

# بررسی تأثیر سرعت هوای کانال و شدت تابش خورشیدی بر بهبود عملکرد سیستم گرمایشی دیوار ترمب

آرش نجفی<sup>۱\*</sup>، سیدحسین هاشمی<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۳

پیام‌نگار: arash\_najafi@hotmail.com

## چکیده

امروزه سیستم گرمایشی دیوار ترمب یکی از مهمترین فناوری‌های غیرفعال خورشیدی به منظور کاهش مصرف انرژی شناخته شده است. کارآیی مطلوب دیوار ترمب تحت تأثیر عواملی چون شدت تابش خورشیدی، نوع شیشه و جریان همرفت مجرای هواست. به همین دلیل، در این مقاله اثر تغییرات سرعت جریان هوا با توجه به شدت تابش مورد نظر بر تغییرات دمای شیشه و دیوار ترمب به صورت عددی بررسی شده است. نتایج این پژوهش از افزایش دمای شیشه و کاهش دمای دیوار ترمب بر روند افزایشی سرعت جریان هوای مجرای هوا تأکید می‌ورزد، به گونه‌ای که دمای بهینه دیوار ترمب با توجه به افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۱۴ تا ۱/۲ متر بر ثانیه با کاهش دمایی به میزان ۰/۸۱ درجه سلسیوس همراه خواهد بود. این درحالی است که دمای بهینه شیشه در این افزایش سرعت هوا، به میزان ۰/۸۳ درجه سلسیوس افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** دیوار ترمب، انرژی خورشیدی، ذخیره‌سازی انرژی، سرعت جریان هوا، شدت تابش خورشیدی.

## ۱. مقدمه

عرض شمالی واقع است و از لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در موقعیت مناسبی قرار دارد. آمارها حاکی از متوسط سالیانه برقراری بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در ایران است که با ارزش و قابل توجه است [۱ و ۲].

با توجه به تجدیدنپذیری و آلوده‌سازی سوخت‌های فسیلی، معماری پایدار به عنوان راهکاری کارآمد با بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر در جهت ارائه راه‌حل مشکلات پیش رو در زمینه جایگزینی سوخت‌های فسیلی و بهینه‌سازی مصرف انرژی مطرح شده است. هدف همه سیستم‌های گرمایشی خورشیدی ذخیره‌سازی گرما

امروزه بحران انرژی، با افزایش بی‌رویه مصرف سوخت‌های فسیلی و محدود بودن منابع و نیز هزینه روبه رشد آن، به نگرانی‌هایی در سطح جهانی دامن زده است. از این‌رو، اتخاذ راهکارهای مناسب در زمینه مدیریت انرژی، کانون توجه سازمان‌های مربوطه است. انرژی خورشید یکی از منابع پاک و بدون آثار ویرانگر زیست محیطی به شمار می‌آید که در چند دهه اخیر توجه بیشتری به آن مبذول شده است. کشور ایران در میان مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه

\* اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

در تحقیقات جابر و همکارانش [۹] به اهمیت این موضوع اشاره شده است. بنابر نتایج کار تحقیقاتی آنها، در صورتی که نسبت سطح دیوار ترمب به کل دیوار به میزان ۲۰٪ مورد نظر باشد؛ میزان ذخیره گرمایی مطلوب در طول سال ۲۲/۳٪ است. این در حالی است که در صورت به کارگیری نسبت سطح دیوار به کل دیوار به میزان ۳۷٪ می توان میزان ذخیره انرژی گرمایی ۳۲/۱٪ را، در طول سال انتظار داشت.

ازبالتا و کارتال [۱۰] به منظور اهمیت رنگ بر عملکرد دیوار ترمب مطالعات خود را انجام دادند. آنان در این مطالعه، سه رنگ روشن، تیره و طبیعی را با توجه به سه نوع دیوار ( آجری، بتونی و بتونی اتوکلاو تهویه دار) در کشور ترکیه ارزیابی کردند. براساس مطالعه آنها، میزان گرمای ذخیره شده در طول سال براساس رنگ به کار رفته برای دیوار بتونی از ۹/۷٪ تا ۲۶/۹٪، و برای دیوار آجری به میزان ۷/۱٪ تا ۲۰/۵٪ بوده است. برای دیوار بتونی اتوکلاو تهویه دار نیز به میزان ۴/۳٪ تا ۱۳٪ مورد توجه بوده است.

مواد مصرفی در طراحی سیستم گرمایشی دیوار ذخیره ساز انرژی گرمایی با توجه به موضوع ذخیره سازی بهینه گرما، همواره به عنوان عاملی مهم در جهت عملکرد مطلوب دیوار ترمب مدنظر بوده است [۱۱ و ۱۲]. حسینیان و همکارانش [۱۳] به منظور بررسی تأثیرگذاری مواد دیوار ترمب در بهبود سیستم گرمایشی دیوار ترمب مطالعات تجربی را انجام دادند. آنان در این مطالعه تاثیرات مواد متفاوت آجر خام را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مواد مختلف آجر خام می تواند سیستم دیوار ترمب را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد.

بهره گیری از شیشه مناسب یکی از عوامل تأثیرگذار در بهبود عملکرد گرمایشی سیستم دیوار ذخیره ساز انرژی گرمایی به شمار می آید. بنابر گزارش ها، شیشه های دوجداره یکی از مؤثرترین نوع شیشه به کار رفته در سیستم دیوار ترمب بوده است [۱۴]. ریچمان و پرسنایل [۱۵] یک مدل جدید شیشه کاری را، با به کارگیری فیلم روکش low-e در کشور کانادا ارائه دادند. در این مدل با توجه به کاهش پرتو افشانی، بهبود بازدهی سیستم دیوار ترمب در ساختمان محسوس بوده است.

دیوار ترمب از جمله فناوری هایی نو در طراحی ساختمان های سبز در مهندسی معماری است [۱۶] و کاربرد دیوار ترمب در آب و هوای مدیترانه ای مطالعه شده است و نتایج نشان داده که ساختمان

توسط مصالح ساختمانی و رهاسازی آن در زمان هایی است که تابش خورشید وجود ندارد. هنگامی که مصالح ساختمانی گرما را برای مصارف بعدی ذخیره می کنند، فضای مطلوبی را برای داخل خانه فراهم می آورند. دیوار ترمب امروزه یکی از راهکارهای مقرون به صرفه و کارآمد به منظور بهره گیری مطلوب از انرژی خورشیدی برای گرمایش ساختمان هاست. گزارش های موجود [۳] حاکی از تأثیرگذاری چشمگیر فناوری دیوار ترمب در کاهش مصرف انرژی گرمایی به میزان ۴۷٪ در موارد مسکونی است. علاوه بر این، دیوار ترمب در تابستان نیز می تواند گرمای نامطلوب دریافتی را کاهش دهد و پدیده گرمادهی زیاد در تابستان را کنترل کند [۴].

یکی از فناوری های مهم در حوزه معماری پایدار به منظور کاهش مصرف انرژی، سیستم گرمایشی دیوار ترمب است که در چند دهه اخیر بسیاری از پژوهشگران مطالعات زیادی از جمله آرویند چل و همکارانش [۵]، ویلفرد اوکانکو و همکارش [۶] و همچنین نواچوکوا [۷] بر روی آن انجام داده اند. آرویند چل و همکارانش عملکرد دیوار ترمب را به منظور کاهش بار گرمایی ساختمان مطالعه کردند. نتایج پژوهش آنها حاکی از آن بود که می توان شرایط بهینه گرمایی را در فضای اتاق در بازه دمایی ۱۸/۵ تا ۲۲/۸ درجه سلسیوس، با توجه به سیستم دیوار ترمب انتظار داشت. ویلفرد اوکانکو و همکارش کار تحقیقاتی خود را با توجه به آثار وجود یک صفحه جاذب با فاصله متغیر نسبت به دیوار ذخیره ساز انرژی گرمایی انجام دادند. نتایج مطالعات آنها به افزایش بازدهی جذب و انتقال در دیوار ترمب، با توجه به افزایش قابلیت جاذب در جذب گرما، اشاره دارد. نواچوکو نیز با توجه به شدت تابش خورشیدی و با در نظر گرفتن دیوار ترمب به صورت نیمکره، بهبود کارایی دیوار ترمب را بررسی کرده است. بنابر نتایج پژوهش نواچوکو، بهبود عملکرد سیستم دیوار ترمب با توجه به دیوار ترمب نیمکره ای قابل توجه است.

