بررسی عددی عملکرد یک دیوار ترومب در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی

مهران ربانی*[۱]، ولی کلانتر[۲]، امیر بنی کریمی[۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۴/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۷/۲۰

چکیده:

در این مقاله، نحوه عملکرد سیستم دیوار ترومب و چگونگی برقراری جریان داخل اتاق در حالت دائم و غیردائم مورد بررسی قرار گرفته است. هدف، بررسی اندازه بهینه سیستم (حالت دائم) برای ذخیره بیشتر انرژی و تاثیر آن بر فضای داخلی اتاق از هنگام شروع به کار سیستم تا زمانی که سیستم به حالت دائم می‌رسد (حالت غیردائم) و همچنین محاسبه میزان ساعاتی است که انرژی ذخیره شده در دیوار به فضای داخل اتاق در نبود تابش خورشید انتقال می‌یابد. برای شروع به کار سیستم، فرض شده که تمامی سرعت‌ها صفر است و فضای داخلی اتاق در حداقل دما که در زمستان است ($T=10^{\circ}c$) قرار دارد و سیستم با شروع تابش خورشید و دریافت انرژی حرارتی خورشید توسط دیوار شروع به کار می‌کند.

کلمات کلیدی:
دیوار ترومب، حالت غیردائم، انرژی حرارتی خورشید.

۱) دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه یزد
۲) عضو هیأت علمی دانشگاه یزد، استادیار گروه مکانیک
۳) مدیر شرکت نفت، شرکت ملی پخش و فرآورده‌های نفتی ایران واحد یزد
* نویسندهٔ مسئول
rabaniasd@stu.yazduni.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

مقدمه

در حال حاضر، حدود چهل درصد از کل مصرف انرژی، مربوط به ساختمان می‌گردد. بخش قابل توجهی از این انرژی صرف گرمایش و سرمایش ساختمان می‌شود که علاوه بر مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، آلودگی محیط زیست را نیز به همراه دارد. در این مقاله، جهت صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش مشکلات زیست محیطی با ارائه ایده استفاده از انرژی خورشیدی جهت به حرکت درآوردن هوا در داخل ساختمان توسط دیوار ترومب، بدون استفاده از نیروی محرکه یا مصرف سوختهای فسیلی می‌توان گرمایش با دمای مناسب طبق استانداردهای تهویه مطبوع را فراهم نمود.

در دهه‌های اخیر، تعداد زیادی از تحقیقات روی گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها با استفاده از دیوار ترومب صورت گرفته است. بسته به نظر محققین مربوط، هریک از این مطالعات از دیدگاهی خاص، گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها را بررسی نموده که از این جمله می‌توان به بررسی جنس دیوار، عملکرد دیوار ترومب و اثر آن بر جریان فضای داخل اتاق، تاثیر فاصله هوایی و ... بر عملکرد این سیستم اشاره نمود. اکثر این تحقیقات به روش آزمایش صورت گرفته و تعدادی نیز به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

حسین انباسیوگلا[۱] و همکارش به روش آزمایشگاهی به بررسی چگونگی عملکرد حرارتی یک دیوار ترومب تحت سیستم غیرفعال پرداختند [۵]. اتاق تست به ابعاد ۳×۳/۳×۳/۳ مترمکعب و دیوار ترومب از جنس آجر و به رنگ سیاه به ضخامت ۰/۱۶ متر و ابعاد ۳×۳/۳ مترمربع درون اتاق تست قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دما در طول روز در قسمت دیوار سرد به آرامی افزایش می‌یابد که این امر باعث گردش هوا می‌شود. همچنین نتایج بیانگر این است که در طول شب سرمایش ایجاد می‌شود که باعث گردش هوای معکوس می‌شود. بنابراین، باید دریچه‌ها بسته شوند تا از این سیرکولیشن معکوس جلوگیری شود.

آروینده چل و همکارانش بقای انرژی در ساختمان‌ها با استفاده از دیوار ترومب را مورد بررسی قرار دادند [۲]. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از دیوار ترومب دمای اتاق بین ۲۲/۸– ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد که باعث برقراری شرایط بهینه می‌شود.

نواچوکوا[۲] عملکرد سیستم دیوار ترومب در محل نگهداری جوجه‌ها در یک منطقه استوایی را مورد بررسی قرار داد [۶]. در این تحقیق، عملکرد حرارتی این سیستم با استفاده از روش عددی تفاضل محدود[۳] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تابش خورشید در طی سال، در این تحقیق سیستم دیوار ترومب به صورت نیمکره‌ای در نظر گرفته شده است (به علت نحوه تابش خورشید، دیوار ترومب به صورت نیمکره‌ای طراحی شده است). این عمل باعث شده که عملکرد سیستم دیوار ترومب بهتر شده و در تمام سال با توجه به عوض شدن جهت خورشید، این سیستم جوابگو باشد.

---

۱) Huseyin Onbasioglu
۲) Nwachukwu
۳) Finite Elements

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

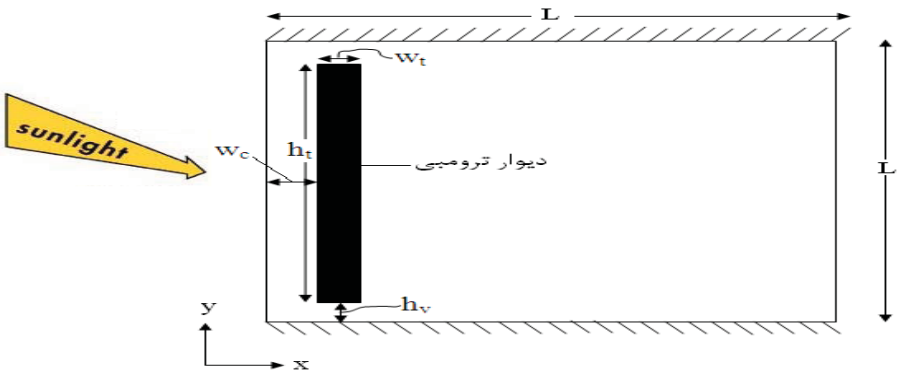
عبدالجبار خلیفال[۱] و همکارش به مقایسه عملکرد جنس‌های مختلف دیوار ترومب با ضخامت‌های متفاوت به روش عددی پرداختند [۱]. در این بررسی، سه ماده مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که عبارتند از بتن، نمک هیدرید شده[۲] و پارافین جامد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ضخامت ۸ سانتیمتری نمک هیدرید شده در مقایسه با ضخامت ۲ سانتی‌متری بتن و ضخامت ۵ سانتی‌متری دیوار پارافینی، دما را داخل اتاق با کمترین تغییرات دمایی در شرایط مطلوب حفظ می‌کند.

ویلفرد اوکانکو[۳] و همکارش به بررسی تاثیر یک صفحه جاذب با فاصله متغیر نسبت به دیوار، بر روی عملکرد سیستم دیوار ترومب در محفظه خورشیدی پرداختند [۷]. بر اساس نتایج، با افزایش مقدار قابلیت جذب صفحه حرارتی، حرارت جذب شده و انتقال یافته در طول دیوار ترومب بهبود می‌یابد.

