

مدل سازی عددی جریان هوا در دودکش خورشیدی

ابوالفضل شمسایی^۱، بهروز محمودی^{۲*}، مهدی سرلک^۳، حمیدرضا وثوقی^۴

^۱استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

^۲و^۳کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

^۴استادیار دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۰۶/۰۲، تاریخ دریافت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۷، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

چکیده

صنعت ساختمان یکی از پرمصرفترین بخش‌های کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه در مصرف انرژی می‌باشد. درصد قابل توجهی از مصرف انرژی در این بخش صرف سیستم‌های سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع می‌شود. لذا بررسی سیستم‌های تهویه طبیعی به منظور بالا بردن بازدهی و عملکرد آنها از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. در این مقاله، جریان هوا در دودکش خورشیدی به عنوان یک سیستم جدید تهویه طبیعی و سیستم ترکیبی آن با بادگیر از طریق دینامیک سیالات محاسباتی و روش حجم محدود بررسی شده است. بدین منظور و برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان در این سیستم‌ها، مدل‌های مختلف آشفتگی از طریق یک آزمون آماری معتبر مقایسه و در نهایت مدل k-ε RNG به عنوان بهترین گزینه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین اثر افزایش ارتفاع، عرض دهانه و افزایش گرادیان حرارتی دیواره‌ها بر میزان بهبود کارایی دودکش خورشیدی از طریق محاسبه پارامترهای نرخ جرمی جریان و میانگین سرعت مطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی: مکانیک سیالات محاسباتی، روش حجم محدود، مدل‌های آشفتگی، دودکش خورشیدی.

مقدمه

برآورد اطلاعات جامعی مثل نرخ تهویه و توزیع جریان هوا در اطراف و درون یک ساختمان را فراهم می‌کند. می‌توان به کاتایاما [۵]، داسکالاکی [۶]، به عنوان افرادی که چنین تحقیقاتی را انجام داده‌اند اشاره کرد. در سال ۲۰۰۵، ایوولا و پوپوف تهویه طبیعی ناشی از باد را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیقات آنها از معادله ناویر-استوکس با عدد رینولدز میانگین به عنوان معادله حاکم برای تهویه طبیعی یک ساختمان مکعبی شکل استفاده شد [۷]. آفونسو [۸] با استفاده از سلول‌های آزمایشگاهی و بتس [۹]، با انجام مطالعاتی تجربی در این زمینه تحقیقاتی انجام دادند. یعقوبی و همکارانش، مطالعاتی تجربی را بر روی یک بادگیر واقعی انجام دادند [۱۰]. همچنین در زمینه استفاده از دودکش‌های خورشیدی برای تهویه، مطالعاتی تجربی و عددی انجام شده است. باچارودیس و همکارانش، اثر تهویه طبیعی را در دودکش‌های خورشیدی دیواری مورد بررسی قرار دادند [۵]. میازاکی و همکارانش در ژاپن با استفاده از شبیه‌سازی CFD و یک مدل تحلیلی، عملکرد یک دودکش خورشیدی را که در دیوار جنوبی یک ساختمان یک طبقه تعبیه شده بود، مورد بررسی قرار دادند.

در حدود یک سوم از کل مصرف انرژی در کشورهای توسعه‌یافته در بخش مسکن و ساختمان خلاصه می‌شود، این در حالیست که تأمین سرمایش، گرمایش و تهویه هوای داخل فضاهای مسکونی و اداری بخش قابل توجهی از این مقدار انرژی را به خود اختصاص داده است [۳]. در میان سیستم‌های تهویه طبیعی خورشیدی می‌توان به دودکش‌های خورشیدی اشاره کرد که کارایی آن در مناطق گرم و مرطوب برای انجام عمل تهویه هوای داخل ساختمان‌ها و نیز کاهش دما و رطوبت هوا در ایجاد شرایطی مطبوع بیشتر می‌باشد [۴]. اهمیت استفاده از سیستم‌های تهویه‌های طبیعی در مباحث چهاردهم و نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران منعکس شده است. برای مثال، بند ۱۴-۳-۱ مقررات ملی ساختمان بیان می‌دارد: «در هر قسمت از فضاهای ساختمان که در اشغال و تصرف انسان باشد و تعویض هوای مورد نیاز با تهویه طبیعی ممکن باشد، تعویض هوا (تهویه)ی طبیعی باید پیش‌بینی شود و تعویض هوای مکانیکی لازم نیست» [۱]. اندازه‌گیری‌های هم مقیاس برای یک ساختمان، امکان

