# بررسی پارامترهای موثر بر کارایی دیوار ترومب با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

حامد کاملی [۱]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۳/۱۰

**چکیده:**

دیوار ترومب یا دیوار خورشیدی به عنوان یکی از روش‌های غیرفعال در گرمایش خورشیدی دسته‌بندی می‌شود. در این مقاله، جریان هوای داخل محفظه دیوار ترومب توسط روش حجم محدود که از جمله روش‌های مرسوم دینامیک سیالات محاسباتی است، شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار تجاری Ansys Fluent استفاده شده است. در ابتدا یک مدل مرجع معرفی و نتایج آن ارائه شده و سپس با استفاده از این مدل مرجع، پارامترهای موثر بر کارایی دیوار ترومب مطالعه و بررسی شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل بررسی تاثیر دمای هوا در دریچه ورودی، تاثیر توان تابشی خورشید، تاثیر جابجایی اجباری بر روی کارایی دیوار ترومب و تاثیر فاصله عرضی بین دیوار و جداره شیشه‌ای است که برای مطالعه و بررسی پارامترهای موثر، ۳۲ مدل مختلف شبیه سازی شده و نتایج آنها با نتایج مدل مرجع مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:**

دیوار ترومب، دینامیک سیالات محاسباتی، جابجایی طبیعی، مسئله رایلی-بنارد، گرمایش غیرفعال خورشیدی

۱) فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک دانشگاه تهران Hkameli@gmail.com

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

**مقدمه**

دیوار ترومب[1] به عنوان جزء گرمایشی غیرفعال[2] در معماری ساختمان، جهت ذخیره‌سازی و جذب انرژی تجدیدپذیر[3] تابشی خورشید طراحی شده است. گرمایش غیرفعال خورشیدی به گرمایش هوا بدون استفاده از ابزارهای متحرک و مصرف انرژی اطلاق می‌گردد. گرمایش توسط دیوار ترومب مبتنی بر جذب تابش خورشید توسط دیواری با ظرفیت گرمایی و ضریب جذب[4] (گسیلمندی[5]) تابشی بالاست. این دیوار در پشت یک جداره شفاف شیشه‌ای در ضلع جنوبی ساختمان (سمت آفتاب‌گیر در زمستان در نیمکره شمالی) قرار می‌گیرد. حرارت جذب شده توسط دیوار ترومب در فضای بین دیوار و جداره شیشه‌ای محبوس شده و از طریق پدیده‌های انتقال حرارت هدایت حرارتی، جابجایی و تشعشع به هوای داخل منتقل می‌شود. وجود دو دریچه در پایین و بالای مقطع ارتفاعی دیوار باعث ایجاد جریان هوا بین این دو مقطع می‌شود.

روش‌های تحلیل و بررسی مشخصات دیوار ترومب جهت طراحی و بهینه‌سازی به طور کلی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند. روش‌های مذکور شامل ۱- روش‌های عددی مبتنی بر حل معادلات نویر-استوکس توسط شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی[6]، ۲- روش‌های حل تحلیلی ۳- روش‌های حل عددی و ۴- روش‌های آزمایشگاهی است.

در مرجع [۱۵] جابجایی طبیعی آرام در دیواره خورشیدی کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله از الگوریتم Simpler در حل CFD استفاده شده و نشان داده شده است که نسبت عرض به ارتفاع تاثیر زیادی بر روی کارایی سیستم ندارد. در مرجع [۱۶] معادلات جریان آرام توسط روش حجم محدود[7] حل شده است. در این مرجع، معادلات هدایت حرارتی در دیوار نیز حل شده است. مرجع [۸] با استفاده از شبیه‌سازی سیالاتی در نرم‌افزار فلوئنت به بررسی اثر نیروی شناوری بر جابجایی طبیعی در محفظه‌ای چهارگوش پرداخته است. در مرجع [۳] علاوه بر مدل‌سازی جابجایی طبیعی، معادلات تشعشع نیز حل شده و نشان داده شده است که در نظر گرفتن تشعشع باعث کاهش گرادیان‌های دما و افزایش عدد نوسلت متوسط در دامنه حل می‌گردد. در مرجع [۱۹] نشان داده شده است که مهم‌ترین عامل موثر بر جذب حرارت، فاصله هوایی بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای است. مرجع [۱۷] با استفاده از حل دینامیک سیالات محاسباتی از طریق روش حجم محدود، تاثیر محل دریچه‌های ورودی و خروجی در دیوار خورشیدی را بررسی کرده است. مرجع [۱] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، دودکش خورشیدی را در مناطق گرم و مرطوب شبیه‌سازی کرده و تاثیر دمای هوا را بر روی کارایی دیوار بررسی کرده است. روش‌های تحلیلی جزء روش‌های بسیار مهم در بررسی مطالعه دیوار ترومب است. در

1) Trombe wall
2) Passive
3) Renewable energy
4) Absorption Coefficient
5) Emissivity Coefficien
6) Computational Fluid Dynamic (CFD)
7) Finite Volume Method (FVM)

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

مراجع [۵ و ۴] یک روش تحلیلی جهت حل جریان آرام و ناپایا برای انتقال حرارت جابجایی طبیعی ارائه شده است. این روش‌ها مبتنی بر استفاده از متغیرهای تشابهی در حل معادلات دیفرانسیل حاکم است.

از روش‌های دیگری که در مقالات مختلف به آن پرداخته شده است، روش‌های حل عددی است. در مرجع [۱۱] مدل‌سازی یک بعدی دودکش خورشیدی و دیوار ترومب با استفاده از شبکه مقاومت‌های حرارتی ارائه شده است. در مرجع [۱۲] نیز با استفاده از یک روش دیفرانسیل محدود یک بعدی و موازنه جرم و انرژی در سطوح کنترل، تاثیر آبکاری‌های مختلف بر روی ذخیره و جذب انرژی در دیوار ترومب بررسی شده است. در مرجع [۱۰] دیوار خورشیدی سنتی و کامپوزیتی با استفاده از یک روش دیفرانسیل محدود یک بعدی و با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS حل شده است. مقایسه نتایج نرم‌افزار TRNSYS و روش دیفرانسیل محدود یک بعدی، دقت بالای روش حل را تایید می‌کند.