بسیاری از پژوهشگران، به منظور بهبود بخشیدن عملکرد سیستم گرمایشی دیوار ترمب با در نظر گرفتن خواص مهم دیوار ترمب، از جمله نسبت مساحت دیوارهای ترمب به کل دیوار، رنگ و مواد دیوار کارهای تحقیقاتی خود را انجام دادند. نسبت سطح دیوارهای ترمب به کل دیوار، در حکم یکی از شاخص های مهم در بهبود عملکرد گرمایشی دیوار ترمب مطرح بوده است [۸]، به گونه ای که

خورشیدی مقرون به صرفه و کارآمد در مهندسی ساختمان، به منظور بهره‌گیری مطلوب از انرژی خورشیدی به‌شمار می‌آید [۱۹]. این سیستم دارای دو جزء مهم، انباشتگر گرمایی و شیشه است. شیشه یکی از اجزای مهم در سیستم گرمایشی دیوار ترمب محسوب می‌شود. مقاومت شیشه و عایق بودن آن تا حد زیادی به طول موج تابش عبوری از آن بستگی دارد. شیشه آرمانی برای این سیستم باید دارای شاخصه‌هایی، از جمله مقاومت زیاد در برابر سایش و تغییرات آب و هوا، و از همه مهمتر، پایداری گرمایی پرمانند باشد. جزء قابل توجه و با ارزش دیگر، دیوار انباشتگر گرمایی است که انتخاب جنس آن به خواص گرمایی و هزینه مصرفی برای آن بستگی دارد. از موارد مصرف شده به عنوان انباشتگر گرمایی می‌توان بتن، آجر، آب، سنگ را برشمرد. به طور کلی، میزان انباشت و انتقال گرمایی دیوار ترمب به چگالی، رسانایی، گرمای ویژه و ظرفیت گرمایی آن مربوط است [۲۰].

در شکل (۱) سیستم گرمایشی دیوار ترمب را، به منظور ارائه مدل مورد نظر مشاهده می‌کنید.

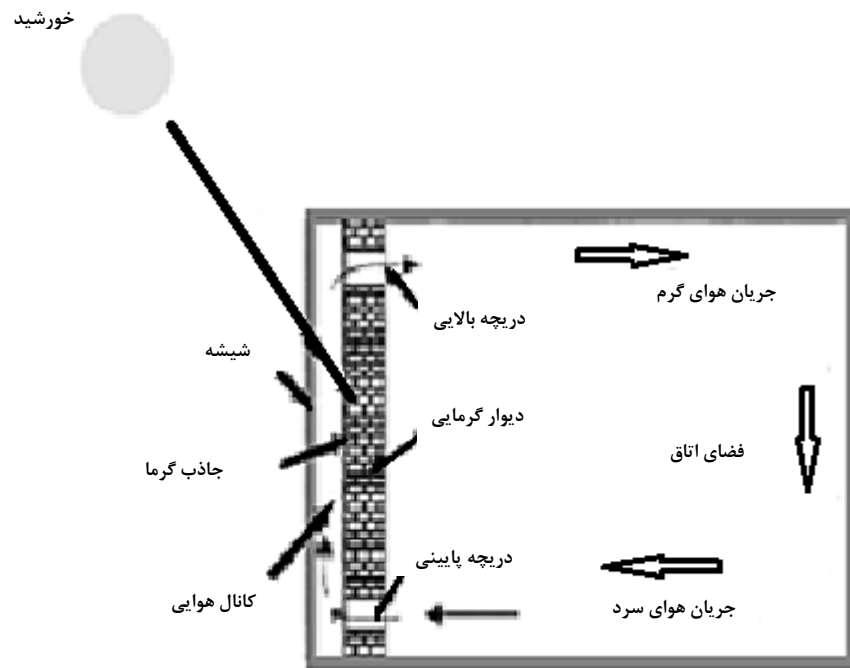
با توجه به طرح نموده شده در شکل (۱)، ابتدا تابش خورشیدی با امواج کوتاه به سطح دیوار ترمب برخورد خواهد کرد که دیوار ترمب مقداری از این شدت تابش مورد نظر را دریافت کرده و مابقی آن را با امواجی با طول موج بلند به صورت تابش ثانویه باز می‌تاباند. از این‌رو، شیشه به صورت یک مانع گرمایی، مقداری از تابش ثانویه را به کانال هوایی باز می‌گرداند که این شدت تابش، گرمایش کانال هوایی (فضای بین دیوار و شیشه) را تأمین می‌کند، به گونه‌ای که هوای گرم با توجه به سبکی در کانال هوایی به بالا حرکت می‌کند و از دریچه بالایی به فضای اتاق وارد می‌شود و بعد از مدتی با توجه به سرد شدن هوای گرم اتاق (به بیان دیگر، سنگین‌تر شدن جریان هوا)، جریان هوای اتاق به سمت پایین اتاق جاری می‌شود و از دریچه پایینی به فضای کانال هوایی وارد می‌شود و این چرخه تا وقتی شدت تابش خورشیدی گرمایش کانال هوایی را تأمین می‌کند، ادامه می‌یابد. این در حالی است که بقیه شدت تابش ثانویه از شیشه عبور می‌کند و به محیط بیرون گسیل می‌شود. شب‌هنگام، این سیستم انرژی مورد نیاز برای گرمایش فضای اتاق را، با توجه به بسته بودن دریچه‌های طراحی شده دیوار ترمب، از طریق گرمای ذخیره شده در دیوار تأمین خواهد کرد.

مسکونی با این دیوار دارای توجیه اقتصادی است [۹]. تحقیقات تجربی نیز در این زمینه اجرا [۱۷] و در زمینه مدل‌سازی نیز برخی کارها انجام شده است؛ البته، بررسی بر روی کیفیت دیوار ترمب بوده است [۱۸].

در این مقاله، با توجه به ضرورت و اهمیت کاربرد فناوری نو دیوار ترمب و نبود تحلیل دقیق درباره ارتباط شدت تابش کافی و سرعت جریان هوای کانال هوا بر عملکرد سیستم گرمایشی دیوار ترمب در کار مطالعاتی پژوهشگران پیشین، به منظور افزایش بازده گرمایش سیستم دیوار ترمب، یک مدل عددی اصلاح شده ارائه می‌شود. در این پژوهش، با توجه به مدل اصلاح شده، تغییرات دمای شیشه و دیوار ترمب با توجه به عوامل اثرگذار، از جمله سرعت جریان هوای کانال (مجرای) هوایی و شدت تابش خورشیدی بررسی خواهد شد. از آنجا که در کار مطالعاتی پژوهشگران پیشین، بهینه‌سازی عوامل تأثیرگذار بر سیستم گرمایشی دیوار ترمب از جمله تغییرات سرعت جریان هوا در کانال هوایی و ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال کمتر مورد توجه بوده، در این پژوهش نیز تغییرات سرعت جریان هوا در کانال هوایی (با توجه به تغییرات پهنای کانال و ارتفاع دیوار گرمایی) و ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال (با توجه به پهنای کانال و عدد رینولدز جریان هوای کانال) دقیق‌تر تحلیل خواهد شد. در این مطالعه، به منظور بهینه‌سازی بهره‌گیری از تابش آفتاب برای گرمایش داخلی در فصل سرما، بررسی و مطالعه عمیق‌تری در زمینه فرایندهای انتقال گرمای موجود در سیستم گرمایشی دیوار ترمب صورت خواهد گرفت. ارزیابی و تحلیل کارایی سیستم گرمایشی دیوار ترمب، با توجه به شدت تابش خورشیدی گسیلیده به شهر شیراز و اقلیم‌های مشابه، با در نظر گرفتن مدل عددی مربوطه بررسی می‌شود.