سیستم‌های تهویه طبیعی

سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه طبیعی و منابع تجدیدپذیر انرژی بر اساس دیدگاه توسعه پایدار در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸، ظرفیت ذخایر خورشیدی به بیش از ۱۶ گیگاوات، ظرفیت نیروگاه‌های بادی با رشدی ۲۵۰ درصدی به ۱۲۱ گیگاوات و کل ظرفیت نیروگاه‌های وابسته به منابع تجدیدپذیر با رشدی ۷۵ درصدی به ۲۸۰ گیگاوات افزایش یافته است [۱۱]. سیستم‌های تهویه طبیعی از دیدگاه CIBSE [۱۲]، به سه دسته تهویه یک‌طرفه^۱، تهویه قطری^۲ و تهویه دودکشی^۳ تقسیم می‌شوند. در ادامه دودکش خورشیدی مورد توجه قرار می‌گیرد.

دودکش خورشیدی

دودکش‌های خورشیدی انواع مختلفی دارند که متداول‌ترین آنها دودکش‌های خورشیدی دیواری می‌باشند. در این سیستم جریان هوا به واسطه نیروی شناوری ایجاد می‌شود؛ یعنی هوای گرم در داخل کانال به طرف بالا حرکت کرده و از آن خارج می‌شود و به جای آن هوای خنک‌تر در یک سیستم بسته جایگزین آن می‌گردد. معمولاً، به منظور افزایش میزان جذب گرما و نرخ تهویه، دیوار جنوبی دودکش خورشیدی را شیشه‌ای و بخش داخلی سایر دیوارها را تیره و بخش خارجی آنها را عایق می‌کنند. عوامل متعددی باید در طراحی دودکش خورشیدی مورد توجه قرار گیرد. از آن جمله می‌توان به شرایط جوی، محل قرارگیری، جهت و اندازه ساختمان اشاره کرد. در این مقاله، با به کارگیری ۴۸ مدل و از طریق دینامیک سیالات محاسباتی اثر تغییرات ارتفاع، عرض دهانه و گرادیان حرارتی دیوارها را بر میزان عملکرد دودکش‌های خورشیدی دیواری بررسی می‌کنیم.

سیستم ترکیبی بادگیر و دودکش خورشیدی

بادگیر در طول سالیان متمادی تنها راه‌کار موجود برای تحمل شرایط سخت آب و هوایی مناطق گرم و خشک فلات مرکزی ایران به حساب می‌آمد. در گذشته دهانه خروجی بادگیر به داخل زیرزمین‌ها وارد می‌شد که در این حالت دمای هوا پس از عبور از روی حوض‌های آب و انجام

برای ساکنین ساختمان مهیا می‌کرد.

از سوی دیگر، می‌توان بادگیرهای سنتی را به عنوان ترکیبی از سیستم‌های بادی و خورشیدی برای تهویه فضاهای مسکونی به حساب آورد. بازشوی بالای برج در جهت باد غالب قرار دارد. بنابراین، در بیشتر زمان‌ها این قسمت از برج در ناحیه فشاری قرار می‌گیرد. می‌توان از خود برج علاوه بر نقش اصلی آن در سیستم بادگیر برای جذب نور خورشید و به عنوان یک سیستم ذخیره انرژی نیز استفاده کرد. مهم‌ترین عیب بادگیر عدم کارایی آن در زمانی است که سرعت باد در کم است. در این حالت، می‌توان با ترکیب بادگیر و سیستم دودکش خورشیدی امکان برقراری جریان هوا را از طریق نیروی شناوری در داخل فضای مسکونی فراهم آورد [۲]. این کار با انجام یک مطالعه عددی به کمک روش حجم محدود و بر روی یک مدل دو بعدی انجام شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان با این سیستم حتی در مواردی که سرعت باد در منطقه صفر است جریانی با سرعت ۲/۱ متر بر ثانیه در دهانه ورودی به ساختمان ایجاد کرد [۲].