در مرجع [۱۳] تست‌های آزمایشگاهی بر روی دیوار ترومب در دو ساختمان کم مصرف انجام شده و نتایج از طریق ثبت داده‌های شار گرمایی توسط حسگرهای دما و عکس‌برداری مادون‌قرمز بررسی شده است. در مرجع [۶] مقایسه‌ای تجربی ـ عددی بین دیوارهای ترومب با جداره جنوبی از شیشه تک‌جداره، شیشه دوجداره و باتری خورشیدی انجام شده است. مرجع [۱۸] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سرد شدن تدریجی هوا در طول روز بر روی دمای داخل پرداخته و نتایج بدست آمده با نتایج حل شبکه مقاومت حرارتی مقایسه شده است. مقالات مروری[1] با توجه به جامعیت آنها در بررسی مطالعات انجام شده، کمک زیادی به فهم مسئله می‌نمایند. در مرجع [۱۴] با تکیه بر طبقه‌بندی روش‌ها، به ارائه خلاصه‌ای از روش‌های حل مختلف پرداخته شده است. مرجع [۷] انواع روش‌های جدید فعال و غیرفعال تهویه مطبوع خورشیدی را در ده سال اخیر مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۹] نیز اقدام به معرفی و شرح انواع روش‌های غیرفعال خورشیدی اعم از دودکش خورشیدی، دیوار خورشیدی، پنجره‌های خورشیدی و سقف خورشیدی کرده است و در نهایت، در مرجع [۲] استاندارد اروپا برای دیوارهای دوجداره تهیه شده و در آن به ارائه راهکارهای طراحی استاندارد تجهیزات تهویه مطبوع غیرفعال خورشیدی جهت استفاده‌های کاربردی پرداخته شده است.

در مقاله حاضر، از روش دینامیک سیالات محاسباتی جهت شبیه‌سازی دیوار ترومب و بررسی پارامترهای مختلف موثر بر بازده سیستم استفاده شده است. هدف این مقاله، شبیه‌سازی جریان هوا و انتقال حرارت در محفظه دیوار ترومب (فاصله هوایی بین دیوار و جداره شیشه‌ای) از طریق حل معادلات نویر–استوکس است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش حجم محدود و توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. علاوه بر معادلات نویر ـ استوکس، معادلات جریان آشفته سیال و معادلات تشعشع نیز حل شده است.

در ادامه، در بخش ۲ به معرفی اجمالی دیوار ترومب و نحوه کار آن پرداخته شده است. در بخش ۳، فرض‌های مسئله، روش حل، شرایط مرزی و اولیه و دما و سطح تابش میانگین برای اقلیم گرم و خشک مورد بررسی قرار گرفته است. در

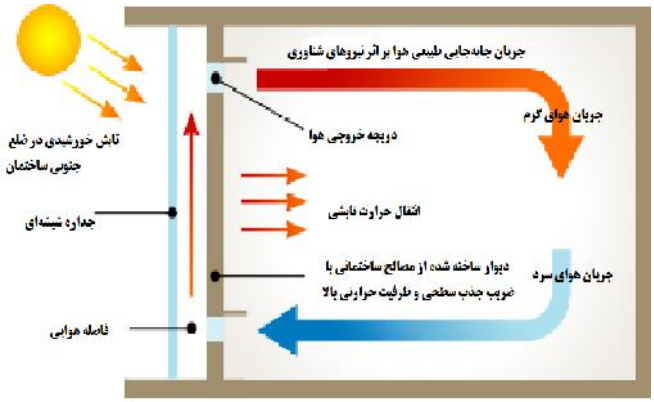
1) Review Article

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

بخش۴، نتایج شبیه‌سازی CFD توسط نرم‌افزار فلوئنت برای مدل مرجع ارائه شده است. در بخش ۵ تأثیر برخی از پارامترها بر بازده دیوار ترومب، از طریق مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی مختلف با مدل مرجع بررسی شده است. لازم به ذکر است جهت بررسی دقیق هر پارامتر نیاز است که در هر مدل تنها یکی از پارامترها نسبت به مدل مرجع تفاوت داشته باشد. در نهایت، در بخش ۶ به نتیجه‌گیری نهایی پرداخته شده است.

## معرفی دیوار ترومب

دیوار ترومب سیستمی جهت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشیدی است که متشکل از یک دیوار ساخته شده از مصالح ساختمانی با سطح تیره و یک جداره شیشه‌ای با فاصله کمی از آن است. این دیوار دارای دریچه‌های هوا در مقاطع ارتفاعی پایین و بالاست. هوای سرد از دریچه پایینی وارد محفظه بین دیوار و جداره شیشه‌ای شده و بر اثر گرمای خورشید گرم می‌شود. هوای گرم شده به دلیل اختلاف چگالی (نیروهای شناوری[1]) به سمت بالا حرکت کرده و از دریچه بالای دیوار خارج می‌شود. شمای کلی از دیوار ترومب و نحوه عملکرد آن در شکل (۱) نشان داده شده است.




**شکل ۱) شمای کلی دیوار ترومب و نحوه عملکرد آن**

دیوار خورشیدی جزء روش‌های غیرفعال و غیرمستقیم[2] تهویه مطبوع طبقه‌بندی می‌شود. ایده اصلی دیوار خورشیدی ابتدا توسط ادوارد مورس[3] ارائه شد ولی در سال ۱۹۶۰ به عنوان یک جزء از ساختمان توسط مهندسین فرانسوی فلیکس ترومب[4] و جاکویی مایکل[5] به طور کامل توسعه داده شد.

1) Buoyancy force
2) Indirect
3) Edward S. Mors
4) Felix Trombe
5) Jacques Michel

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

دیوار ترومب در جهت آفتاب‌گیر خورشید (جنوبی در نیمکره شمالی) ساخته می‌شود و دارای ظرفیت حرارتی بالایی است که باعث جذب و ذخیره انرژی می‌گردد. برای افزایش جذب حرارت معمولا از مواد تیره و با ضریب جذب تابشی بالا استفاده می‌شود. همچنین در بسیاری از طراحی‌ها از شیشه‌هایی که از داخل لعاب داده شده و براق شده‌اند، استفاده می‌شود. این امر باعث کاهش بازتابش انرژی از فاصله هوایی به فضای بیرون می‌گردد. دیوار خورشیدی پس از جذب حرارت شروع به بازتابش حرارت می‌کند. مزیت دیوار، بازتابش در محدوده نور مادون قرمز است که باعث پخش مناسب و مطلوب حرارت در اتاق می‌گردد. مزیت دیگر دیوار ترومب، ظرفیت حرارتی بالای آن و توان ذخیره‌سازی حرارت در طول روز و آزادسازی حرارت به صورت تدریجی در شب است.