## ۲. سازوکار و عوامل تأثیرگذار در فرایند انتقال گرمای پایدار در فناوری دیوار ترمب

رویکرد عمده همه سیستم‌های گرمایش خورشیدی ذخیره‌سازی و سپس رهاسازی گرما در بازه زمانی نبود تابش خورشید است. هنگامی که مصالح ساختمانی (بتن، آجر و سنگ) گرما را ذخیره می‌کنند؛ این میزان گرمایش ذخیره شده، فضای مطلوبی را برای داخل خانه تأمین می‌کند. دیوار ترمب یکی از فناوری‌های غیر فعال



شکل ۱. دیاگرام جریان در سیستم گرمایشی دیوار ترمب.

معادلات (۱) و (۲)، به ترتیب، موازنه انرژی برای دیوار حرارتی و شیشه را برقرار می‌کنند.

برای موازنه گرمای هوای نزدیک سطوح دیوار ذخیره‌ساز گرمایی و شیشه نیز، به ترتیب، خواهیم داشت:

$$h_{ca}(T_d - T_{ad})w = c f_1 \frac{dT_{ad}}{dx} \quad (3)$$

$$h_{cg}(T_g - T_{ag})w = c f_2 \frac{dT_{ag}}{dx} \quad (4)$$

در بررسی این مدل، لایه هوا را سطح شیشه در یک طرف و سطح دیوار ذخیره‌ساز گرمایی در طرف دیگر محدود می‌کند؛ طول لایه هوایی ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. فرضهای حاکم بر مسئله از این قرارند:

۱. جریان هوا در فضای اطراف واداشته است؛

۲. مقاومت گرمایی سطح شیشه صفر در نظر گرفته می‌شود؛

۳. دمای هوای بیرون،  $T_e$ ، با دمای تابش احاطه شده،  $T_{surr}$ ، برابر است.

مدل مورد بررسی در این تحقیق، براساس شرایط پایا در نظر گرفته

### ۳. مدل ریاضی اصلاح شده سیستم گرمایشی دیوار ترمب

به منظور تحلیل عمیق‌تر فرایندهای انتقال گرما در فرایند گرمایش هوا در چارچوب فناوری گرمایشی دیوار ترمب، باید مدل‌های ریاضی کامل‌تری را از نظر گذراند. به همین دلیل، مدل ریاضی اصلاح شده ای بر اساس شکل جریان گرمای بین دیوار حرارتی و شیشه طراحی و ارائه شده است. در این مقاله، مدل عددی ارائه شده از جانب پیوتروسکی و همکارانش [۲۱] اصلاح شده و برای فرایندهای انتقال گرمای پایدار، مدلی بر مبنای پیش‌بینی عملکرد سیستم گرمایشی دیوار ترمب ارائه شده است.

بنابر نظریه شرح داده شده (بخش ۲) و با توجه به مدل فیزیکی فرایندهای انتقال گرمای پایدار (شکل ۱)، برای موازنه انرژی بین اجزای سیستم (دیوار ذخیره‌ساز حرارتی و شیشه) و محیط بیرون ساختمان می‌توان نوشت:

$$Q_s - Q_r = Q_{w-g} + Q_{c_{w-a}} + Q_i \quad (1)$$

$$Q_{w-g} \pm Q_{c_{g-a}} = Q_{c_{g-e}} + Q_{r_{g-e}} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hc.k}{w} = \{ 0.516 * Re^{0.25} \text{ if } 10^4 < Re < 10^8 \text{ \& } 0.117 * Re^{0.33} \text{ if } 10^8 < Re < 10^{12} \} \quad (7)$$

که در رابطه بالا عدد رینولدز از این قرار بیان می‌شود:

$$Re_{fa} = \frac{\rho v_a l}{\mu} \quad (8)$$

و برای سرعت جریان هوا در کانال هوایی می‌رسیم به [۲۳]:

$$v_a = \left[ \frac{2 \Delta p}{\rho \left( c_1 \left( \frac{Ac}{A_i} \right)^2 + c_2 \frac{z}{w} + c_3 \left( \frac{Ac}{A_0} \right)^2 \right)} \right] \quad (9)$$

### ۳-۱- داده‌ها و روش حل

۳-۱-۱ داده‌های هواشناسی و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه شهر شیراز در طول جغرافیایی ۵۲ و عرض جغرافیایی ۲۹ و در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده است. این شهر دارای آب و هوای معتدل است و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۱۴۸۰ تا ۱۶۷۰ متر در نقاط مختلف شهر متغیر است [۲۴]. داده‌های ساعات آفتابی و میزان شدت تابش و حداقل مطلق دما از اداره هواشناسی استان فارس دریافت شده است. در جدول (۱)، ساعت‌های آفتابی شهر شیراز درج شده که نشانگر امکانات بالقوه پدمانه این شهر برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است.

جدول ۱. آمار ساعت‌های آفتابی مربوط به شهر شیراز در ۱۰ سال اخیر، در ۶ ماهه دوم سال  $(\frac{w}{m^2})$ .

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱۳۸۳	۳۰۳	۲۴۲	۱۷۹/۲	۱۹۸/۸	۲۳۴/۲	۱۹۹/۷
۱۳۸۴	۳۰۶/۷	۲۲۲	۲۴۸/۹	۱۷۹/۸	۱۸۸/۷	۲۷۲
۱۳۸۵	۲۹۸/۶	۲۲۳/۵	۲۰۹	۲۰۶	۲۱۷/۲	۲۴۶/۳
۱۳۸۶	۳۰۱/۸	۲۸۴/۴	۲۲۹	۱۹۷/۶	۲۴۲/۹	۲۸۵/۹
۱۳۸۷	۱۹۸/۴	۲۱۶/۹	۲۴۰/۳	۲۴۲/۶	۲۰۸/۵	۲۱۰
۱۳۸۸	۳۰۳/۸	۲۳۵/۶	۱۸۵/۲	۲۳۵/۹	۲۳۰/۷	۲۴۴/۶
۱۳۸۹	۲۹۹/۴	۲۸۲/۸	۲۶۴/۶	۲۲۲/۵	۱۹۴/۴	۲۱۰/۴
۱۳۹۰	۲۹۸/۳	۲۴۸/۳	۲۴۶/۷	۲۳۵/۳	۲۱۳/۸	۲۷۱/۵
۱۳۹۱	۲۸۸/۸	۲۴۲/۶	۱۹۵/۶	۲۱۵/۶	۲۴۰/۷	۲۵۷/۸
۱۳۹۲	۳۱۰/۳	۲۱۵/۳	۲۴۵/۷	۱۶۹/۶	۲۴۹/۱	۲۳۲/۹

شده است که در نتیجه شرایط حاکم برای دما (T) با توجه به وابستگی آن، به مختصات طولی (x) به صورت  $T(x,t)=T(x,0)=T(x)$  بیان خواهد شد. معادلات کلی فرایندهای انتقال گرمای پایدار در سیستم گرمایشی دیوار ترمب، با توجه به روابط (۱) و (۲)، و با انتگرال‌گیری از روابط (۳) و (۴)، از این قرار بیان خواهد شد:

$$as \cdot q \cdot tsg = \varepsilon_{1-2} \sigma \left[ \left( \frac{T_d+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g+273}{100} \right)^4 \right] + h_{cd} \left( \frac{T_d-T_i}{e^{\left( \frac{h_{cd} w A_1}{c f_1} \right)_x}} \right) + h_i (T_d - T_i) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{1-2} \sigma \left[ \left( \frac{T_d+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_g+273}{100} \right)^4 \right] \pm h_{cg} \left( \frac{T_d-T_i}{e^{\left( \frac{h_{cg} w A_2}{c f_2} \right)_x}} \right) = h_o (T_g - T_o) + \varepsilon_1 \sigma \left[ \left( \frac{T_g+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{surr}+273}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