معادلات حاکم

عموماً معادلات حاکم بر جریان سیالات را با نام معادلات ناویر-استوکس می‌شناسیم. که شکل بدون بعد معادلات ناویر-استوکس به صورت زیر نوشته می‌شوند:

• معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*}(\rho^* u^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\rho^* v^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\rho^* w^*) = 0 \quad (1)$$

مؤلفه X معادله ممنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t^*}(\rho^* u^*) + \frac{\partial}{\partial x^*}(\rho^* u^{*2} + p^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\rho^* u^* v^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\rho^* u^* w^*) = \frac{\partial}{\partial x^*}(\tau_{xx}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\tau_{xy}^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\tau_{xz}^*) \quad (2)$$

• مؤلفه Y معادله ممنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t^*}(\rho^* v^*) + \frac{\partial}{\partial x^*}(\rho^* u^* v^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\rho^* v^{*2} + p^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\rho^* v^* w^*) = \frac{\partial}{\partial x^*}(\tau_{xy}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\tau_{yy}^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\tau_{yz}^*) \quad (3)$$

• مؤلفه Z معادله ممنتوم

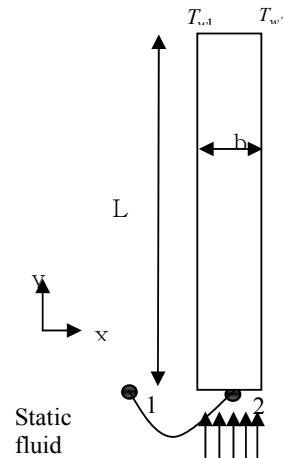
$$\frac{\partial}{\partial t^*}(\rho^* w^*) + \frac{\partial}{\partial x^*}(\rho^* u^* w^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\rho^* v^* w^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\rho^* w^{*2} + p^*) = \frac{\partial}{\partial x^*}(\tau_{xz}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(\tau_{yz}^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(\tau_{zz}^*) \quad (4)$$

۴- مدل عددی

در مدلسازی با نرم افزار FLUENT ، ارتفاع و عرض دهانه کانال دودکش خورشیدی و افزایش گرادیان حرارتی دیواره های آن به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. در نتیجه برای مقایسه این پارامترها ۴۸ مدل ساخته شد. شکل ۱ یک دودکش خورشیدی دیواری را در حالت کلی نشان می دهد. اختلاف دمای دیواره ها T_{w1} و T_{w2} منجر به ایجاد یک نیروی شناوری شده و بدین ترتیب جریان هوا در داخل کانال به وجود می آید. مهمترین موضوع تعیین نرخ جرمی جریان هوای ایجاد شده در این حالت و افزایش آن از طریق تغییرات هندسه مدل می باشد.

۴-۱- شرایط اولیه و مرزی

مجموعه معادلات حاکم بر جریان (معادلات ناویر-استوکس) همراه با شرایط مرزی و اولیه با روش دائمی Segregated حل شد. از آنجاییکه معادلات حاکم غیر خطی هستند، از روش Simple برای ارتباط جمله های فشار و سرعت استفاده شد. فشار کل محیط برابر مجموع فشارهای دینامیکی و استاتیکی می باشد. یعنی خواهیم داشت $(p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho|\vec{v}|^2)$. فشار استاتیکی برابر با فشار جو و فشار دینامیکی بر اساس تخمین مناسبی از سرعت اولیه منظور می شوند. سیال حاکم در این مسأله هوا با عدد پرناتل ۰/۷۱۳ است.