## روش حل و پارامترهای حل مسئله در مدل مرجع

شبیه‌سازی‌ها در تمامی مدل‌ها توسط نرم‌افزار Ansys Fluent 6.3.26 انجام شده است. [۲۰] تولید شبکه نیز توسط نرم‌افزار Gambit 2.2.30 انجام شده است. روش گسسته‌سازی و حل عددی معادلات در نرم‌افزار فلوئنت بر اساس روش حجم محدود (FVM) است.

هدف از شبیه‌سازی حل دامنه جریان سیال و انتقال حرارت در دیوار ترومب است. انتقال حرارت در دیوار ترومب از سه طریق ۱- جابجایی طبیعی بر اثر نیروهای شناوری، ۲- بازتابش مادون‌قرمز در دیواره‌ها و ۳- هدایت حرارتی در دیوار صورت می‌پذیرد. معادلات حاکم بر حل مسئله شامل معادلات پیوستگی، معادله اندازه حرکت، معادله انرژی، معادلات جریان آشفته مدل $\mathrm{RNG}\ k-\varepsilon$ و معادله تشعشع مدل P1 است.

شبیه‌سازی‌ها به صورت پایا[1] است. دلیل انتخاب محاسبات پایا و مستقل از زمان در محاسبات فوق، بالا بودن زمان تغییرات دمای هوای خارج (محیط) و میزان تشعشع دریافتی نسبت به تغییرات دمای هوای داخل است، به این معنا که قالب زمانی تغییرات دمای هوای خارج و تشعشع دریافتی در محدوده ساعت بوده در حالی که محدوده تغییرات دمای هوای داخل در حد چند دقیقه می‌باشد. از طرف دیگر، در این مقاله هدف بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی بازده دیوار ترومب است. لذا بایستی بسیاری از پارامترها (بخصوص میزان تشعشع) را به صورت کنترل شده شبیه سازی نمود. بررسی تاثیرات دما و تشعشع متغیر و تاثیر آن در طول روز بحث مستقلی بوده که بایستی در مقاله‌ای دیگر به آن پرداخته شود.

الگوریتم یکپارچه‌سازی معادلات فشار و سرعت[2] Simple استفاده شده است. گسسته‌سازی متغیر فشار طبق روش پرستو[3] بوده و روش گسسته سازی[4] باقی متغیرها نیز مرتبه دو[5] است. دقت همگرایی باقیمانده‌ها[6] $10^{-6}$ در نظر گرفته

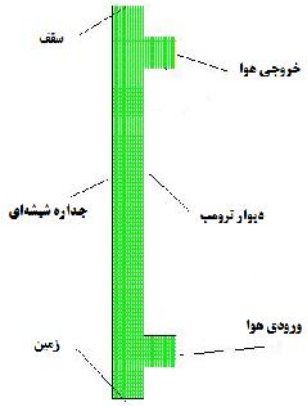
1) Steady state
2) Pressure-Velocity Coupling Algorithm
3) Presto!
4) Discretization method
5) Second order
6) Residuals

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

شده است.

فشار کاری محیط[1] برابر یک اتمسفر و دمای کاری محیط[2] برابر ۲۲ درجه سانتی‌گراد (دمای آسایش طرح داخل) در نظر گرفته شده است. سیال عامل هواست که گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است. ظرفیت حرارتی $C_p$ هوا برابر $1006.43\ \frac{J}{kg°K}$، ضریب هدایت حرارتی هوا برابر با $0.0242\ \frac{w}{m°k}$، لزجت سیال برابر با $1.7894^{-5}\ \frac{kg}{ms}$ و ضریب انبساط دمایی ماده $\beta$ به طور متوسط برابر با $0.0032\ \frac{1}{°k}$ در نظر گرفته شده‌اند. محاسبات بر اساس شرایط اقلیمی گرم و خشک انجام شده است. از این رو، دمای متوسط طرح خارج در زمستان به طور میانگین ۵ درجه سانتی‌گراد و توان تابشی خورشید بر روی صفحه عمود (رو به جنوب) در زمستان به طور متوسط $500\ \frac{w}{m^2}$ در نظر گرفته شده است.

دامنه دوبعدی حل تنها شامل فاصله هوایی بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای است. ارتفاع دامنه ۲,۵ متر و عرض آن ۰,۲ متر است. ارتفاع دریچه‌ها ۰,۲ متر و عرض دیواره‌های دریچه‌ها نیز ۰,۲ متر است. دریچه‌های هوا به صورت مرزهای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند. شبکه تولید شده از نوع ساختاریافته[3] چهارگوش منظم[4] است. هندسه، شبکه تولید شده و مرزهای دامنه حل در شکل (۲) نشان داده شده است.




**شکل ۲) شمای هندسه، شبکه تولید شده و شرایط مرزی**

جداره شیشه‌ای دیوار دما ثابت با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و با ضریب جذب (گسیلمندی) تابشی ۰,۰۵، دیوار ترومب دیوار با شار ثابت $500\ \frac{w}{m^2}$ و ضریب جذب ۱، سقف، دیوار دما ثابت با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و زمین دیوار عایق در نظر

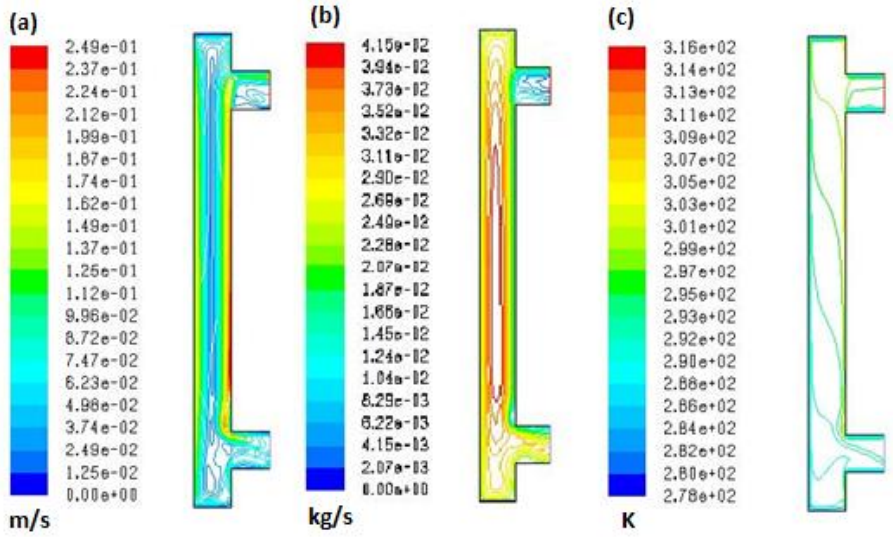
1) Operating Pressure
2) Operating Temperature
3) Structured
4) Quad map

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

گرفته شده‌اند. ضریب جذب تابشی در کلیه دیواره‌ها به غیر از دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای ۰٫۷ است. مرزهای ورودی و خروجی هوا نیز از نوع ورودی و خروجی فشار[1] و با فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۲ درجه در نظر گرفته شده‌اند.