معادلات (۵) و (۶)، به ترتیب، موازنه انرژی برای دیوار ذخیره ساز انرژی گرمایی و شیشه‌اند. در مدل پیوتروسکی و همکارانش [۲۱] جمله مهم ضریب انتقال حرارت جریان هوا به صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته شده است؛ اما در بررسی حاضر، این متغیر مهم به صورت رابطه‌ای وابسته به پارامترهایی چون عدد رینولدز، طول و پهنای کانال ارائه شده است. متغیر سرعت جریان هوا در سیستم گرمایشی دیوار ترمب یکی از عوامل غیر قابل چشم‌پوشی است که باید در مدلسازی سیستم به آن توجه کرد. یعنی، اگر سرعت جریان هوای کانال با روند آرمانی و مطلوبی پیش نرود، بتوان با به‌کارگیری و نصب ابزارهایی چون هواکش (در کنار دریچه پایینی) مشکل ایجاد شده را رفع کرد. به همین دلیل، جمله سرعت جریان هوا در کانال هوایی سیستم گرمایشی دیوار ترمب در مدل اصلاح شده اعمال شده است. این در حالی است که متغیر سرعت هوای کانال هوایی در مدل قبلی مورد توجه نبوده است. در معادلات (۵) و (۶)، با توجه به ثبات و پایداری جریان هوا در فضای کانال هوایی، ضریب انتقال گرمای جریان هوا از این قرار فرض می‌شود:

$$h_c = h_{cd} = h_{cg}$$

برای متغیر  $h_c$  در معادله (۵) و (۶) خواهیم داشت [۲۲]:

#### ۴. تحلیل نتایج و بحث

فناوری دیوار ترمب با وجود دیوار ذخیره ساز گرمایی و شیشه، الگوهای حرارتی خاصی را ایجاد می‌کند که این موضوع به عوامل مهمی چون ارتفاع و پهنای کانال هوایی، سرعت جریان هوای کانال و ضریب انتقال گرمای هوای کانال، بستگی دارد. از اینرو، مطالعه این عوامل و بررسی حالت بهینه و اقتصادی پارامترهای تأثیرگذار در طراحی این سیستم گرمایشی، اساسی و قابل ملاحظه است. به گونه‌ای که، مثلاً، برای عامل ضخامت دیوار گرمایی، ضخامت کم دیوار گرمایی می‌تواند به نوسانات بسیاری در داخل دیوار منجر شود. هر چند ضخامت بیشتر هم افزایش هزینه اقتصادی و افزایش زمان رسیدن گرمای لازم به فضای اتاق را در پی دارد؛ از این‌رو بهینه‌سازی عوامل تأثیرگذار در بهبود بازده فناوری دیوار ترمب ضروری است.

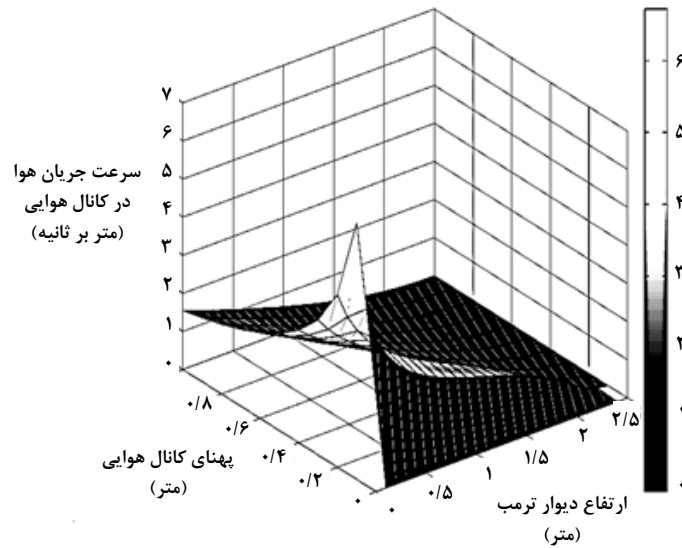
داده‌های به‌کار رفته در این پژوهش در جدولهای (۲) و (۳) درج شده‌اند. داده‌های موجود در جدول (۲)، با توجه به مراجع [۲۱] و [۲۳] در نظر گرفته شده است. شرایط اقلیمی مورد مطالعه (درسه روز و در یک ساعت مشابه) در جدول (۳) مربوط به شهر شیراز است که از اداره هواشناسی استان فارس دریافت شده است. جواب دستگاه معادلات غیر خطی صرفاً دستگاه معادلات خطی نیست. از این‌رو، روش‌های حل این گونه دستگاه‌ها همان روش‌های تکراری با یک حدس اولیه برای متغیرهای مجهول است. روش نیوتون-رافسون یکی از پرکاربردترین این روش‌ها به‌شمار می‌آید که از دقت و صحت قابل قبولی برخوردار است. روش حل عددی نیوتون-رافسون به کمک نرم افزار متلب به منظور حل معادلات غیرخطی مدل مورد مطالعه، به‌کار گرفته شده است.

جدول ۲. داده‌های متغیرهای مدل اصلاح شده.

$\mu$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )	$A_1$ (بی بعد)	$A_2$ (بی بعد)	$\frac{c}{j}$ ( $\frac{\text{kg}}{\text{kg.k}}$ )	$f_2 f_1$ ( $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ )	$h_i$ ( $\frac{\text{w}}{\text{k.m}^2}$ )	$h_o$ ( $\frac{\text{w}}{\text{k.m}^2}$ )	$T_{surr}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰/۰۰۰۰۱۹	۱/۲۰۵	۱/۰۳۲	۰/۹۶۹	۱۰۰۵/۹	۰/۰۱۱	۷/۷	۱۴	دمای بیرون از ساختمان
$t_{sg}$ (بی بعد)	$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$w$ متر	$l$ متر	$\varepsilon_{1-2}$ (بی بعد)	$C_1$ (بی بعد)	$C_2$ (بی بعد)	$C_3$ (بی بعد)	$A_i, A_o$ ( $\text{m}^2$ )
۱	۲۰	۱	۲/۵	۰/۸۹	۱/۵	۰/۰۵۶	۱	۰/۶۲۵

جدول ۳. داده‌های شرایط اقلیمی شهر شیراز از ۱۳۹۲/۱۰/۱۸ تا ۱۳۹۲/۱۰/۲۰.

ساعت تابش خورشیدی مورد مطالعه	شدت تابش خورشیدی ( $\frac{\text{w}}{\text{m}^2}$ )	دمای بیرون ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۱:۰۰ (۱۳۹۲/۱۰/۱۸)	۴۶۱/۴۱	۳/۷۳
۱۱:۰۰ (۱۳۹۲/۱۰/۱۹)	۴۹۶/۸۳	۳/۱
۱۱:۰۰ (۱۳۹۲/۱۰/۲۰)	۲۴۳/۸۶	۳/۸۸



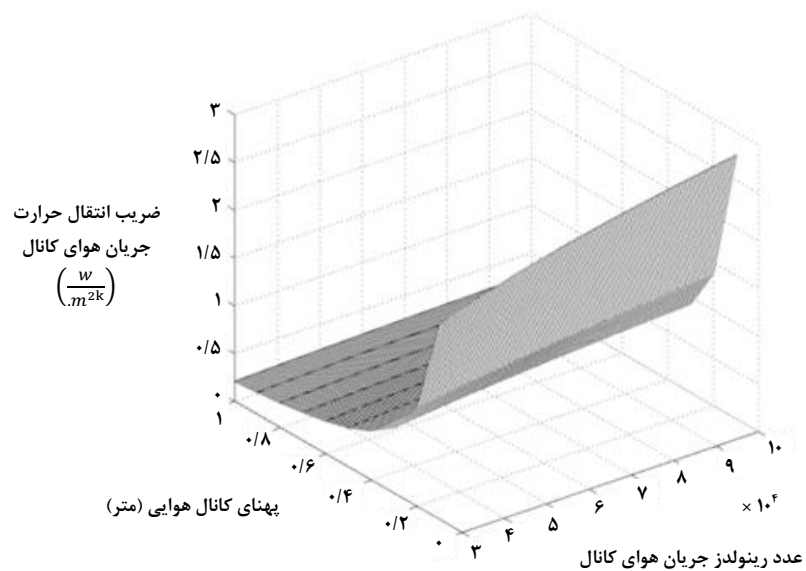
شکل ۲. تغییرات سرعت جریان هوا در کانال هوایی با توجه به تغییرات پهنای کانال و ارتفاع دیوار حرارتی.