شکل ۱- نمای کلی یک دودکش خورشیدی

مجهولی خواهد داشت که نرخ جرمی جریانی در دمای T_0 و فشار استاتیکی p_s ایجاد خواهد کرد. فرض بر این است که حرکت سیال از نقطه ۱ به نقطه ۲ طی فرایندی بی در رو و برگشت پذیر انجام می شود. معادله برنولی در بیرون از کانال و در ناحیه ورودی به آن برقرار است و اختلاف فشار بین دو نقطه به انرژی جنبشی تبدیل می شود.

$$p_s + \frac{1}{2}\rho u^2 = P_0 \Rightarrow p_s - P_0 + \frac{1}{2}\rho u^2 = 0 \quad (5)$$

$$\Rightarrow P' + \frac{1}{2}\rho u^2 = 0 \Rightarrow P' = -\frac{1}{2}\rho u^2 \quad (6)$$

در این معادله P' فشار استاتیکی کاهش یافته و $P_0 = -\rho_0 g y$ فشار محیط است. شدت آشفستگی ۰/۰۱ درصد فرض شد. طول مقیاس از رابطه $0.07 \times D$ به دست می آید. در این رابطه D عرض کانال فرض می شود.

۴-۱-۲- شرایط مرزی خروجی

در قسمت خروجی، از تغییرات مؤلفه های سرعت و دما در جهت جریان صرف نظر شده است. می توان فشار استاتیکی را در هر نقطه دلخواه به صورت زیر نوشت:

$$p_s = P' + P_0 \Rightarrow p_s = P' - \rho_0 g y \quad (7)$$

۴-۱-۳- شرایط مرزی دیواره ها

فرض بر این است که دمای دیواره های دودکش خورشیدی با هم متفاوتند. در تمام این موارد فرض بر اینست که دیواره جنوبی دودکش های خورشیدی به منظور افزایش فلاکس حرارتی و عبور بهتر نور خورشید از جنس شیشه و دیواره شمالی به منظور جذب بیشتر نور خورشید و در نتیجه ایجاد گرادیان حرارتی بیشتر از جنس سفال با مشخصات مندرج در جدول (۱)، می باشد.

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در دودکش خورشیدی

Material	Density(kg/m ³)	thermal conductivity (w/m.k)	Specific heat (j/kg.k)
Air	1.205	0.024	1005
Glass	2203	1.05	840
brick	1700	0.69	840

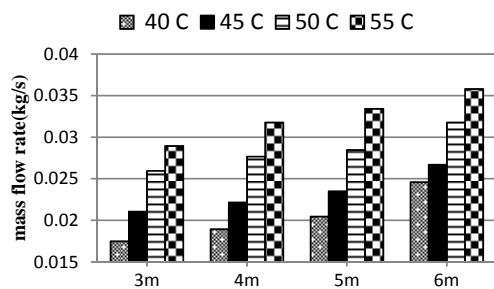
۴-۱-۴- مدل های آشفستگی

برای شبیه سازی عددی جریان آشفته در درون دودکش خورشیدی از شش مدل آشفستگی مختلف استفاده شد: مدل $k - \epsilon$ استاندارد، مدل $k - \epsilon$ RNG، مدل $k - \epsilon$ و مدل $k - \epsilon$

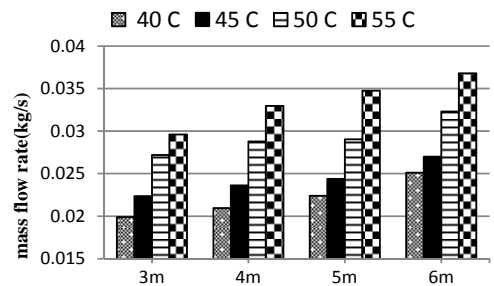
۴-۱-۱- شرایط مرزی ورودی

سیال در نقطه ۱ در دمای محیط و فشار استاتیکی P_0 بدون حرکت است. سیال در نقطه ۲ پروفیل سرعت