## نتایج شبیه‌سازی مدل مرجع

شبیه‌سازی مدل مرجع مطابق بخش ۳ انجام گرفته است که در ادامه، این نتایج ارائه و بررسی خواهد شد. کانتورهای سرعت، خطوط جریان و دما در دامنه حل به ترتیب در شکل‌های 3-a، 3-b و 3-c نشان داده شده است.




**شکل ۳) (a) کانتور سرعت هوا در دامنه سیال، (b) کانتور خطوط جریان در دامنه سیال، (c) کانتور دمای هوا در دامنه سیال**

همان طور که در کانتور سرعت و خطوط جریان نشان داده شده است، جریان هوا، یک جریان چرخشی در مقطع ارتفاعی دامنه سیال است. جریان هوا در مجاورت دیوار خورشیدی گرم شده و بر اثر افزایش دما به سمت بالا حرکت می‌کند، سپس در برخورد با سقف، مقداری از این هوا از خروجی خارج شده و مقداری نیز دوباره با عبور از کنار جداره شیشه‌ای سرد شده و به سمت پایین حرکت می‌کند. همان طور که در کانتورهای سرعت و خطوط جریان مشخص است، بیشتر حرکت جریان در داخل دامنه حل صورت می‌پذیرد و بخش اندکی از این جریان از دریچه هوا خارج می‌شود. دمای متوسط در دامنه حل نیز با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن به دیوار ترومب در مقطع عرضی افزایش می‌یابد. مشخصات کمی جریان در جدول (۱) ارائه شده است.

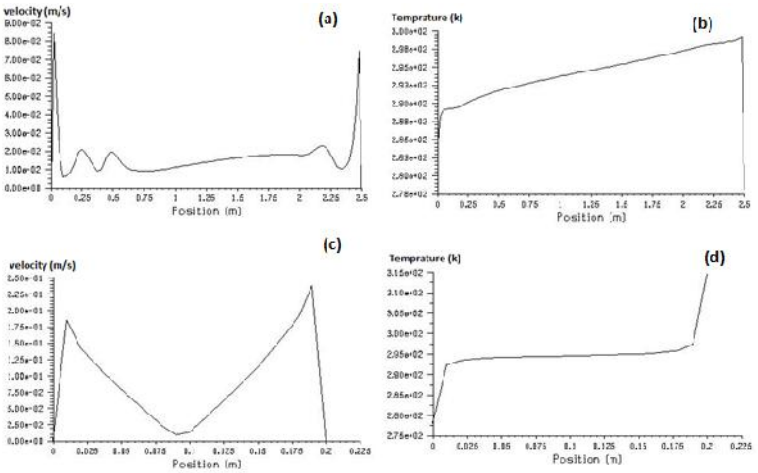
1) Pressure inlet and pressure outlet

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

**جدول ۱) مشخصات کمی جریان هوا در دامنه سیال**

| نام مدل | دبی جریان خروجی از دریچه بالایی (kg/s) | سرعت متوسط جریان خروجی دریچه بالایی (m/s) | دمای متوسط جریان خروجی دریچه بالایی درجه کلوین | دمای متوسط در کل دامنه درجه کلوین | دمای بیشینه در کل دامنه درجه کلوین | سرعت بیشینه در کل دامنه (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مدل مرجع | ۰/۰۰۸۹ | ۰/۰۶۶۷ | ۲۹۵/۶ | ۲۹۴/۴۵ | ۳۰۷/۳۶ | ۰/۲۸۴۳ |

در نمودارهای شکل (۴) تغییرات سرعت و دما بر حسب ارتفاع در خط مرکزی فاصله هوایی دیوار ترومب (نمودارهای a و b) و تغییرات سرعت و دما در مقطع عرضی میانی (ارتفاع ۱,۲۵ متر) (نمودارهای c و d) نشان داده شده است.




**شکل ٤) (a) تغییرات سرعت بر حسب ارتفاع در خط مرکزی فاصله هوایی دیوار ترومب (b) تغییرات دما بر حسب ارتفاع در خط مرکزی فاصله هوایی دیوار ترومب، (c) تغییرات سرعت در مقطع عرضی میانی (ارتفاع ۱,۲۵ متر)، (d) تغییرات دما در مقطع عرضی میانی (ارتفاع ۱,۲۵ متر)**

همان طور که در نمودار شکل 4-a نشان داده شده است، سرعت در مقطع میانی با افزایش ارتفاع بتدریج افزایش می‌یابد. این افزایش تدریجی از ارتفاع ۰,۶ متری تا ۲ متری است. در مقاطع ابتدایی و انتهایی، سرعت دارای نوسان‌های بیشتری است که به علت وجود دریچه‌های ورودی و خروجی است. در شکل 4-b نشان داده شده است که دما به صورت اکیدا صعودی افزایش می‌یابد. این افزایش با توجه به جذب حرارت در دیوار ترومب کاملا منطقی است. همان طور که در شکل 4-c نشان داده شده است، سرعت در مقطع عرضی از سرعت صفر در دیوار شروع شده و در نزدیکی دیواره‌ها به حداکثر خود می‌رسد. کمترین سرعت (جز سرعت در نزدیکی دیواره‌ها) در مقطع مرکزی یعنی فاصله حدود ۰,۱ متری است.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

دلیل این امر بیشتر بودن اختلاف دما در نزدیکی دیوار است. این اختلاف دمای بیشتر باعث تغییرات بیشتری در چگالی و نیروهای شناوری شده و باعث می‌شود سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها بالاتر رود. (نقطه صفر بر روی نمودار واقع در جداره شیشه‌ای است) طبق شکل 4-d، دما در مقطع عرضی از مقدار حداقل آن در کنار جداره شیشه‌ای شروع شده و با شیب تندی به مقدار متوسط در مقاطع میانی می‌رسد، سپس این مقدار در نزدیکی دیوار ترومب با شیب بالایی به مقدار حداکثر خود می‌رسد.