است. براساس نتایج این شکل، با افزایش عدد رینولدز جریان هوای کانال هوایی، روند افزایشی ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال تحقق می‌یابد.

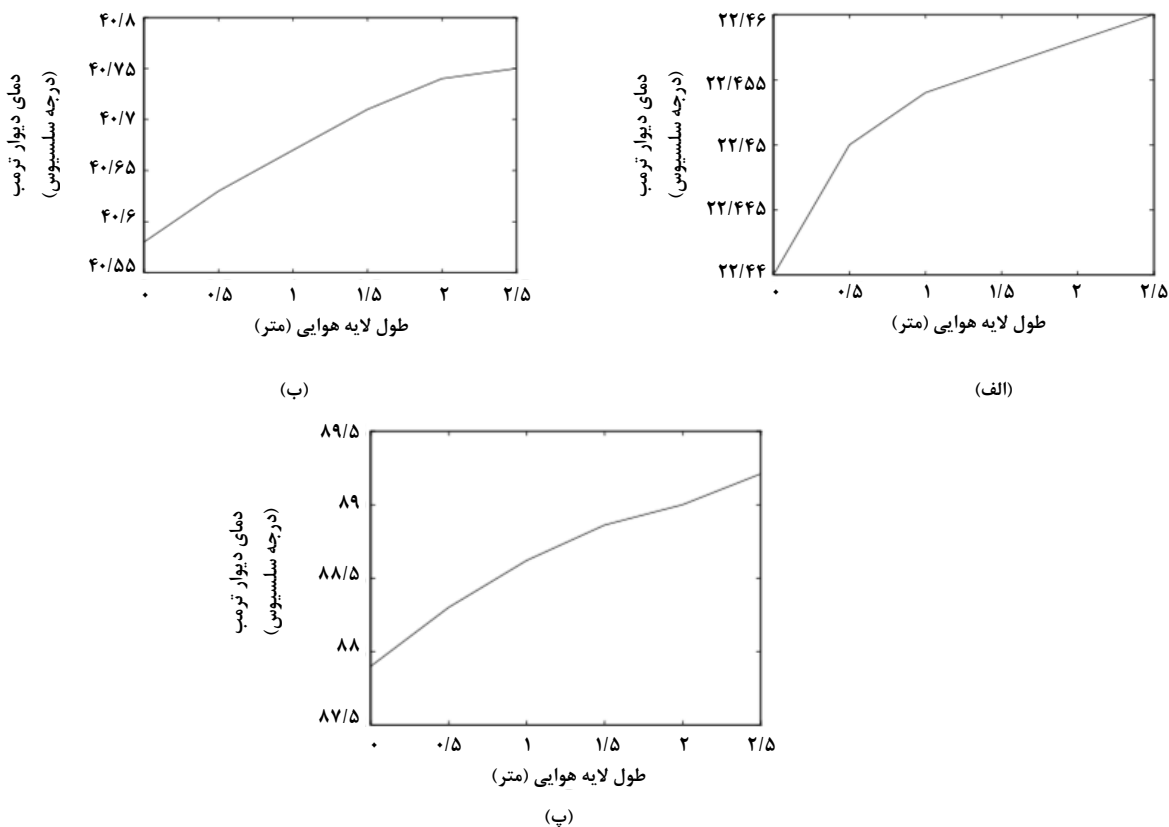
در پهنای کانال ۰/۶ متر با عدد رینولدز ۵۹۵۰۰، میزان ضریب انتقال گرمای هوای کانال  $(\frac{W}{k.m^2})$  ۰/۴۰۲۹ است و درحالی‌که در همین پهنای کانال میزان عدد رینولدز جریان هوا ۸۹۵۰۰ باشد، ضریب انتقال حرارت جریان هوا در کانال به  $(\frac{W}{k.m^2})$  ۰/۴۴۶۲ خواهد رسید.

این درحالی است که تأثیرگذاری پهنای کانال در این نتایج، متفاوت از اثر رینولدز جریان هوا بوده است؛ به نحوی که با افزایش آن، مقدار ضریب انتقال گرمای جریان هوا با روند کاهشی همراه است. در صورتی که عدد رینولدز جریان هوای کانال به میزان ۹۰۰۰۰ باشد، مقدار ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال در پهنای کانال ۰/۹ متر نسبت ۰/۵ متر، تا میزان ۰/۲۰۱ کاهش خواهد داشت. با توجه به رابطه ۷ مدل، عدد رینولدز با عدد ناسلت رابطه مستقیم دارد و از آنجا که عدد ناسلت با ضریب انتقال گرمای هوای کانال هوایی نسبت مستقیم دارد و می‌توان به تأثیرگذاری مستقیم و مثبت عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت هوای کانال تأکید نمود. این شرایط برای پهنای کانال هوایی با توجه به رابطه (۷)، نسبت به ضریب انتقال گرمای هوای کانال رابطه عکس دارد. این دو موضوع مؤید نتایج شکل (۳) این مطالعه است.

در شکل (۲)، تغییرات سرعت جریان هوا با توجه به تغییرات ارتفاع دیوار ترمب و پهنای کانال هوایی را مشاهده می‌کنید. با توجه به نتایج این شکل، با افزایش ارتفاع دیوار ذخیره‌ساز انرژی گرمایی (کاهش مساحت دریچه)، کاهش میزان سرعت جریان هوا دور از انتظار نیست. با توجه به شکل در زمانی که ارتفاع دیوار ۲/۱ متر (ارتفاع دریچه ۰/۴ متر) بوده است، با پهنای کانال ۰/۶ متر، سرعت جریان هوا در کانال ۰/۸۹۹ متر بر ثانیه است؛ ولی وقتی در همین پهنای کانال (۰/۶ متر) ارتفاع دیوار ۲/۳ متر (ارتفاع دریچه ۰/۲ متر) بوده، میزان سرعت هوا به ۰/۲۲۸ متر بر ثانیه رسیده است. این نتیجه با توجه به کاهش مساحت دریچه‌ها و در نتیجه کاهش ورود جریان هوا به کانال هوایی منطقی به نظر می‌رسد. هرچند این تأثیرگذاری تغییرات سرعت هوا با تغییرات پهنای کانال متفاوت تر بوده است. با توجه به شکل (۲) در پهنای صفر تا ۰/۲ متر، روند افزایشی سرعت هوا در کانال هوایی چشمگیر است، اما بعد از پهنای ۰/۲ متر روند کاهشی در تغییرات سرعت هوا در کانال هوایی مشاهده می‌شود. از این‌رو، میزان بهینه پهنای کانال برای عملکرد مطلوب سیستم گرمایشی ۰/۲ متر خواهد بود. کاهش بیش از حد پهنای کانال هوایی، سبب کاهش گردش هوا و افزایش بیش از حد آن سبب ایجاد جریان برگشتی در تهویه هوا می‌شود. در شکل (۳)، تغییرات ضریب انتقال گرمای جریان هوا در کانال هوایی، با توجه به عدد رینولدز جریان هوا و پهنای کانال ارائه شده



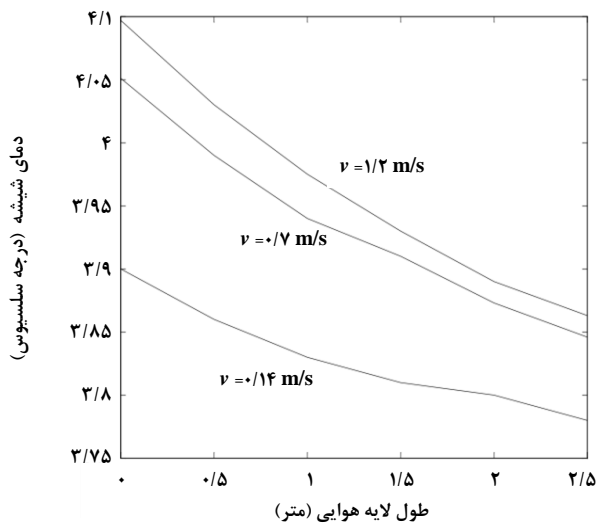
شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال گرمای جریان هوا در کانال هوایی با توجه به عدد رینولدز جریان هوای کانال و پهنای کانال.