تغییرات نرخ جرمی جریان هوا را نسبت به تغییرات ارتفاع دودکش خورشیدی در دماهای مختلف برای دهانه‌هایی به ترتیب با عرض ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتیمتر نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که عملکرد سیستم با افزایش ارتفاع به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. نمودارهای (۱-۴) تا (۱-۶)، تغییرات نرخ جرمی جریان را نسبت به دماهای مختلف برای دیواره سفالی و دودکش‌هایی با ارتفاع مختلف و به ترتیب با عرض دهانه ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتیمتر نشان می‌دهد. طبق این نمودارها، با افزایش دما و به دلیل افزایش نیروی شناوری ناشی از گرادیان حرارتی بیشتر بین دیواره‌ها، عملکرد تهویه بهبود می‌یابد. سرانجام نمودارهای (۱-۷) تا (۱-۱۰)، تغییرات نرخ جرمی جریان را نسبت به دمای دیواره سفالی سمت چپ دودکش‌های خورشیدی با عرض دهانه‌های مختلف و برای ارتفاعات مختلف ۳، ۴، ۵ و ۶ متر نشان می‌دهند. از این نمودارها چنین بر می‌آید که با افزایش عرض دهانه دودکش خورشیدی، نرخ جرمی جریان نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.



نمودار ۱-۱- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به ارتفاع در دماهای مختلف (دهانه ۵ سانتیمتر)



نمودار ۱-۲- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به ارتفاع در دماهای مختلف (دهانه ۷/۵ سانتیمتر)

Realizable ϵ - k مدل استاندارد، مدل k - ω استاندارد، مدل k - ω SST و مدل تنش رینولدز (RSM). مدل آشفتگی دو معادله‌ای k - ϵ استاندارد شامل حل دو معادله دیفرانسیل پارهای اضافی برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ پراکندگی آن (ϵ) می‌باشد.

۳-۴- تولید شبکه

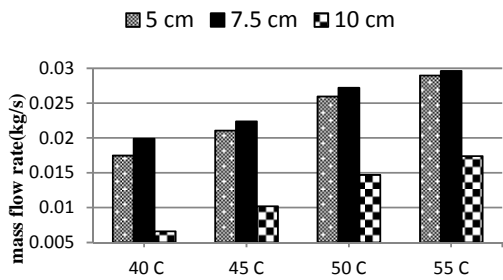
برای ایجاد مش‌های شبکه از روش باسازمان استفاده گردید. برای این منظور به کمک نرم افزار قدرتمند تولید شبکه Gambit، با استفاده از روش Map که برای مش‌بندی چنین شبکه حجم محدودی مناسب است، شبکه مورد نظر تولید شد. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی چنین شبکه‌ای، آزمون استقلال شبکه انجام گردید. در تمام مدل‌ها $y^+ < 1$ است و در نتیجه ابعاد شبکه بر اساس این ملاحظات انتخاب می‌شود. ابعاد شبکه انتخابی برای مدل‌هایی با ارتفاع و عرض دهانه مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ابعاد شبکه تولید شده در مدل‌های مختلف

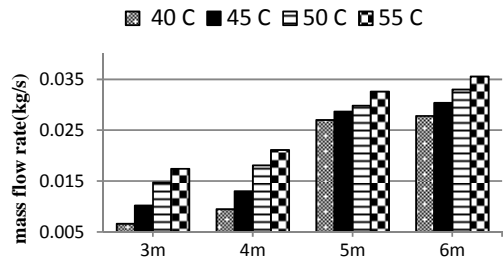
Size of Solar chimney		Grid dimension	
Span width(cm)	Height(m)		
5	3	70	315
	4	70	420
	5	70	525
	6	70	630
7.5	3	105	315
	4	105	420
	5	105	525
	6	105	630
10	3	140	315
	4	140	420
	5	140	525
	6	140	630