## بررسی پارامترهای موثر بر کارایی دیوار ترومب

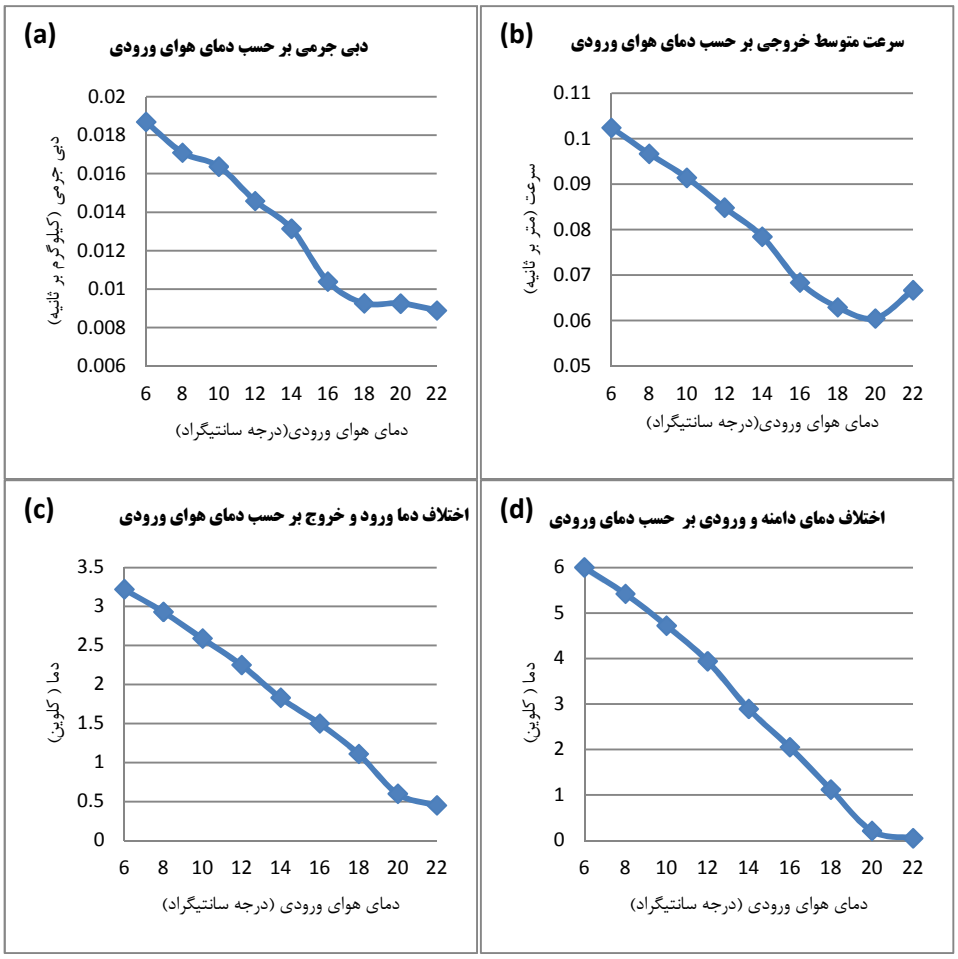
در این بخش، تاثیر برخی از پارامترها بر کارایی دیوار ترومب بررسی می‌شود.

### بررسی تأثیر دمای هوا در دریچه ورودی

در این بخش، هدف بررسی تاثیر دمای هوای اتاق یا به عبارتی دمای هوای ورودی به محفظه دیوار ترومب است. در مدل مرجع، این دما برابر ۲۲ درجه سانتی‌گراد، دمای آسایش مطابق استاندارد اشری[1]، در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه دیوار ترومب تنها قادر به تامین بخشی از گرمایش مورد نیاز در ساختمان است فرض بر این بوده که بخش اصلی گرمایش توسط یک منبع حرارتی کمکی تولید شده و به این ترتیب، دمای هوای داخل ساختمان ثابت و برابر ۲۲ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شده است. در این بخش، هدف بررسی کارایی دیوار ترومب به تنهایی و بدون منبع حرارتی کمکی در دماهای مختلف است. از این رو، شبیه‌سازی‌ها برای دماهای بین ۶ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد انجام شده که نتایج آن در شکل (۵) ارائه شده است. در شکل 5-a، نمودار تغییرات دبی جرمی خروجی، در شکل 5-b ، نمودار تغییرات سرعت متوسط در خروجی، در شکل 5-c ، نمودار تغییرات اختلاف دمای متوسط در خروجی و ورودی و در نمودار شکل 5-d ، نمودار تغییرات اختلاف دمای متوسط در کل دامنه و دمای ورودی نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی این نمودارها بر حسب دمای هوای ورودی رسم شده‌اند.

1) ASHRAE

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

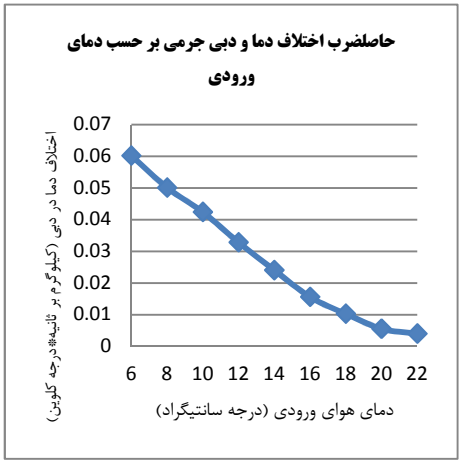



**شکل ۵) (a) تغییرات دبی جرمی خروجی بر حسب دمای هوای ورودی، (b) تغییرات سرعت متوسط خروجی بر حسب دمای هوای ورودی، (c) تغییرات اختلاف دمای ورودی و خروجی بر حسب دمای هوای ورودی، (d) تغییرات اختلاف دمای متوسط دامنه سیال و ورودی بر حسب دمای هوای ورودی**

همان طور که در نمودارهای 5-a و 5-b نشان داده شده است، با افزایش دمای هوای ورودی، دبی خروجی و سرعت متوسط خروجی به طور متوسط کاهش می‌یابد. این بدین معناست که هر چه دمای هوای ورودی به داخل محفظه دیوار ترومب کمتر باشد، دبی و سرعت بیشتر خواهد بود که دلیل آن افزایش اختلاف درجه بین هوا و دیوار ترومب است. در واقع، هر چه دمای اتاق کمتر باشد، دیوار خورشیدی کارایی بیشتری خواهد داشت. از طرف دیگر، با دقت در نمودارهای 5-c و 5-d مشاهده می‌شود که هر چه دمای ورودی بیشتر باشد، اختلاف دمای هوای داخل دامنه و دمای ورودی و اختلاف دمای هوای خروجی و دمای ورودی کمتر است. برای مقایسه بهتر کارایی دیوار ترومب در دماهای ورودی مختلف نیاز

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

است که دبی خروجی و اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی به صورت همزمان مقایسه شوند. حاصل‌ضرب دبی خروجی در اختلاف دمای خروجی و ورودی، شاخص بسیار خوبی برای مقایسه کارایی دیوار ترومب است که در نمودار شکل (۶) نشان داده شده است. البته باید به این نکته اشاره کرد که این شاخص تنها سهم انتقال حرارت جابجایی را در دیوار ترومب نشان می‌دهد.