شکل ۴. تغییرات دمای سطح خارجی دیوار ترمب با جنس آجر توپر: (الف) با ضخامت ۵/۵ سانتی‌متر؛ (ب) با ضخامت ۱۰/۵ سانتی‌متر؛ (پ) با ضخامت ۲۲ سانتی‌متر.



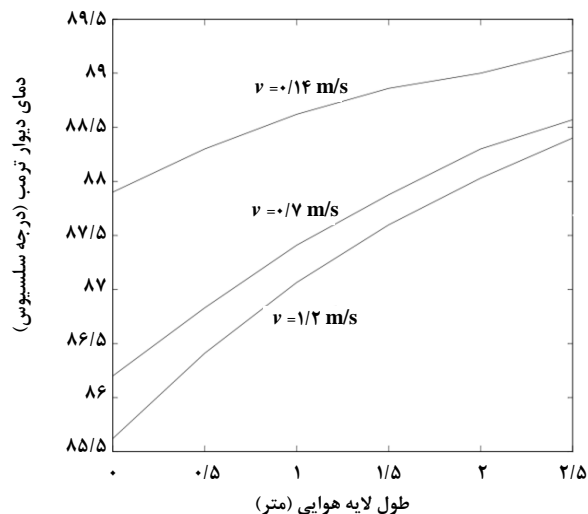
صحت نتایج). در مدل مطالعاتی پیوتروسکی و همکاران (شکل ۸)، با توجه به این که سرعت جریان هوا در کانال هوایی ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده بود، دمای سطح دیوار ذخیره ساز گرمایی از ورودی تا خروجی کانال هوایی، با افزایش ۴/۴ درجه سلسیوس همراه بوده است که این نتیجه در مطالعه پژوهشی حاضر هم مصداق داشته است. با توجه به مطالعه حاضر، در صورتی که سرعت جریان هوا ۱/۲ متر بر ثانیه در کانال هوایی باشد، سطح دیوار ذخیره ساز گرمایی دارای روند افزایشی به میزان ۲/۸ درجه سلسیوس از دریچه پایینی تا دریچه بالایی بوده است. هرچند در سرعت هوایی ۰/۷ و ۰/۱۴ متر بر ثانیه این تغییرات، به ترتیب، ۲/۳ و ۱/۴ درجه سلسیوس بوده است. این شرایط برای نتایج به دست آمده در سطح شیشه هم صادق بوده است.



شکل ۶. تغییرات دمای سطح شیشه به ازای مقادیر مختلف سرعت جریان هوا.

در تحقیقات پیوتروسکی و همکاران (شکل ۸)، با وجود سرعت جریان هوا معادل ۲ متر بر ثانیه در کانال هوایی، سطح شیشه در طول کانال هوایی (از دریچه پایینی تا دریچه بالایی) به میزان ۰/۱۸ درجه سلسیوس با کاهش همراه بوده است که برای مطالعه حاضر با وجود سرعت هوایی ۱/۲ متر بر ثانیه، به میزان ۰/۲۳ درجه سلسیوس سطح شیشه با کاهش همراه بوده است. به ازای سرعت هوایی ۰/۷ و ۰/۱۴ متر بر ثانیه این کاهش دما، به ترتیب، ۰/۲ و ۰/۱۳ درجه سلسیوس بوده است. به طور کلی، افزایش سرعت جریان هوا در کانال هوایی، سبب افزایش نیروهای

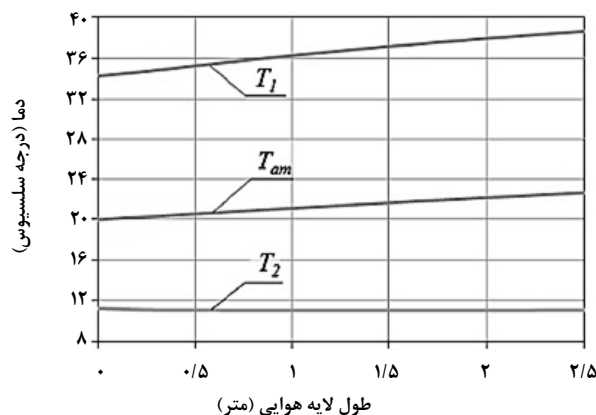
در شکل (۴) تغییرات دمای سطح خارجی دیوار ترمب با توجه به دیوار ذخیره ساز انرژی گرمایی با جنس آجر توپر و با سه نوع ضخامت متفاوت را مشاهده می‌کنیم. با توجه به نمودارهای شکل (۴)، توزیع دما از ۰ تا ۲/۵ متر تغییر زیادی ندارد. اما علت تفاوت اندک، خنک شدن سطح خارجی دیوار ذخیره ساز در تماس با هوای سرد ورودی از اتاق است. این امر در بالا دست کانال هوا به علت افزایش دمای هوای کانال ضعیف‌تر و دمای دیوار در بالادست بیشتر است. از آنجا که با ضخامت بیشتر، مقاومت گرمایی بیشتری در آجر ایجاد خواهد شد، می‌توان با افزایش ضخامت و در نتیجه افزایش مقاومت گرمایی دیوار، افزایش دمای دیوار ترمب را انتظار داشت. به نحوی که با توجه به شکل (۴)، وقتی ضخامت ۵/۵ سانتی‌متری برای دیوار ترمب آجری در نظر گرفته شده است، دمای سطح خارجی دیوار گرمایی (آجری) در بازه دمایی بین ۲۲/۴۴ تا ۲۲/۴۶ درجه سلسیوس قرار دارد؛ ولی وقتی ضخامت ۲۲ سانتی‌متر برای دیوار ترمب آجری مطرح بوده است، دمای سطح خارجی این دیوار به بازه دمایی بین ۸۷/۹ تا ۸۹/۲۱ درجه سلسیوس می‌رسد.



شکل ۵. تغییرات دمای سطح خارجی دیوار ترمب به ازای مقادیر مختلف سرعت جریان هوا.

