malaysia and the surrounding regions", *Renew. Sustain. Energy Rev*, **48**, pp. 681-691 (2015).
5. Chenari, B., Carrilho, J.D. and da Silva, M.G. "Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: a review", *Renew. Sustain. Energy Rev*, **59**, pp. 1426-1447 (2016).
6. Akbarzadeh, A., Charters, W.W.S. and Lesslie, D.A. "Thermocirculation characteristics of a trombe wall passive test cell", *Sol. Energy*, **28**(6), pp.461-468 (1982).
7. Ong, K.S. "A mathematical model of a solar chimney", *Renew. Energy*, **28**(7), pp. 1047-1060 (2003).
8. Ong, K.S. and Chow, C.C. "Performance of a solar chimney", *Sol. Energy*, **74**(1), pp. 1-17 (2003).
9. Bassiouny, R. and Koura, N.S.A. "An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation", *Energy Build*, **40**(5), pp. 865-873 (2008).
10. Kim, S. and Seo, J. "An influence of the opening location of the trombe wall system on indoor airflow and thermal environment", *Natl. Res. Found. Korea, Gwangju*, pp. 501-759 (2012).
11. Miyazaki, T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T. "The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the japanese climate", *Renew. Energy*, **31**(7), pp. 987-1010 (2006).
12. Gan, G. and Riffat, S.B. "A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery", *Appl. Therm. Eng*, **18**(12), pp. 1171-1187 (1998).
13. Chen, Z.D. and Li, Y. "A numerical study of a solar chimney with uniform wall heat flux", *In Proc. Fourth Int. Conf. Indoor Air Qual. Vent. Energy Conserv. Build. Human*, China pp. 1447-1454 (2001).
14. Bacharoudis, E., Vrachopoulos, M.G., Koukou, M.K. and et al. "Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat flux", *Appl. Therm. Eng*, **27**(13), pp. 2266-2275 (2007).
15. Ababsa, D. and Bougoul, S. "Numerical study of natural ventilation in a channel integrated below the roof tiles of Buildings", *Int. J. Innov. Appl. Stud*, **5**(3), pp. 222-232 (2014).
16. Haghighi, A.P. and Maerefat, M. "Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days using solar chimney", *Sustain. Cities Soc*, **10**, pp. 72-79 (2014).
17. Tan, A.Y.K. and Wong, N.H. "Parameterization studies of solar chimneys in the tropics", *Energies*, **6**(1), pp. 145-163 (2013).
18. Zamora, B. and Kaiser, A.S. "Radiative and variable thermophysical properties effects on turbulent convective flows in cavities with thermal passive configuration", *Int. J. Heat Mass Transf*, **109**, pp. 981-996 (2017).
19. Khanal, R. and Lei, C. "A numerical investigation of buoyancy ir flow in an inclined passive wall solar induced turbulent a chimney for natural ventilation", *Energy Build*, **93**, pp. 217-226 (2015).
20. Launder, B.E. and Spalding, D.B. "The numerical computation of turbulent flows", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*, **3**(2), pp. 269-289 (1974).
21. Jafari, A. and Poshtiri, A.H. "Passive solar cooling of single-storey buildings by an adsorption chiller system combined with a solar chimney", *J. Clean. Prod*, **141**, pp. 662-682 (2017).
22. Duffie, J.A. and Beckman, W.A. "Solar engineering of thermal processes", WILEY, Fourth Edition (1980).
23. Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A. and et al. "A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows", *Comput. Fluids*, **24**(3), pp. 227-238 (1995).
24. Wilcox, D.C., *Turbulence Modeling For CFD*, (Vol. 2). DCW industries La Canada, CA.
25. Bouchair, A. "Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern algeria", *Build. Serv. Eng. Res. Technol*, **15**(2), pp. 81-93 (1994).
26. Gan, G. "Impact of computational domain on the prediction of buoyancy-driven ventilation cooling", *Build. Environ*, **45**(5), pp. 1173-1183 (2010).