با بررسی مقالات، مشخص شد که هیچکدام از آنها ابعاد بهینه برای ذخیره بیشتر انرژی، عملکرد سیستم در حالت غیردائم، میزان انرژی ذخیره شده در این سیستم و مدت زمانی که این سیستم قابلیت گرمایش ساختمان در نبود انرژی حرارتی خورشید را دارد، مورد بررسی قرار نداده‌اند.

هندسه مسأله

ابعاد اتاق ۴×۴ مترمربع می‌باشد و بر اساس مرجع [۸]، ارتفاع دریچه‌ها (h_v) و ارتفاع دیوار (h_t) برای حل به ترتیب ۰/۳ متر و ۳/۴ متر و پهنای کانال (w_c) ۰/۳ متر و بر اساس مرجع [۱] ، ضخامت دیوار ترومب (w_t) ۰/۲ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱).



شکل ۱) هندسه مسأله مورد نظر

۱) Abdul-Jabbar N. Khalifa1

۲) $CaCl_2.6H_2O$

۳) Wilfred I. Okonkwo

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان در سیال، معادلات ناویر- استوکس، پیوستگی و انرژی می‌باشند. معادلات کلی حاکم بر جریان سیال، در حالت آرام و دوبعدی و غیردائم به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial(uu)}{\partial x}+\frac{\partial(vu)}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu\frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (۲)$$

$$+\frac{\partial(uv)}{\partial x}+\frac{\partial(vv)}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+g\beta(T-T_\infty) \quad (۳)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial(uT)}{\partial x}+\frac{\partial(vT)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k_f}{\rho c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k_f}{\rho c_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (۴)$$

در مسائل جابجایی طبیعی، سرعت مرجع مشخصی وجود ندارد، بنابراین، بنا به شرایط مسأله می‌بایست سرعت مرجع مناسب را از بین سرعت‌های پیشنهادی در مقاله زائو [۴] انتخاب نمود. در نتیجه، از سرعت بدون بعد $U_{ref}=\alpha/L$ استفاده می‌شود که L ارتفاع اتاق و طول مشخصه و α ضریب انتقال حرارت می‌باشد.

ΔT_{ref} با توجه به اینکه شرط مرزی دیوار، شار ثابت یا دما ثابت باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود (در معادلات زیر T_h دمای گرم، T_c دمای سرد و q'' میزان شار حرارتی می‌باشد):

(۵) شار ثابت

$$\Delta T_{ref}=\frac{q''L}{k_f}$$

(۶) دما ثابت

$$\Delta T_{ref}=T_h-T_c$$

در این تحقیق با وجود شرط مرزی شار ثابت بر روی دیوار ترومب، $\Delta T_{ref}=q''L/k_f$ می‌باشد.

زمان و فشار نیز به ترتیب با مقادیر L/U_{ref} و ρU_{ref}^2 بدون بعد می‌شوند. بدین ترتیب پارامترهای بدون بعد عبارتند از:

$$X=\frac{x}{L},\ Y=\frac{y}{L},\ \tau=\frac{t}{L/U_{ref}},\ U=\frac{u}{U_{ref}},\ V=\frac{v}{U_{ref}} \quad (۷)$$

$$P=\frac{p}{\rho U_{ref}^2},\quad \theta=\frac{T-T_\infty}{\Delta T_{ref}}$$

به این ترتیب، با جایگذاری موارد فوق در معادلات (۱) الی (۴)، معادلات بدون بعد شده، به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \quad (۸)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}+\frac{\partial(UU)}{\partial X}+\frac{\partial(VU)}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{\partial}{\partial X}\left(Pr\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(Pr\frac{\partial U}{\partial Y}\right) \quad (۹)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau}+\frac{\partial(UV)}{\partial X}+\frac{\partial(VV)}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\partial}{\partial X}\left(Pr\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(Pr\frac{\partial V}{\partial Y}\right)+RaPr\theta \quad (۱۰)$$

(۱۱) معادله انرژی سیال

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}+\frac{\partial(U\theta)}{\partial X}+\frac{\partial(V\theta)}{\partial Y}=\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)$$

(۱۲) معادله انرژی جامد

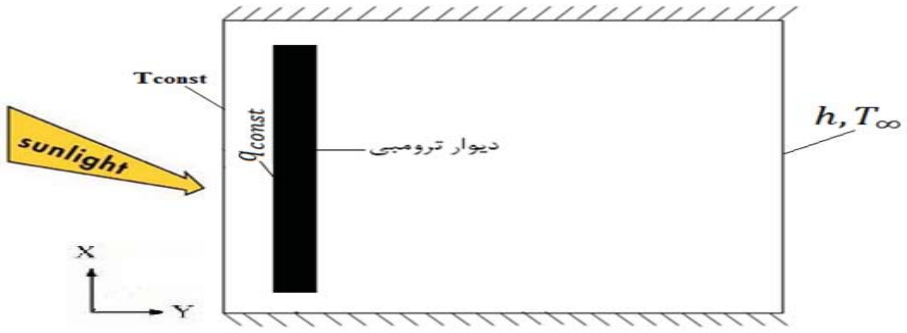
$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial X}\left(R_k\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(R_k\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)+F(\Omega)\frac{q'''_s L^2/k_f}{\Delta T_{ref}}$$

در اینجا بر اساس تولید داخلی جسم جامد شرایط تفاوت دارد. اگر جسم جامد چشمه حرارتی باشد $F(\Omega)=1$، اگر جسم جامد چاه حرارتی باشد $F(\Omega)=-1$ و اگر جسم جامد تولید حرارت نداشته باشد $F(\Omega)=0$ است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

شرایط مرزی

شرایط مرزی حاکم بر مسأله حاضر به صورت زیر می‌باشد (شکل ۲):



شکل۲) شرایط مرزی مسأله مورد نظر

با توجه به اینکه تمامی دیوارهای محفظه مورد بررسی ساکن می‌باشند، نتیجه می‌شود:

$$X = 0 \rightarrow U,V = 0 \quad ; \quad Y = 0 \rightarrow U,V = 0$$
$$X = L \rightarrow U,V = 0 \quad ; \quad Y = L \rightarrow U,V = 0 \qquad (۱۳)$$

با توجه به اینکه دیوارهای بالا و پایین محفظه عایق هستند، نتیجه می‌شود:

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \xrightarrow{\text{بدون بعد سازی}} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$
$$Y = 0 \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad ; \quad Y = L \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \qquad (۱۴)$$

دیوارهای سمت راست و چپ به ترتیب با شرط مرزی جابجایی آزاد با محیط بیرون و دما ثابت مدل شده‌اند. برای دیوار سمت چپ یعنی شیشه با توجه به اینکه دمای آن با توجه به مقالات آقایان لی و چن [۹و۳] بررسی شده، مابین دمای گرم دیوار و دمای سرد بیرون می‌باشد. در نتیجه، برای شیشه با توجه به شار حرارتی ورودی، نتیجه می‌شود:

$$X = 0 \rightarrow \theta = 0.2 - 0.5 \qquad (۱۵)$$

برای دیوار سمت راست با توجه به جابجایی آزاد، نتیجه می‌شود (این نکته قابل ذکر است که h در اینجا مقدار ثابتی است که به برنامه داده می‌شود):

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial x} - h(T - T_\infty) = 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{h(T - T_\infty)}{k_f}$$
$$\xrightarrow{\text{بدون بعد سازی}} \frac{\partial\left(\frac{T - T_\infty}{\Delta T_{ref}}\right)}{\partial\left(\frac{x}{L}\right)} = -\frac{h(T - T_\infty)}{k_f}\frac{L}{\Delta T_{ref}} \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial X} = -\frac{h}{k_f}\theta L \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

شرایط محیط بیرون برای شهر یزد در نظر گرفته شده که تاثیر آن در ضریب انتقال حرارت محیط بیـرون (h) و دمـای محیط بیرون (T_∞) آمده است. همچنین میزان شدت تابش خورشید در زمستان برای شهر یزد محاسبه شده (میزان متوسط شار ماهانه) و بر روی مسأله اعمال شده است.