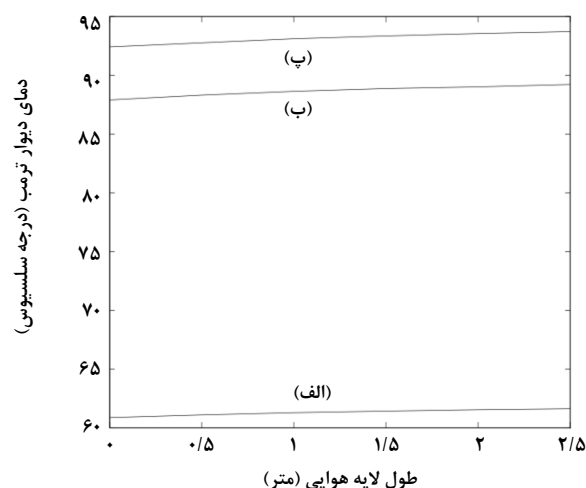
در شکلهای (۵) و (۶)، به ترتیب، تغییرات دمای سطح دیوار گرمایی و شیشه به ازای مقادیر مختلف سرعت جریان هوا نشان داده شده است. نتایج شکلهای (۵) و (۶) تأکیدی بر نتایج پژوهش صورت گرفته توسط پیوتروسکی و همکاران [۲۱] است (بررسی

انتقال گرمای پایدار در فضای بین دیوار گرمایی و شیشه، دمای سطح دیوار ترمب با روند افزایشی همراه بوده است. این درحالی است که تغییرات دمای شیشه با وجود فرایند انتقال گرما روند کاهشی را پیموده است. با مقایسه شکل‌های (۶) و (۸) مشاهده می‌شود که روند دمای شیشه نسبت به ارتفاع کاهشی است. اما این کاهش اندک، و در حد دو دهم درجه است. هر دو نتیجه روند مشابهی نشان می‌دهند که حاکی از صحت نتایج است. با بررسی شکل‌های (۴)، (۵) و (۷) که دمای دیوار در شرایط مختلف را نشان می‌دهند، و مقایسه آنها با شکل (۸)، از مدل پیوتروسکی نتیجه می‌شود که این روند افزایشی است اما شیب تغییرات در مدل حاضر کمتر از مدل پیوتروسکی است، زیرا در آن مدل اختلاف دمای تقریباً ۴ درجه را نشان می‌دهد؛ اما شکل (۷) که نمایانگر تابش‌های متفاوت است؛ تقریباً یک درجه اختلاف را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۵)، که نمایانگر سرعت‌های متفاوت است، بین ۲ تا ۳ درجه اختلاف را نشان می‌دهد. به همین ترتیب، شکل (۴) نیز که در ضخامت‌های متفاوت است، بین ۱ تا ۲ درجه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸)، می‌توان به صحت نتایج مدل ارائه شده در شکل‌های (۴) تا (۷) تأکید کرد. نتایج به دست آمده از مدل اصلاح شده در این شکل‌ها، در راستای بهینه‌سازی عوامل اساسی، چون تغییرات سرعت و ضریب انتقال گرمای جریان هوای در طول کانال هوایی با توجه به شدت تابش کافی به منظور افزایش بازدهی سیستم گرمایشی دیوار ترمب است.



شکل ۸. تغییرات دما در دیوار ترمب ( $T_1$ )، شیشه ( $T_2$ )، و نزدیکی سطوح آنها در طول لایه هوایی (شدت تابش مورد نظر ۳۲۰ وات بر مترمربع بوده است) [۲۱].

شناوری و جابه‌جایی آزاد در کانال هوایی می‌شود، که در نتیجه از دریچه پایینی تا دریچه بالایی کانال، انتقال و گردش هوای گرم، بیشتر و بهتر صورت می‌گیرد و شرایط گرمایش بیشتر برای سطح دیوار ترمب مطلوب‌تر می‌شود. هر چند این شرایط برای تغییرات دمای سطح شیشه به نتیجه معکوس می‌انجامد. تغییرات دمای دیوار ترمب با شدت تابش مختلف را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، می‌توان با شدت تابش بیشتر، روند افزایشی را در سطح خارجی دیوار گرمایی انتظار داشت. با توجه به شکل، وقتی شدت تابش  $243/86$  وات بر متر مربع بوده است، بهینه دمایی در دیوار گرمایی به  $61/6$  درجه سلسیوس می‌رسد؛ ولی وقتی شدت تابش بیشتری به میزان  $496/83$  وات بر متر مربع مورد نظر بوده است، حداکثر دمای مطلوب تا میزان  $93/7$  درجه سلسیوس نتیجه می‌شود. همین مقایسه در میزان تابش نزدیک  $b$  و  $c$  انجام شده و اثر چشمگیر افزایش شدت تابش در مقادیر نسبتاً کم در دمای دیوار را هم نشان می‌دهد. سه مقدار یادشده مربوط به سه روز متوالی در شهر شیرازند و نتیجه می‌دهد که کارایی دیوار ترمب به میزان تابش خورشیدی بسیار حساس است.



شکل ۷. تغییرات دمای سطح دیوار ترمب متناسب با شدت تابش مختلف: (الف)  $243/86$  ( $\frac{W}{m^2}$ )؛ (ب)  $461/41$  ( $\frac{W}{m^2}$ )؛ (پ)  $496/83$  ( $\frac{W}{m^2}$ )

در شکل (۸) نتایج پژوهش انجام شده پیوتروسکی و همکاران [۲۱] مشاهده می‌شود. براساس این شکل، با حرکت جریان هوا در کانال هوایی (از دریچه پایینی تا دریچه بالایی) با توجه به فرایند

## ۵. نتیجه گیری کلی

بازدهی سیستم گرمایشی دیوار ترمب، به منظور گرمایش ساختمان، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. از این رو، در این پژوهش به منظور بهبود عملکرد سیستم دیوار ترمب تأثیرگذاری سرعت هوای کانال و شدت تابش خورشیدی بر تغییرات دمای دیوار ترمب مطالعه شد.

نتایج این بررسی عددی نشان می‌دهد با افزایش شدت تابش، روند افزایشی در دمای دیوار ترمب پیش می‌آید. تغییرات دمای دیوار ترمب با جنس آجر در دیوار ذخیره‌ساز گرمایی با سه ضخامت متفاوت در این پژوهش نیز مطالعه شد. براساس این نتایج، می‌توان با افزایش ضخامت دیوار ترمب، مقاومت گرمایی بیشتری برای دیوار فراهم آورد، که این خود سبب بهبود روند افزایش دمای دیوار گرمایی خواهد شد. به این ترتیب، با توجه به نتایج، وقتی ضخامت ۵/۵ سانتی‌متری برای دیوار ترمب آجری در نظر گرفته شده است، دمای سطح دیوار گرمایی (آجری) در دمای ۲۲ درجه سلسیوس قرار دارد، ولی وقتی ضخامت ۲۲ سانتی‌متر برای دیوار ترمب آجری در نظر گرفته شد، دمای سطح این دیوار به میزان بازده دمایی ۸۸ درجه سلسیوس می‌رسد. در این پژوهش، با توجه به اهمیت سرعت جریان هوا در کانال هوایی، تغییرات آن با توجه به ارتفاع دیوار ترمب ارزیابی شد. نتایج از کاهش سرعت جریان هوا در کانال، به نسبت کاهش مساحت دریچه و افزایش ارتفاع دیوار ترمب تأکید دارد. همچنین، با توجه به اهمیت ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال در راستای بهبود عملکرد سیستم گرمایشی دیوار ترمب، مطالعه‌ای در این پژوهش با توجه به پهنای کانال و عدد رینولدز جریان هوای کانال بر روی آن صورت گرفت. نتایج عددی این مطالعه نشان داد که با افزایش عدد رینولدز جریان هوا، می‌توان افزایش ضریب انتقال گرمای جریان هوا را در کانال هوایی انتظار داشت. براساس نتایج این شکل، با افزایش عدد رینولدز جریان هوای کانال هوایی، روند افزایشی ضریب انتقال گرمای جریان هوای کانال صورت خواهد گرفت، به گونه‌ای که در پهنای کانال ۰/۶ متر با عدد رینولدز ۵۹۵۰۰، میزان ضریب انتقال گرمای هوای کانال ۰/۴۰۲۹ است و درحالتی که در همین پهنای کانال میزان عدد رینولدز جریان هوا ۸۹۵۰۰ است، ضریب انتقال گرمای جریان هوا در کانال  $\left(\frac{w}{k.m^2}\right)$  ۰/۴۴۶۲ نتیجه می‌شود.