۵- تحلیل نتایج

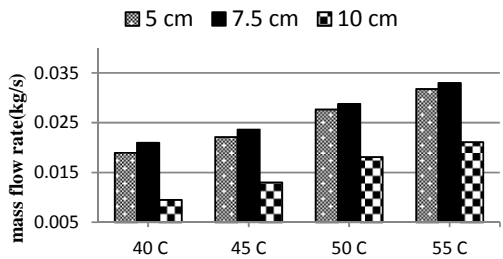
در این مطالعه نرخ جرمی جریان هوای تازه به درون فضای ساختمان به عنوان مهمترین پارامتر مقیاس به حساب می‌آید. بر این اساس نمودارهای (۱-۱) تا (۱-۱۰)، اثر تغییرات ارتفاع کانال، عرض دهانه دودکش خورشیدی و دمای دیواره سفالی را بر میزان نرخ جرمی جریان هوا به داخل ساختمان نشان می‌دهد. در نتیجه، با توجه به نمودارهای (۱-۱) تا (۱-۳) که



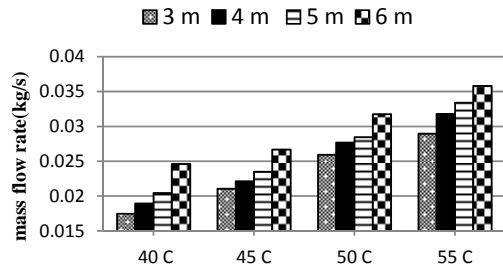
نمودار ۱-۷- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در دهانه های مختلف (ارتفاع ۳ متر)



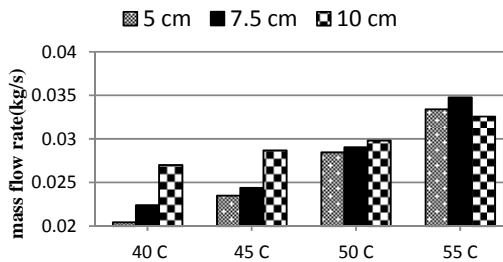
نمودار ۱-۳- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به ارتفاع در دماهای مختلف (دهانه ۱۰ سانتیمتر)



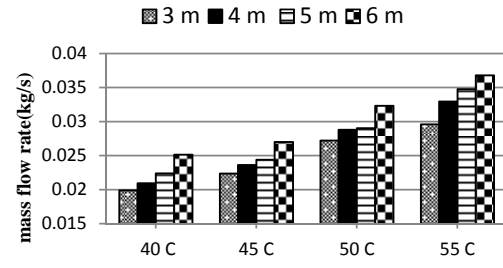
نمودار ۱-۸- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در دهانه های مختلف (ارتفاع ۴ متر)



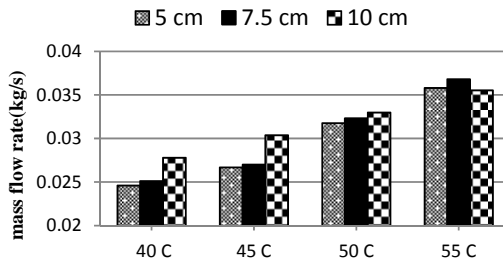
نمودار ۱-۴- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در ارتفاعات مختلف (دهانه ۵ سانتیمتر)



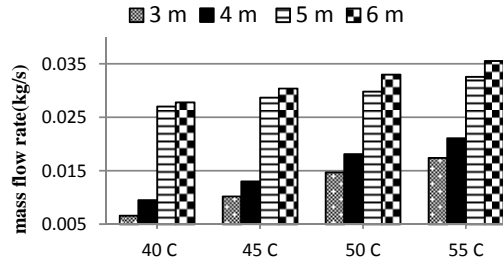
نمودار ۱-۹- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در دهانه های مختلف (ارتفاع ۵ متر)



نمودار ۱-۵- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در ارتفاعات مختلف (دهانه ۷/۵ سانتیمتر)



نمودار ۱-۱۰- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در دهانه های مختلف (ارتفاع ۶ متر)



نمودار ۱-۶- تغییرات نرخ جرمی جریان نسبت به دما در ارتفاعات مختلف (دهانه ۱۰ سانتیمتر)

جمع‌بندی

در نهایت می‌توان نتایج حاصل از این مطالعه عددی را به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش ارتفاع دودکش خورشیدی، نرخ جرمی جریان هوا افزایش می‌یابد. به طوریکه با افزایش ارتفاع دودکش خورشیدی از ۳ متر به ۶ متر، نرخ جرمی جریان ۴۷ درصد افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش عرض دهانه دودکش خورشیدی میزان میانگین سرعت و نرخ جرمی جریان هوا افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از کانالی با عرض ۷/۵ سانتیمتر نرخ جرمی جریان نسبت به زمانی که عرض دهانه ۵ سانتیمتر است ۱۸ درصد بهبود می‌یابد.