نتایج

حالت دائم

در این حالت، زمان را در معادلات صفر قرار داده و ترم زمان را از معادلات حذف کرده و مسأله به صورت پایدار بررسی می‌شود. علت استفاده از حالت مذکور این است که تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت دیوار، ارتفاع دیوار و ... را مورد بررسی قرار داده و بر اساس ابعاد بهینه بدست آمده، سیستم مورد نظر را برای کارکرد بهتر با در نظر گرفتن کمترین هزینه طراحی کرد. این بررسی برای جنس آجری دیوار (R_k= ۲۴) و شارهای حرارتی ۵۰ w/m^2، ۱۰۰ w/m^2 و ۱۵۰ w/m^2 تکرار می‌شود. همچنین هندسه اولیه مورد بررسی در اینجا به صورت جدول ۱ می‌باشد.

تأثیر پهنای کانال بر عملکرد سیستم

پهنای بهینه کانال تاثیر به سزایی بر عملکرد دیوار ترومب دارد. کاهش بیش از حد آن باعث کاهش دبی جرمی و افزایش افت اصطکاکی درون کانال شده و در عمل باعث کاهش تهویه و گردش هوا می‌شود. در مقابل، افزایش بیش از حد آن اگرچه باعث کاهش افت اصطکاکی کانال می‌شود، ولی در عمل باعث ایجاد جریان برگشتی شده که این امر خود باعث کاهش دبی جرمی و تهویه هوا می‌شود. در نتیجه، انتخاب پهنای بهینه کانال از عوامل مهم در طراحی دیوارهای ترومب می‌باشد. لازم به ذکر است که پهنای کانال همان فاصله هوایی میان دیوار و شیشه (Air gap) است.

جدول ۱: هندسه مسأله برای بررسی عملکرد دیوار ترومب

محل مورد نظر	ابعاد بابعد مسأله (متر)	ابعاد بدون بعد مسأله
ارتفاع دیوار (h_t)	۳/۴	۰/۸۵
پهنای کانال (W_c)	۰/۳	۰/۰۷۵
ارتفاع دریچه‌ها (h_v)	۰/۳	۰/۰۷۵
ضخامت دیوار (W_t)	۰/۲	۰/۰۵

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

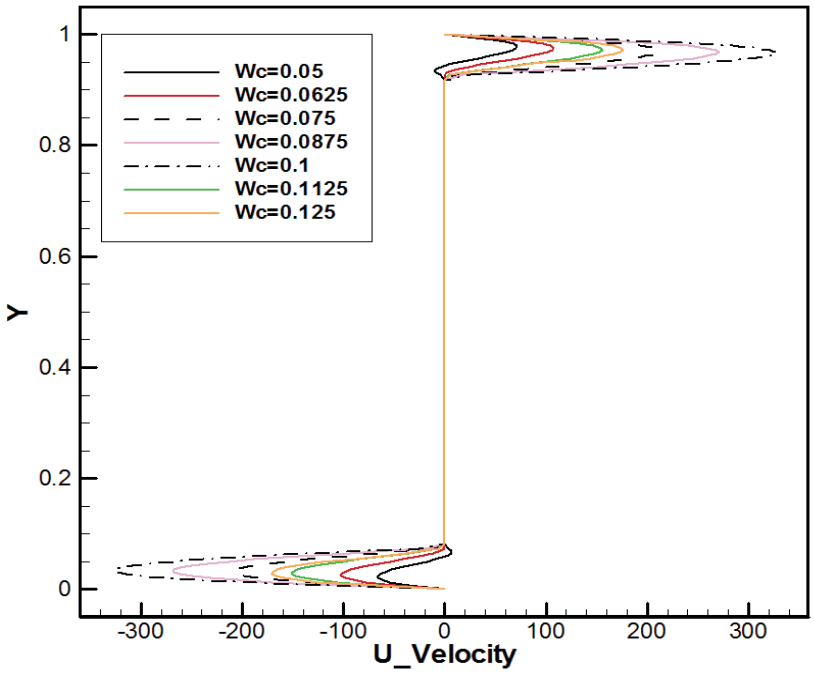
نتایج بدست آمده در این قسمت برای شار حرارتی w/m^2 ۱۰۰، جنس آجری دیوار ترومب و هندسه داده شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پهناهای ۰/۲ الی ۰/۵ متری مورد بررسی قرار گرفته است.

شکلهای ۳ و ۴ به ترتیب میزان سرعت بدون بعد در دریچه‌های بالایی و پایینی دیوار ترومب و دبی جرمی عبوری از دریچه بالایی دیوار ترومب را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، با افزایش پهنای کانال تا میزان خاصی، میزان سرعت داخل کانال، میزان سرعت عبوری از دریچه‌های بالایی و پایینی دیوار ترومب و دبی جرمی عبوری از دریچه بالایی دیوار ترومب افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر پهنای کانال مقدار آنها کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که از شکلهای ۳ و ۴ مشخص است، پهناهای ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۴ متری دبی و سرعت بیشتری نسبت به پهناهای دیگر دارند، ولی با توجه به اینکه دبی عبوری از دریچه‌ها برای این سه پهنا تقریباً یکی است، بر اساس شرایط طراحی محل، بسته به نظر طراح، پهنای بهینه بین پهنای ۰/۳ تا ۰/۴ متر انتخاب می‌شود.