**شکل ٦) حاصل‌ضرب اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی در دبی جرمی خروجی بر حسب دمای هوای ورودی**

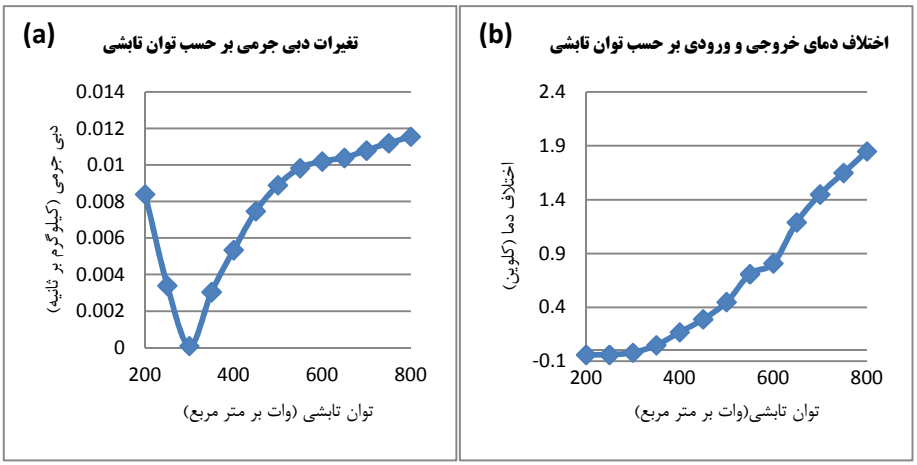
همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، با بالاتر رفتن دما میزان کارایی تجهیز کاهش می‌یابد. این مسئله را می‌توان به این صورت معنا کرد که وجود یک منبع حرارتی مستقل تاثیر منفی بر روی کارایی دیوار ترومب دارد.

## بررسی تاثیر توان تابشی خورشید

میزان تشعشع جذب‌شده توسط دیوار ترومب در مدل مرجع مقدار متوسط ۵۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. با این حال نیاز است که تاثیر مقادیر مختلف تابش جذب شده توسط دیوار ترومب بررسی شود.

نتایج حاصل برای تغییرات توان تابشی بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ وات بر متر مربع و در پله‌های ۵۰ تایی مورد بررسی قرار گرفته است که شامل ۱۳ مدل مختلف است. در نمودارهای شکل (۷) نتایج پارامترهای هدف بر حسب تغییرات میزان توان تابشی نشان داده شده است. پارامترهای هدف عبارت‌اند از: تغییرات دبی جرمی خروجی (نمودار شکل a-۷) و تغییرات اختلاف دمای متوسط در خروجی و ورودی (نمودار شکل b-۷)

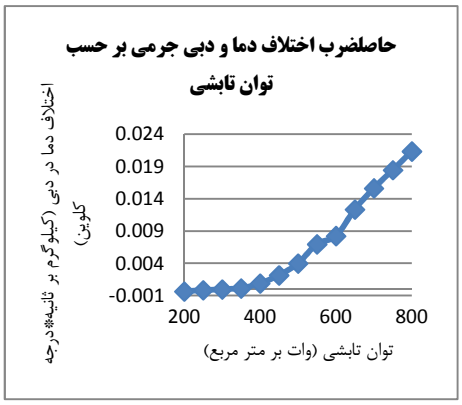
[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]




**شکل ۷) (a) تغییرات دبی جرمی خروجی بر حسب توان تابشی، (b) تغییرات اختلاف دمای خروجی و ورودی بر حسب توان تابشی**

همان طور که در نمودار a-۶ نشان داده شده است، تغییرات دبی بر حسب توان تابشی به صورت خطی (صعودی یا نزولی) نبوده و دارای نقطه کمینه است. دبی با افزایش توان تابشی از ۲۰۰ تا ۳۰۰ وات بر متر مربع کاهش می‌یابد و پس از آن روندی افزایشی طی می‌نماید. حداقل دبی خروجی در توان تابشی ۳۰۰ وات بر متر مربع مشاهده می‌گردد. دلیل افزایش مقادیر دبی خروجی از نقطه کمینه به بعد واضح است؛ با افزایش توان تابشی، انرژی دریافتی توسط دیوار ترومب افزایش یافته که باعث ایجاد اختلاف دمای بیشتر و به تبع آن، افزایش نیروهای شناوری و افزایش دبی خروجی می‌شود. ولی روند کاهنده در ابتدای نمودار کمی عجیب است که احتمالا دلیل آن ایجاد جریان‌های گردابه‌ای قوی در این محدوده است که تا حدی میزان دبی خروجی را کاهش می‌دهد. همان طور که در نمودار b-۶ نشان داده شده است، اختلاف دمای متوسط خروجی با دمای ورودی دارای روند صعودی اکید است. در مجموع، تغییرات شار از ۲۰۰ به ۸۰۰ وات بر متر مربع باعث افزایش اختلاف دما در حدود ۲ درجه می‌گردد. شاخص مناسب‌تر برای مقایسه کارایی دیوار ترومب حاصل‌ضرب دبی در اختلاف دماست که در نمودار شکل (۸) نشان داده شده است. نمودار شکل (۸) نشان دهنده تاثیر زیاد توان تابش بر روی کارایی دیوار ترومب است.