۳- چنانچه عرض دهانه دودکش خورشیدی از ۱۰ سانتیمتر تجاوز کند، جریان برگشتی در داخل کانال اصلی ایجاد می‌شود. لذا باید در طراحی دودکش خورشیدی به این موضوع توجه داشت.

۴- چنانچه دمای دیوار سفالی در دودکش خورشیدی افزایش یابد، عملکرد تهویه و سرمایش آن بهبود می‌یابد. با افزایش گرادیان حرارتی بین دیواره‌ها نرخ جرمی جریان تا ۲۳ درصد افزایش می‌یابد.

۵- در صورت استفاده از سیستم ترکیبی دودکش خورشیدی و بادگیر، می‌توان عملکرد تهویه و سرمایشی تهویه طبیعی را در داخل ساختمان به میزان قابل توجهی افزایش داد. بر اساس نتایج حاصل شده می‌توان با این سیستم در مواردی که سرعت باد در محیط صفر است، در دهانه ورودی به ساختمان تا حدود ۲/۱ متر بر ثانیه سرعت داشت.

۶- نتایج نشان داد که می‌توان با به کارگیری این سیستم، نرخ جرمی هوای مورد نیاز برای فضاهایی با کاربری مختلف را برای هر فرد در فضاهای مسکونی نرخ جرمی ۷/۵ لیتر بر ثانیه را مناسب دانسته تأمین کرد.

مراجع

- 1- Iranian building prescription, 14th chapter, heating, air change and air conditioning installations, 2001.
- 2- BehroozMahmoodi. (2009). "Evaluating a Powerful Numerical-Mathematical Model to Investigate Fluid Flow, Through Tower and Solar Chimney of Wind Tower (Wind tower) by Finite Volume Method." M.sc theses, Science and research Azad University.
- 3- Energy Information Administration. (1995) State Energy Data Report 1995, Tables 3 through 7.
- 4- EvangellosBacharoudis, Michalis Gr. Vrachopoulos, Maria K. Koukou, DionysiosMargaris, Andronikos E. Filios, Stamatis A. Mavrommatis (2007), "Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat." Applied Thermal Engineering 27, 2266-2275.
- 5- T. Katayama, J. Tsutsumi, A. Ishii, (1992) "Full-scale measurements and wind tunnel tests on cross-ventilation." J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 41-44, 2553-2562.
- 6- E. Dascalaki, M. Santamouris, A. Argiriou, C. Helms, D. Asimakopoulos, K. Papadopoulos, A. Soilemes, (1995) "Predicting single sided natural ventilation rates in buildings." Sol. Energy 55 (5), 327-341.
- 7- G. Evola, V. Popov, (2006) "Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings." J. Energy and Buildings 38, 491-501.
- 8- Afonso C. (2000), "Solar chimneys: simulation and experiment." Energy Buildings; 32:71-9.
- 9- Betts PI, Bokhari IH. (1996), "Experiments on natural convection of air in a tall cavity." In: IAHR workshop on flow modelling, Paris, p. 25-6.
- 10- Yaghoubi MA, Sabzevari A, Golneshan AA. (1991) "Wind towers: measurement and performance." Sol Energy ; 47(2):97-106.
- 11- REN21 (2009). Renewables Global Status Report: 2009 Update p. 8.
- 12- CIBSE Natural Ventilation in Non-domestic Buildings, (1997), Applications Manual AM10, the Chartered Institution of Building Services Engineers, London.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1-Single-Sided Ventilation
- 2-Cross Ventilation
- 3-Stack Ventilation