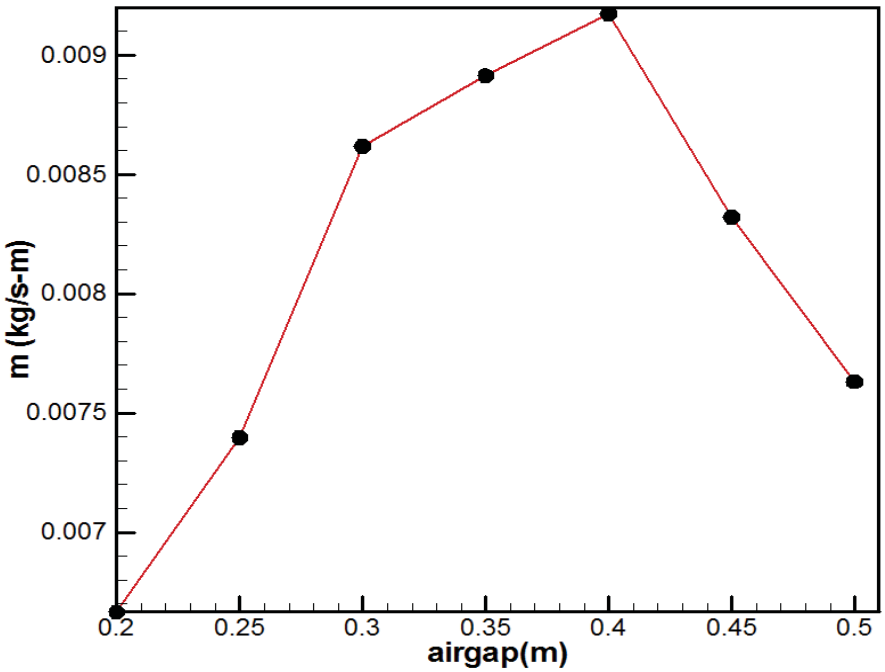
تأثیر ارتفاع دریچه‌های ورود و خروجی بر عملکرد سیستم

در این قسمت، تاثیر ارتفاع دریچه‌ها برای شار حرارتی w/m^2 ۱۰۰، جنس آجری دیوار و هندسه داده شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ارتفاع‌های مورد بررسی در این قسمت در جدول ۲ آمده است. این نکته اینجا قابل توجه است که با تغییر ارتفاع دریچه‌ها، ارتفاع دیوار نیز تغییر می‌کند.



شکل ۳) نمایه سرعت افقی بدون بعد در راستای عمودی کانال و امتداد دیوار ترومب

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]



شکل ٤) میزان دبی جرمی خروجی از دریچه بالایی دیوار ترومب برای پهناهای مختلف کانال

جدول ٢) ارتفاع‌های مورد بررسی

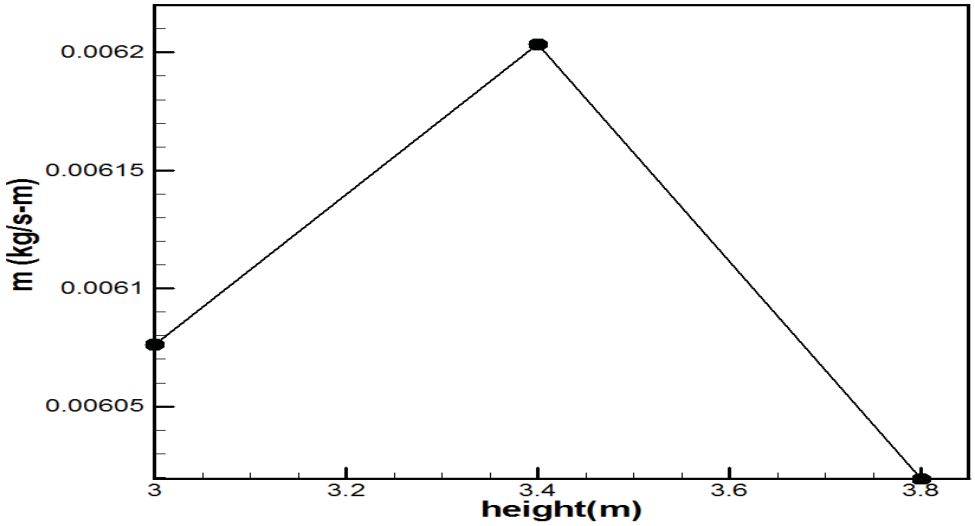
ارتفاع بابعد دریچه‌ها (متر)	۰/۱	۰/۳	۰/۵
ارتفاع بی بعد دریچه‌ها	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۱۲۵
ارتفاع بابعد دیوار (متر)	۳/۸	۳/۴	۳
ارتفاع بدون بعد دیوار	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۵

هر چه ارتفاع دیوار بیشتر شود، سطحی که شار حرارتی خورشید را دریافت می‌کند افزایش می‌یابد. همچنین میزان انرژی حرارتی خورشید که جذب شده بیشتر می‌شود و در نتیجه، سطحی که حرارت را به کانال و فضای اتاق می‌دهد نیز افزایش می‌یابد و باعث افزایش دمای هوای کانال می‌شود. همچنین میزان حرارتی که از طریق هدایت از دیوار به اتاق منتقل شده، بیشتر شده و در نتیجه، دمای اتاق نیز بیشتر می‌شود.

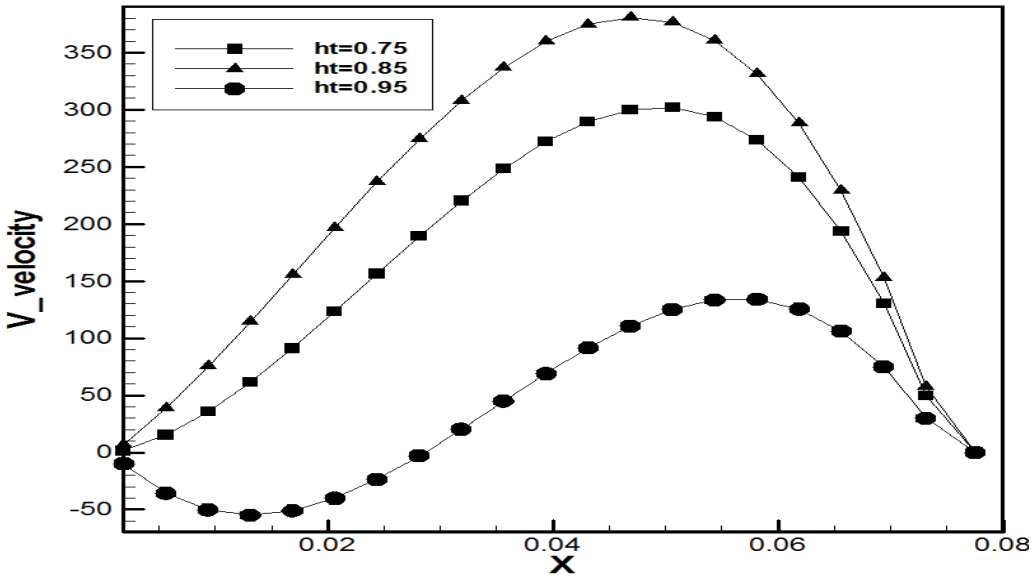
شکلهای ۵ و ۶ نیز گفته‌های قبلی را تصدیق می‌کنند و به عبارتی، با افزایش ارتفاع دیوار تا ارتفاع ۳/۴ متر دبی جرمی افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر با توجه به شکلهای ۵ و ۶ دبی جرمی عبوری از دریچه‌ها و میزان سرعت در وسط کانال

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

کاهش یافته و جابجایی آزاد هم کاهش می‌یابد. در نتیجه، بر اساس مقادیر دبی و سرعت بدست آمده در شکلهای ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع ۳/۴ متری دیوار بهترین عملکرد را دارد.