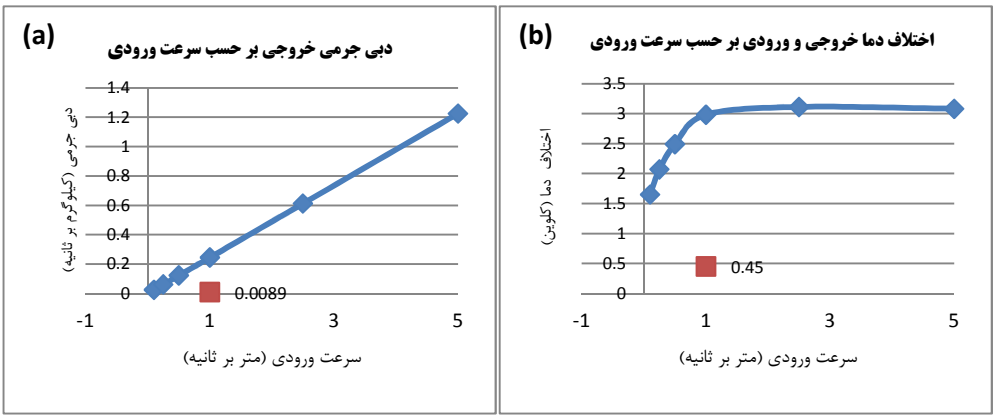
[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]




**شکل ۸) حاصل‌ضرب اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی در دبی جرمی خروجی بر حسب توان تابشی**

## بررسی تاثیر جابجایی اجباری بر روی کارایی دیوار ترومب

در این بخش، تاثیر جابجایی اجباری بر کارایی دیوار ترومب بررسی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، با استفاده از شرط ورودی سرعت ثابت[1] در دریچه ورودی، تاثیر استفاده از دمنده هوا[2] بر روی کارایی دیوار ترومب مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی برای سرعت‌های ۰,۱، ۰,۲۵، ۰,۵، ۱، ۲,۵ و ۵ بررسی و با مدل مرجع مقایسه شده است. نمودارهای تغییرات دبی بر حسب سرعت ورودی و تغییرات اختلاف دمای متوسط در دریچه خروجی و دریچه ورودی به ترتیب در شکل‌های a-۹ و b-۹ نشان داده شده است.

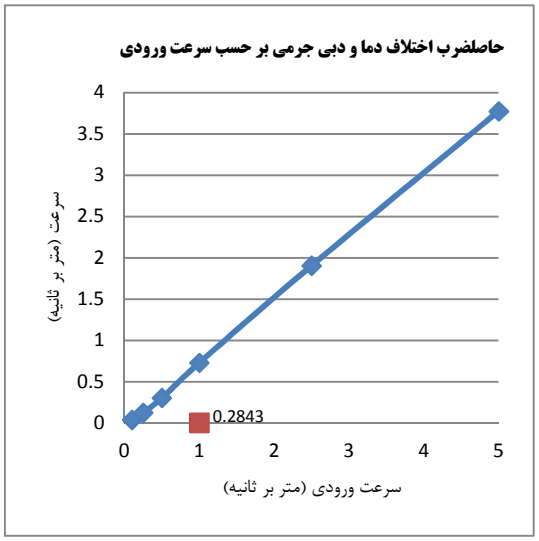



**شکل ۹) (a) تغییرات دبی جرمی خروجی بر حسب سرعت ورودی، (b) تغییرات اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی بر حسب سرعت ورودی**

1) Velocity Inlet
2) Fan

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

همان طور که در نمودار a-۹ نشان داده شده است، دبی خروجی رابطه خطی با تغییرات سرعت ورودی دارد. طبق قانون پایستگی جرم، این مسئله امری بدیهی است. نمودار b-۹ نشان می‌دهد که افزایش سرعت ورودی تا سرعت یک متر بر ثانیه باعث افزایش میزان دمای متوسط خروجی می‌شود. پس از این، مقدار دما به یک حالت ثابت می‌رسد. دلیل ثابت شدن این دما، همگن شدن کامل فضای داخلی دیوار ترومب است. همان طور که از مقایسه انجام‌شده با مدل مرجع پیداست، دمای خروجی در حدود ۲٫۵ درجه افزایش یافته است. با توجه به افزایش زیاد در سرعت خروجی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از فن تاثیر مطلوبی بر روی کارایی دیوار ترومب دارد. جهت بررسی بهتر و دقیق‌تر در شکل (۱۰) نمودار حاصل‌ضرب دبی در اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی نشان داده شده است.




**شکل ۱۰) حاصل‌ضرب اختلاف دمای متوسط خروجی و ورودی در دبی جرمی خروجی بر حسب سرعت ورودی**

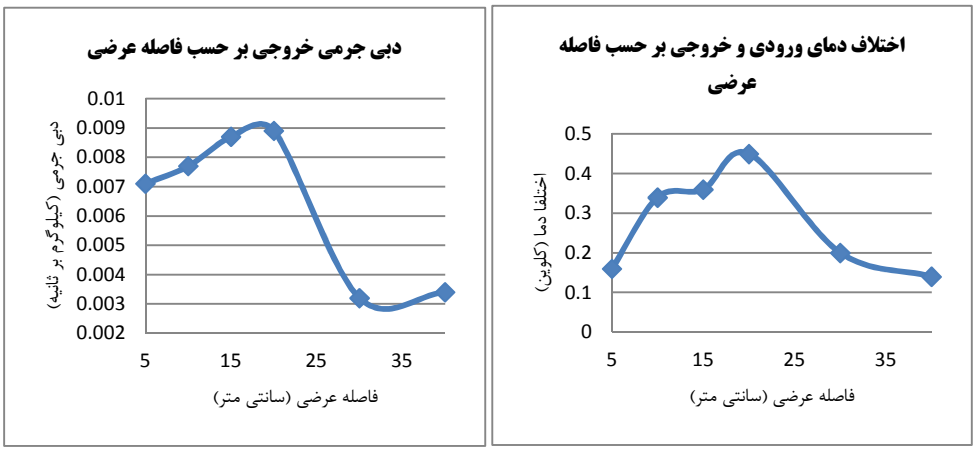
نکته جالب توجه در نتایج، افزایش سرعت خروجی نسبت به سرعت ورودی است. دلیل این افزایش سرعت، تاثیر افزایش انرژی جنبشی (بر اثر افزایش دما) هوا در حین جذب تابش خورشید است. نمودار سرعت خروجی بر حسب سرعت ورودی در نمودار a-۱۱ و درصد نسبی اختلاف سرعت‌ها در نمودار b-۱۱ ارائه شده است. همان طور که در این نمودارها نشان داده شده است، با افزایش سرعت ورودی، سهم تاثیر نیروهای شناوری بر روی سرعت خروجی کاهش می‌یابد.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

**شکل ۱۱) (a) تغییرات سرعت متوسط خروجی بر حسب سرعت ورودی جریان، (b) تغییرات درصد نسبی اختلاف سرعت خروجی و ورودی**

## بررسی تأثیر فاصله عرضی بین دیوار و جداره شیشه‌ای

یکی از عوامل مهمی که بر روی کارایی دیوار خورشیدی تأثیر می‌گذارد، فاصله بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای است. در این بخش، شبیه‌سازی‌ها برای فاصله‌های هوایی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری محاسبه شده است. نتایج تغییرات دبی خروجی بر حسب فاصله‌های مختلف در نمودار a-۱۲ و تغییرات اختلاف دمای خروجی و ورودی بر حسب فاصله‌های مختلف در نمودار b-۱۲ نشان داده شده است.