به طور کلی، با استناد به نتایج به‌دست آمده، می‌توان با توجه به شرایط اقلیمی مناسب شهر شیراز از طرح سیستم پیشرفته دیوار ترمب بهره گرفت. با توجه به نتایج، وقتی که شدت تابش ۲۴۳/۸۶ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است، میزان بهینه دمایی در دیوار گرمایی ۶۱/۶ درجه سلسیوس است ولی وقتی شدت تابش بیشتری به میزان ۴۹۶/۸۳ وات بر متر مربع مورد نظر بوده است، حداکثر دمای مطلوب تا ۹۳/۷ درجه سلسیوس به‌دست می‌آید. با توجه به بیشینه دمای دیوار ترمب با فرض پایا بودن، می‌توان دمای بیشتری را در دیوار ترمب ایجاد کرد؛ که این امر نشانگر مناسب بودن آن برای ذخیره‌سازی انرژی است. با توجه به شرایط اقلیمی فارس و مختصات جغرافیایی مناسب و مشابه اکثر شهرهای استان نسبت به شهر شیراز، می‌توان در برخی از شهرهای استان فارس از جمله شهرهای نورآباد ممسنی، خرامه، کوار، ارسنجان و سپیدان نیز از این فناوری بهره گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برای طراحی دیوار ترمب به بهینه‌سازی پارامترهای طراحی نیاز است.

## ۶. نمادها

$A_1, A_2$	به ترتیب، ضریب دمای دیواره ترمب و سطح شیشه، بدون بعد
as	جذب پذیری خورشیدی، بدون بعد
w	پهنای لایه هوا (m)
c	گرمای ویژه هوا (J/kg K)
$f_1, f_2$	جریان هوای توده ای نزدیک دیواره فشرده و سطح شیشه، (kg/s)
$hc_d, hc_g$	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی در نزدیکی سطح خارجی دیواره ترمب و سطح شیشه ( $w/m^2k$ )
q	جریان انرژی خورشید ( $W/m^2$ )
$T_d, T_g$	دمای سطح خارجی دیواره فشرده و سطح شیشه ( $^{\circ}C$ )
$T_i, T_o$	دمای هوای داخل و خارج اتاق ( $^{\circ}C$ )
$T_{sur}$	دمای تابش احاطه شده ( $^{\circ}C$ )
ts <sub>g</sub>	انتقال پذیری سطح شیشه، بدون بعد
$h_o$	ضریب انتقال گرمای سطح شیشه بیرونی ( $W/m^2K$ )
$\sigma$	ثابت استفان - بولتزمن ( $W. m^{-2}K^{-4}$ )
$C_1$	ضریب کاهش فشار ورودی کانال هوایی

- unvented trombe wall model in energy plus", MSc Thesis, University of Illinois, (2003).
- [4] Stazi, F., Mastrucci, A., di Perna, C., "Trombe wall management in summer conditions": An experimental study *Solar Energy* vol86, pp. 2839–2851, (2012).
- [5] Chel, A., Nayak, J. K., Kaushik, G., "Energy conservation in honey storage building using Trombe wall", *Energy and Buildings*, 140, 1643–1650, (2008).
- [6] Nwachukwu, N. P., Okonkwo, W. I., "Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a trombe wall system"; *Energy and Buildings*, 40, 371–374, (2008).
- [7] Nwosu, N. P., "Trombe wall redesign for a poultry chick brooding application in the equatorial region elements"; *International Journal of Sustainable Energy*, 29, 37–47, (2010).
- [8] Gomez, V. H., Galvez, D. M., Zayas, J. L. F., "Design recommendations for heat discharge systems in walls". *Applied Thermal Engineering*, 30, 1616–20, (2011).
- [9] Jaber, S., Ajib, S., "Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region", *Solar Energy*, 85, 1891–8, (2011).
- [10] Ozbalta, T. G., Kartal, S., "Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey" *Scientific Research and Essays*, 5, 2768–78, (2010).
- [11] Knowles, T. R., "Proportioning composites for efficient thermal storage walls", *Solar Energy*, 31, 319–26, (1983).
- [12] Nwachukwu, N. P., Okonkwo, W. I., "Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a Trombe wall system", *Energy and Buildings*, 40, 371–4, (2008).
- [13] Hassanain, A. A., Hokam, E. M., Mallick, T. K., "Effect of solar storage wall on the passive solar heating constructions", *Energy and Buildings*, 43, 737–47, (2010).
- [14] Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B., Butez, M., "Study of solar walls validating a simulation model", *Building and Environment*, 37, 109–21, (2002).
- [15] Richman, R. C., Pressnail, K. D., "A more sustainable curtain wall system: analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall", *Building and Environment*, 44, 1–10, (2009).
- [16] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., Sulaiman, M. Y., Trombe walls: "A review of opportunities and challenges in research and development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6340–6351, (2012).
- [17] Torcellini, P., Pless, S., "Trombe Walls in Low-energy Buildings": Practical Experiences the World Renewable Energy Congress VIII and Expo Denver, Colorado August 29–September 3, (2004).
- $C_2$  ضریب اصطکاک برای دو طرف (سطوح دیوار ترمب و شیشه) کانال هوایی
- $C_3$  ضریب کاهش فشار خروجی کانال هوایی
- 1 طول مشخصه کانال هوایی
- $\mu$  ضریب اصطکاک ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
- $\rho$  چگالی جریان هوا ( $\text{kgm}^{-3}$ )
- $\Delta p$  افت فشار کل در کانال هوایی
- $A_c$  مساحت کانال هوایی
- $T_d, T_g$  دمای در نزدیکی سطح خارجی دیواره فشرده و سطح شیشه ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\varepsilon$  انتشار (گسیل) پذیری، بدون بعد
- $z$  فاصله بین ورودی در بالا و پایین دیوار گرمایی (متر)
- $A_i$  مساحت در چپه پایینی دیوار (ناحیه ورودی هوا)
- $A_o$  مساحت در چپه بالایی دیوار (ناحیه خروجی هوا)
- $A_c$  مساحت کانال هوایی
- $Q_s$  جریان انرژی خورشیدی که سطح خارجی دیواره فشرده دریافت می کند ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_r$  جریان انرژی که از سطح خارجی دیواره فشرده باز می تابد ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_{w-g}$  جریان گرمای تابشی میان سطح خارجی دیواره فشرده و سطح شیشه ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_{r_{g-e}}$  جریان گرمای تابشی میان سطح شیشه و محیط بیرون ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_{c_{w-a}}$  جریان گرمای جابه جایی از سطح خارجی دیواره فشرده به هوای اطراف آن ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_{c_{g-a}}$  جریان گرمای جابه جایی از سطح شیشه به هوای اطراف آن ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_{c_{g-e}}$  جریان گرمای جابه جایی از سطح شیشه به هوای بیرون ( $\frac{w}{m^2}$ )
- $Q_i$  جریان گرما از سطح خارجی دیواره فشرده به محیط داخل ( $\frac{w}{m^2}$ )

مراجع

- [1] www.ifco.ir  
 [2] www.sun.org.ir  
 [3] Ellis, P. G., "Development and validation of the

- [18] Jie, J., Hua, Y., Wei, H., Gang, P., Jianping, L., Bin, J., "Modeling of a novel Trombe wall with PV cells" *Building and Environment* 42,1544–1552, (2007).
- [19] Okonkwo, W. I. and Akubuo, C. O., "Trombe Wall System for Poultry Brooding", *International Journal of Poultry Science*, 6 (2), 125-130, (2007).
- [20] Wilson, A., "Thermal storage wall design manual".New Mexico Solar Energy Association, (1979).
- [21] Piotrowski, J. Z., Story, A., Olenets, M., "Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convectional elements of passive solar heating systems", *Archives of civil and mechanical engineering*, 13, 394–400, (2013).
- [22] "ASHRAE handbook of fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering, Inc. Atlanta, (2001).
- [23] Chen, Z. D., Bandopadhyay, P., Halldorsson, J., Byrjalsen, C., Heiselberg, P., Li, Y., "An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux", *Building and Environment*, 38, 893-906, (2003).
- [24] <http://portal.farstr.ir/portal/show.aspx?page=17212>.