شکل ۵) تغییرات دبی جرمی عبوری از دریچه بالایی دیوار ترومب با افزایش ارتفاع دیوار



شکل٦) نمایه سرعت عمودی بدون بعد در وسط کانال (Y=0.5) با افزایش ارتفاع دیوار

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

تأثیر ضخامت دیوار بر عملکرد سیستم

مسأله در اینجا برای شار حرارتی ۱۰۰ w/m^2، جنس آجری (R_k= ۲۴) و هندسه داده شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.همچنین ضخامت‌های مورد بررسی در این قسمت در جدول ۳ آمده است. باید به این نکته توجه کرد که در این قسمت،پهنای کانال ثابت است و ضخامت دیوار از سمت اتاق افزایش می‌یابد.

جدول ۳) ضخامت‌های مورد بررسی

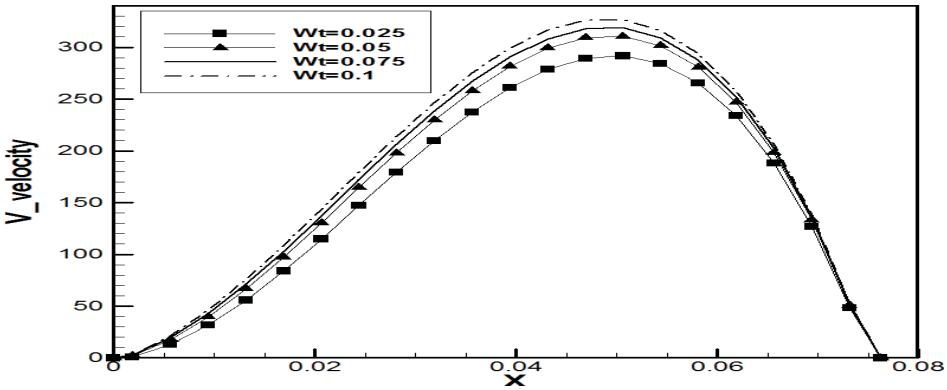
ضخامت بابعد دیوار (متر)	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴
ضخامت بدون بعد دیوار	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۱

با افزایش ضخامت دیوار ترومب، دمای اتاق افزایش یافته و باعث افزایش جابجایی طبیعی نیز می‌شود. هر چه ضخامت دیوار بیشتر می‌شود، میزان انرژی ذخیره شده در دیوار ترومب نیز بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت دیوار، سطحی که حرارت خورشید را به اتاق منتقل می‌کند افزایش یافته و در نتیجه، حرارت بیشتری به اتاق منتقل شده و باعث بالا رفتن دمای اتاق می‌شود.

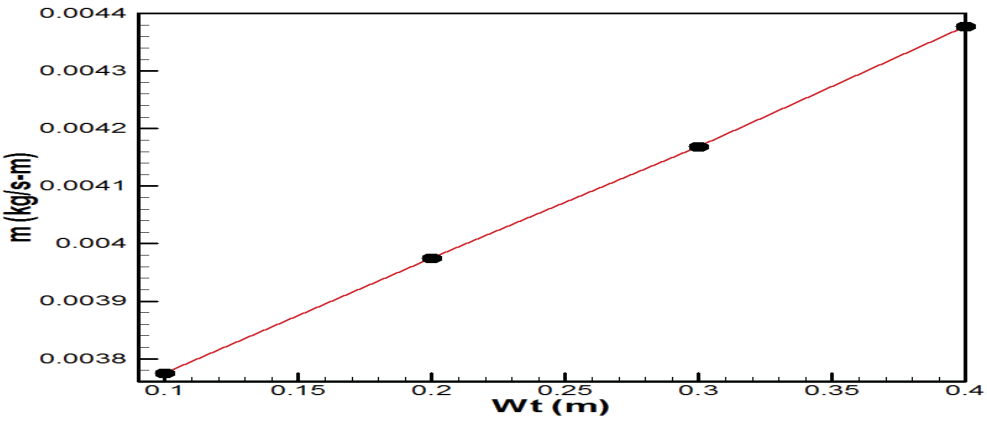
شکل ۷ نمایه سرعت عمودی بدون بعد در وسط کانال را مشخص می‌کند. همان طور که قبلاً دیده شد، با افزایش ضخامت دیوار ترومب میزان شار حرارتی دریافتی بیشتر شده و دمای دیوار نیز افزایش یافته و در نتیجه، گرمای بیشتری از دیوار به کانال منتقل می‌شود و اختلاف دمای مابین کانال و اتاق بیشتر شده که این امر باعث افزایش نیروهای شناوری و افزایش سرعت داخل کانال شده و در نتیجه، جابجایی آزاد افزایش می‌یابد که این امر خود باعث افزایش تهویه و گردش هوا داخل اتاق می‌شود. نتایج حاصل از شکل ۷ بیانگر همین موضوع است که با افزایش ضخامت دیوار، میزان سرعت داخل کانال افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۸ میزان دبی جرمی خروجی از دریچه بالایی کانال را نشان می‌دهد و همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزایش ضخامت دیوار میزان دبی جرمی نیز افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت‌های ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ متری عملکرد خوبی از لحاظ سرعت و دبی جرمی دارند، ولی با توجه به اینکه این ضخامت‌ها میزان سرعت و دبی جرمی نزدیک به هم دارند و با توجه به اینکه افزایش بیش از حد ضخامت دیوار باعث کاهش فضای مسکونی و افزایش هزینه ساخت می‌شود، بسته به نظر طراح، ضخامت بهینه دیوار بین ۰/۲ تا ۰/۴ متر انتخاب می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]



شکل ۷) نمایه سرعت عمودی بدون بعد در وسط کانال (Y=0.5)



شکل ۸) تغییرات دبی جرمی عبوری از دریچه بالایی دیوار ترومب به ازای ضخامتهای مختلف دیوار

حالت غیردائم

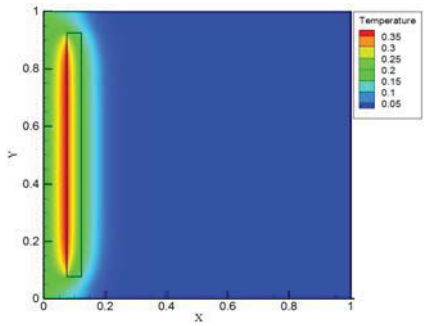
در این حالت، ترم‌های زمان در معادلات در نظر گرفته شده و محاسبات بر اساس آنها انجام شده است. نتیجه‌ای که در این قسمت از اهمیت خاصی برخوردار بوده و در این حالت در نظر گرفته شده است، میزان انرژی ذخیره شده در دیوار است. بر اساس انرژی ذخیره شده در دیوار، میزان ساعاتی که این انرژی ذخیره شده فضای اتاق را در نبود تابش خورشید گرم نگاه می‌دارد، محاسبه شده است.

هندسه مورد بررسی در اینجا بر اساس ابعاد بهینه بدست آمده انتخاب شده که در جدول ۱ آورده شده است. به علت یکسان بودن روند تغییرات، نتایج فقط برای شار حرارتی $۱۰۰w/m^2$ آورده شده است.

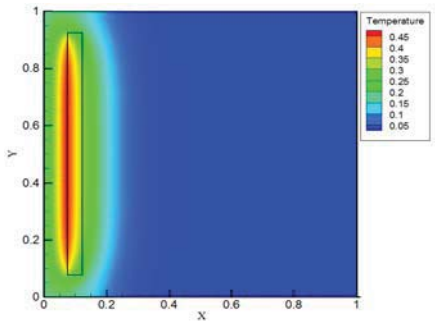
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

شکل‌های ۹ الی ۱۴ نشان‌دهنده توزیع دما و پروفیل دما برای شار حرارتی $۱۰۰w/m^2$ در زمان‌های مختلف می‌باشند. همان‌طور که از شکل‌های ۹ الی ۱۱ مشخص است، در زمان‌های اولیه فقط کانال گرم شده و دمای کانال، دیوار و فضاهای نزدیک دیوار از بقیه جاها بیشتر است. همان‌طور که از خطوط دما ثابت نیز مشخص است، در زمان‌های ابتدایی تراکم خطوط دما ثابت در اطراف دیوار و داخل کانال بیشتر است که بیانگر گرادیان دمای بیشتر در این قسمت‌ها نسبت به بقیه قسمت‌های اتاق می‌باشد و همچنین با توجه به خطوط دما ثابت می‌توان نتیجه گرفت که در این زمان‌ها، انتقال حرارت غالب، هدایت است و کانال و دیوار به اندازه کافی گرم نشده‌اند تا خطوط جریان داخل اتاق شکل گیرند و انتقال حرارت از طریق جابجایی صورت پذیرد.

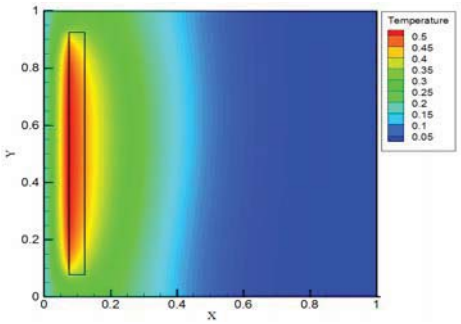
در شکل‌های ۱۲ الی ۱۳، با گذشت زمان دمای دیوار افزایش یافته و فضای اتاق نیز با گذشت زمان گرم‌تر شده تا به میزان حداکثر خود می‌رسد. همان‌طور که از توزیع دما مشخص است، در این زمان‌ها هوای گرم کانال از طریق جابجایی و گرمای دیوار از طریق هدایت به اتاق منتقل شده و فضای اتاق نیز گرم می‌شود و در زمان‌های انتهایی تقریباً دمای سمت چپ و راست دیوار یکسان شده و دیوار در زمان‌های انتهایی شروع به ذخیره انرژی کرده تا در زمان‌های انتهایی روز که تابش خورشید نیست، از این انرژی استفاده شود.



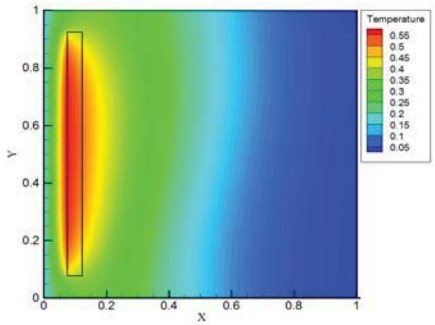
شکل ۹) توزیع دما و خطوط دما ثابت در زمان t=100s



شکل ۱۰) توزیع دما و خطوط دما ثابت در زمان t=500s

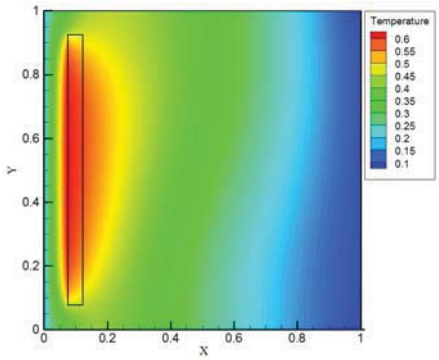


شکل ۱۱) توزیع دما و خطوط دما ثابت در زمان t=1000s



شکل ۱۲) توزیع دما و خطوط دما ثابت در زمان t=2000s

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

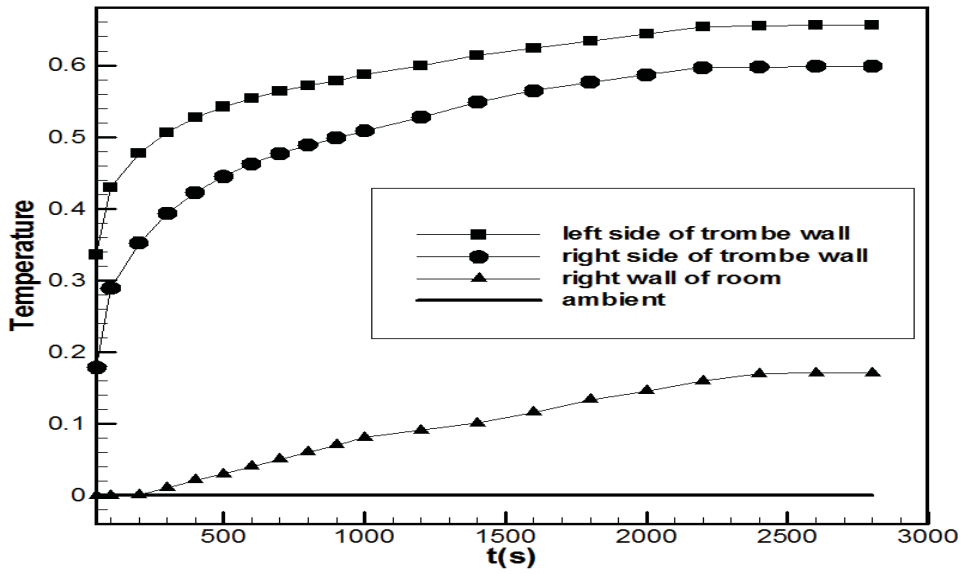


شکل ۱۳) توزیع دما و خطوط دما ثابت در زمان t=3200s (رسیدن به حالت دائم)

شکل ۱۴ توزیع دما در نقطه وسط دیواره سمت چپ و دیواره سمت راست دیوار ترومب و همچنین در نقطه وسط دیوار سمت راست اتاق را در طی زمان برای شار حرارتی $۱۵۰w/m^2$ نشان می‌دهد. در اینجا به علت یکسان بودن روند تغییرات، توزیع دما فقط برای یک شار حرارتی رسم شده است.

همان طور که از شکل مشخص است، دما در نقطه وسط دیواره سمت چپ دیوار ترومب با گذشت زمان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جذب انرژی حرارت خورشید در طی ساعات مختلف روز توسط دیوار می‌باشد، ولی همان طور که از شکل مشخص است، در ساعات ابتدایی روز تغییرات دمایی دیوار زیاد است، ولی با گذشت زمان، تغییرات دما کم شده تا به یک میزان ثابتی می‌رسد و علت هم این است که با گذشت زمان دمای دیوار افزایش یافته ولی در زمان‌های انتهایی به علت برابر شدن انرژی ورودی و خروجی به دیوار (به تعادل رسیدن سیستم)، دمای دیوار تقریباً ثابت شده و تغییرات شدیدی ندارد. همچنین دمای دیواره سمت راست دیوار ترومب با گذشت زمان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جذب شار حرارتی توسط دیوار در طی روز و انتقال حرارت هدایتی در دیوار می‌باشد، ولی دمای سمت راست دیوار ترومب نسبت به سمت چپ آن کمتر است و علت هم این است که سمت چپ در معرض شدت تابش خورشید می‌باشد. همچنین شکل ۱۴ توزیع دما در نقطه وسط دیوار سمت راست اتاق را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در زمان‌های ابتدایی انتقال حرارت اغلب به صورت هدایت می‌باشد. در نتیجه، دمای سمت راست اتاق زیاد افزایش نیافته و پایین است که این نتیجه از شکل ۱۴ نیز مشخص است، در صورتی که در زمان‌های انتهایی انتقال حرارت اغلب به صورت جابجایی است که همین امر باعث شده که دمای سمت راست اتاق افزایش یافته و بیشتر شود و افزایش دما در آن، نشان‌دهنده شکل گرفتن ترموسیرکولیشن در طی روز در اتاق می‌باشد و علت هم این است که اگر چرخش هوا داخل اتاق شکل نگیرد، هوای گرم به داخل اتاق منتقل نشده و دمای دیوار سمت راست اتاق گرم نمی‌شود و به علت جابجایی آزاد آن با محیط بیرون، سرد باقی می‌ماند. در نتیجه، گرم شدن دمای دیوار سمت راست نشان دهنده شکل گرفتن و چرخش جریان هوای گرم داخل اتاق می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]



شکل ١٤) دمای بدون بعد در نقطه وسط دیواره‌های چپ و راست دیوار ترومب و دیوار سمت راست اتاق در طی زمان

میزان انرژی ذخیره شده

از مسائل مهم در بررسی دیوارهای ترومب، میزان انرژی حرارتی ذخیره شده در دیوار می‌باشد که بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

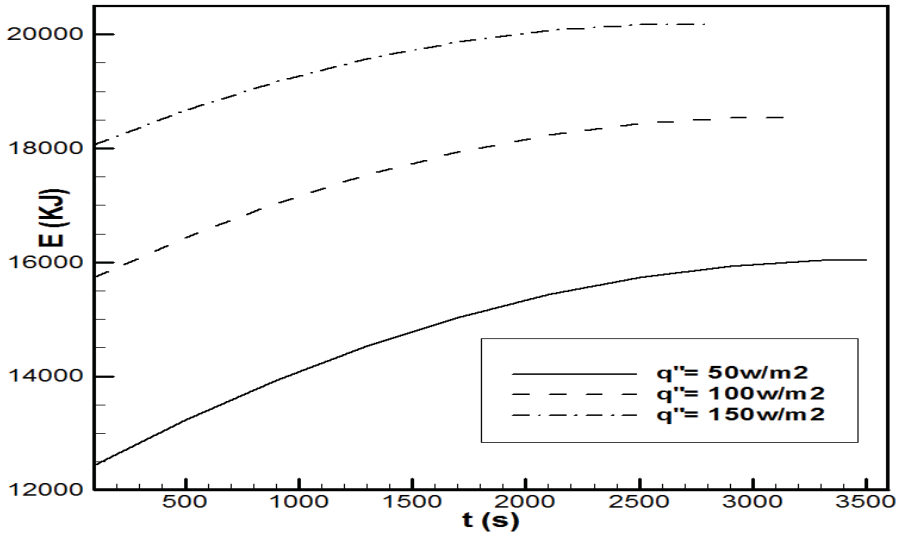
$$E = mc(T - T_0) \quad (۱۷)$$

بر اساس رابطه بالا، باید این انرژی را برای هر نقطه دیوار محاسبه و با هم جمع کرد تا انرژی ذخیره شده در دیوار برای هر زمان به دست آید. در نتیجه، بر اساس توضیحات داده شده، نتیجه می‌شود:

$$E = \sum \rho_{brick} c_{brick} \Delta x \Delta y (T_i - T_0) \quad (۱۸)$$

شکل ١٥ میزان انرژی ذخیره شده در دیوار را بر حسب زمان و برای شارهای حرارتی ٥٠، ١٠٠ و ١٥٠w/m^2 نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، با گذشت زمان، میزان انرژی ذخیره شده در دیوار افزایش می‌یابد. علت این است که با گذشت زمان دمای اتاق افزایش یافته و دمای کانال و اتاق به حالت تعادل می‌رسد. در نتیجه، در این مرحله، حرارت به میزان اندک از دیوار به اتاق منتقل شده و بیشتر حرارت در دیوار ذخیره می‌شود. بنابراین، میزان انرژی ذخیره شده در دیوار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شار حرارتی نیز میزان انرژی ذخیره شده در دیوار بیشتر می‌شود، چون با افزایش شار حرارتی دمای دیوار نیز افزایش یافته و در نتیجه، میزان انرژی ذخیره شده در آن نیز افزایش می‌یابد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]



شکل ۱۵) میزان انرژی ذخیره شده در دیوار بر حسب زمان برای شارهای مختلف

با توجه به تلفات انرژی که از رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود و با توجه به میزان ذخیره انرژی، می‌توان مدت زمانی که این انرژی ذخیره شده اتاق را گرم نگاه می‌دارد (در زمانی که خورشید نیست) از طریق رابطه ۲۱ محاسبه نمود. تلفات حرارتی، بر اساس جابجایی آزاد اتاق با محیط اطراف و تلفات حرارت هدایتی اتاق با محیط بیرون محاسبه می‌شود. رابطه محاسبه تلفات حرارتی بر اساس معادله زیر می‌باشد:

$$Q_L - hA(T_{right} - T_\infty) + h_i A(T_{avgi} - T_{glass}) \quad (۱۹)$$

در محاسبه تلفات انرژی حرارتی، T_{right} معرف دمای متوسط دیوار سمت راست اتاق، T_{avgi} دمای متوسط داخل کانال، T_{glass} دمای شیشه، h ضریب انتقال حرارت محیط بیرون و h_i ضریب انتقال داخل کانال می‌باشد. اگر تلفات انرژی محاسبه شده در رابطه ۲۰، برای ۱ ثانیه عملکرد سیستم باشد، در نتیجه، میزان تلفات انرژی برای ۱ ساعت کار سیستم، به صورت عبارت مخرج رابطه ۲۱ می‌باشد. بر اساس موارد ذکر شده، مدت زمانی که انرژی ذخیره شده توانایی گرم کردن اتاق را دارد برای شارهای حرارتی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰w/m^2 محاسبه شده (رابطه ۲۱) و در جدول ۴ آورده شده است.

$$t = {Q_H}/{(Q_L \times 3600)} \quad (۲۰)$$

همان طور که از جدول ۲ مشخص است، با افزایش شار حرارتی مدت زمانی که انرژی ذخیره شده توانایی گرم کردن اتاق را در نبود تابش خورشید دارد، افزایش می‌یابد و نشان‌دهنده این است که هر چه شار حرارتی افزایش یابد، مدت زمان گرم نگاه داشتن اتاق نیز افزایش می‌یابد. این نتایج بیانگر آن است که عملکرد سیستم خوب است و سیستم توانایی گرم

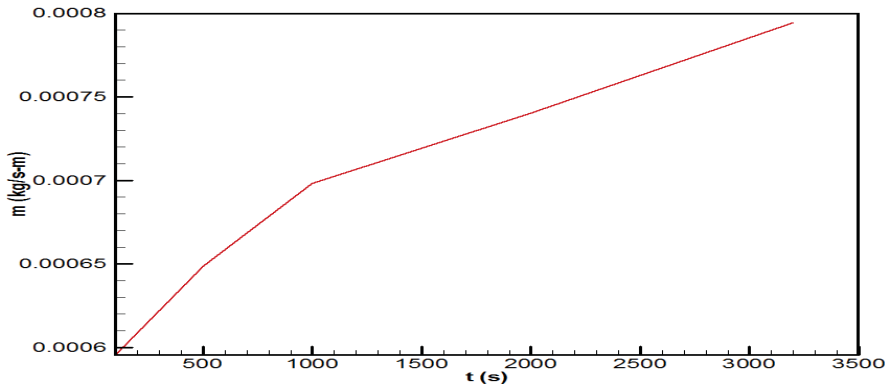
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

نگاه داشتن اتاق را تقریباً تا ۷ ساعت دارد، ولی می‌توان این زمان را با تغییر جنس دیوار و افزایش عایق‌کاری دیوارهای اتاق افزایش داد.

جدول ٤) مدت زمانی که انرژی ذخیره شده در نبود تابش خورشید توانایی گرم کردن اتاق را دارد

شار حرارتی q'' (w/m^2)	t(h)
$w/m^2$50	6.80
$w/m^2$100	7.05
$w/m^2$150	7.16

شکل ۱۶ میزان دبی جرمی خروجی از دریچه بالایی دیوار ترومب در زمان‌های مختلف و برای شار $q''=100\ w/m^2$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان، میزان دبی جرمی افزایش می‌یابد و علت هم همان طور که قبلاً هم گفته شده، این است که با گذشت زمان دمای دیوار افزایش یافته و در نتیجه اختلاف دمای مابین کانال و فضای سرد اتاق بیشتر شده و باعث افزایش سرعت داخل کانال و میزان سرعت عبوری از دریچه بالایی دیوار ترومب می‌شود که این امر خود باعث افزایش دبی جرمی می‌شود.



شکل ١٦) میزان دبی جرمی خروجی از دریچه بالایی دیوار در زمانهای مختلف

نتیجه گیری

از مهم‌ترین مزایای سیستم دیوار ترومب استفاده از انرژی خورشیدی (انرژی‌های نو) جهت گرمایش ساختمان می‌باشد که این عمل باعث کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، ذخیره منابع سوختی و کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که با شروع به کار سیستم، دمای دیوار و فضاهای اطراف آن از بقیه نقاط اتاق بیشتر شده و با گذشت زمان دمای دیوار افزایش یافته و در کنار آن دمای اتاق نیز از طریق هدایت از دیوار و هم از طریق جابجایی آزاد افزایش می‌یابد. در زمان‌های انتهایی، دمای هوای اتاق و دمای هوای کانال به تعادل رسیده و در این زمان‌ها حرارت بیشتر

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

به صورت انرژی ذخیره شده در دیوار در می‌آید. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، جنس آجری دیوار ترومب توانایی گرم نگاه داشتن اتاق را در نبود تابش خورشید، برای مدت زمان تقریبا ۷ ساعت دارد.

همچنین حداکثر دما برای این شار $^{\circ}c$ ۴۰ و روی جاذب متصل به دیوار ترومب حاصل می‌گردد. همچنین حداقل دما $^{\circ}c$ ۲۹ و در سمت راست اتاق می‌باشد در حالی که دمای محیط بیرون $^{\circ}c$ ۱۰ در نظر گرفته شده است. این سیستم در کاهش یا افزایش رطوبت هیچگونه نقشی ندارد و مقدار رطوبت ثابت باقی می‌ماند.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی شرکت ملی پخش و فرآورده‌های نفتی صورت گرفته است. ضمناً نهایت تشکر از زحمات و همکاری‌های مهندس امیر بنی کریمی مدیر عامل شرکت ملی نفت واحد یزد به عنوان مشاور صنعتی این طرح را داریم.

فهرست علائم

این مقاله با حمایت مالی شرکت ملی پخش و فرآورده‌های نفتی صورت گرفته است. ضمناً نهایت تشکر از زحمات و

مساحت (m^2)	A	بردار شتاب ثقل (m/s^2)	g
فشار (pa)	P	عدد پرانتل	Pr
نسبت ضریب هدایت حرارتی جامد به سیال	R_k	عدد رایلی $\frac{g\beta(T_h-T_c)}{\alpha\nu}$	Ra
دما (^{o}k)	T	مولفه های سرعت (m/s)	u,v
ضریب انبساط حجمی ($1/^{o}k$)	β	چگالی (kg/m^3)	ρ
دمای بدون بعد	θ	انرژی داخلی (kj/kg)	i
ضریب انتقال حرارت مایع (W/m – k)	k_f	ضریب جابجایی ($W/m^2 - k$) h	
ضریب انتقال حرارت جامد (W/m – k)	k_s	دمای محیط بیرون(^{o}k)	T_∞
گرمای ویژه در فشار ثابت (kJ/kg K)	C_p		

منابع

[1] Abdul Jabbar N. Khalifa and Ehsan F. Abbas, 2009, “A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating”, *Energy and Buildings*, Vol.41, pp.407–415.

[2] Arvind Chel, J.K.Nayak and Geetanjali Kaushik, 2008, “Energy conservation in honey storage building using Trombe wall”, *Energy and Buildings*, Vol.40, pp.1643–1650.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]

[3] B. Chen, X. Chen, Y.H. Ding and X. Jia, 2006, "Shading effects on the winter thermal performance of the trombe wall air gap", *Renewable Energy*, Vol.31, pp.1961–1971.

[4] Fu-Yun Zhao, Guang-Fa Tang, Di Liu, 2006, "Conjugate natural convection in enclosure with external and internal heat sources", *International Journal of Engineering Science*, Vol.44, pp.148–165.

[5] Huseyin Onbasioglu and A.Nilufer Egrican, 2002, "Experimental approach to the thermal response of passive systems", *Energy Conversion and Management*, Vol.43, pp.2053–2065..

[6] Nwachukwu Paul Nwosu, 2010, "Trombe wall redesign for a poultry chick brooding application in the equatorial region elements", *International Journal of Sustainable Energy*, Vol.29, pp.37–47.

[7] Nwosu P. Nwachukwu and Wilfred I. Okonkwo, 2008, "Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a trombe wall system", *Energy and Buildings*, Vol.40, pp.371–374.

[8] Wang Liping and Li Angui, 2006, "A numerical study of trombe Wall for enhancing stack ventilation in building", The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland.

[9] Y Li, X Duanmu, Y Sun, J Li and H Jia, 2007, "Study on the air movement character in solar wall system", College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, China.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-29]