**شکل۱۲) (a) تغییرات دبی جرمی خروجی بر حسب فاصله عرضی، (b) تغییرات اختلاف دمای ورودی و خروجی بر حسب فاصله عرضی**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

همان طور که در نمودار a-۱۲ نشان داده شده است، دبی خروجی و اختلاف دمای ورودی و خروجی در فاصله هوایی حدود ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر به مقدار بیشینه خود می‌رسد. علت وجود این مقدار بهینه برای فاصله هوایی به شرح زیر است:

اگر فاصله هوایی خیلی کم باشد، جدای از مشکلات ایجادشده جهت نصب و تمیز کاری و ... این امکان وجود دارد که جریان هوا بخوبی در داخل محفظه دیوار ترومب ایجاد نشود. علت این امر، افزایش افت اصطکاکی جریان به دلیل تنگ شدن مسیر حرکت هواست. از طرف دیگر، اگر فاصله هوایی خیلی افزایش یابد، تاثیر منفی بر روی انتقال حرارت جابجایی خواهد داشت. علت اصلی این تاثیر منفی، کاهش بیش از حد سرعت جریان، ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و پایین بودن بیش از حد گرادیان دمایی در عرض محفظه دیوار است.

## نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی دامنه سیال (هوا) در محفظه دیوار ترومب (فاصله هوایی بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای جنوبی) برای مدل مرجع انجام و نتایج آن ارائه شد. چنانچه در کانتورهای ارائه‌شده در بخش ۴ نشان داده شد، جریان‌های گردابه‌ای و چرخشی بر اثر تغییرات چگالی وابسته به دما یا اصطلاحا نیروهای شناوری در دامنه حل ایجاد می‌شود. این شبیه‌سازی به طور کلاسیک جابجایی طبیعی رایلی-بنارد نامیده می‌شود. نمودارهای ارائه‌شده شکل (۴) نیز به صورت کمی به بررسی متغیرهای سرعت و دما در مقاطع عرضی و ارتفاعی مرکزی دامنه پرداخته است.

در ادامه، در بخش ۵ تاثیر پارامترهای مختلف بر روی کارایی دیوار ترومب بررسی شده است. بررسی تاثیر دمای هوای ورودی بر روی کارایی دیوار ترومب نشان داد که هر چه دمای داخل ساختمان (دمای هوای ورودی به محفظه دیوار) کمتر باشد، اختلاف دمای ورودی و خروجی و دبی خروجی افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش کارایی دیوار ترومب می‌شود. همچنین نشان داده شدکه افزایش جذب تابش توسط دیوار ترومب باعث افزایش دبی (جز محدوده خاصی) و افزایش اختلاف دما می‌گردد.

در ادامه، نشان داده شد که استفاده از دمنده هوا و جابجایی اجباری تاثیر بسیار زیادی در افزایش کارایی دیوار ترومب دارد. در رابطه با تاثیر فاصله عرضی (فاصله هوایی) بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای نیز بایستی اشاره کرد که طبق شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، فاصله بهینه بین ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود.

در نهایت، جهت ادامه مطالعات پیشنهاد می‌شود که مطالعات بیشتری بر روی جریان ناپایا و وابسته به زمان بر روی دیوار ترومب در طول یک روز کامل صورت پذیرد. همچنین بررسی انتقال حرارت مزدوج و انتقال حرارت هدایت در بدنه جامد دیوار نیز جهت فهم بهتر فرایند انتقال حرارت در دیوار ترومب بسیار راهگشا خواهد بود.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

## منابع


[1] Alex Yong Kwang Tan and Nyuk Hien Wong, 2013, Parameterization Studies of Solar Chimneys in the Tropics, Energies 2013, 6, 145-163.

[2] A´lvaro Ruiz-Pardo, Servando A´ lvarez Domı´nguez, Juan Antonio Sanz Ferna´ndez, 2010, Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790, Energy and Buildings 42 (2010) 763–773.

[3] A. Mezrhab, M. Rabhi, 2008, MODELING OF THE THERMAL TRANSFERS IN AN ENCLOSURE OF THE TROMBE WALL TYPE, Thermodynamic analysis in renewable energy 10 (62).

[4] Awad R. Mansour, Bassam Ali Jubran, B. Tashtoush, 1991, An approximate analytical solution to convective laminar heat transfer flow within the Trombe wall channel, Int. Comm. Heat mass transfer Vol. 18, pp. 153-159, 1991.

[5] B.A. Jubran, M.A. Hamdan, B. Tashtoush, A.R. Mansour, 1993, An approximate analytical solution for the prediction of transient response of the Trombe wall, Int. Comm. Heat mass transfer Vol. 20, pp. 567-577, 1993.

[6] Basak Kundakci Koyunbaba, Zerrin Yilmaz, 2012, The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels, Renewable Energy 45 (2012) 111e118.

[7] Guillermo Quesada, Daniel Rousse, Yvan Dutil, Messaoud Badache, Stephane Halle, 2012, A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2820– 2832.

[8] Guohui Gan, 2006, Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, Energy and Buildings 38 (2006) 410–420.

[9] Hoy-Yen Chan, Saffa B. Riffat, Jie Zhu, 2010, Review of passive solar heating and cooling technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 781–789.

[10] Jibao Shen, Ste´phane Lassue, Laurent Zalewski, Dezhong Huang, 2007, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, Energy and Buildings 39 (2007) 962–974.

[11] K.S. Ong, 2003, A mathematical model of a solar chimney, Renewable Energy 28 (2003) 1047–1060.

[12] Nwosu P. Nwachukwu, Wilfred I. Okonkwo, 2008, Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Thrombe wall system, Energy and Buildings 40 (2008) 371–374.

[13] P. Torcellini and S. Pless, 2004, Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences, National Renewable Energy Laboratory.

[14] Rakesh Khanal, Chengwang Lei, 2011, Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation, Energy and Buildings 43 (2011) 1811–1819.

[15] R. Ben Yedder, Z.G.Du, E. Bilgen, 1990, Numerical study of laminar natural convection in composite trombe wall systems, solar & wind technology Vol. 7, No. 6, pp. 675-683, 1990.

[16] R. BEN YEDDER and E. BILGEN, 1991, Natural convection and conduction in Trombe wall systems, hr. J. Ifcur Mus, Transfir. Vol. 34, No. 415. pp. 1237-1248, 1991.


[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]

[17] Sangwan Kim, Janghoo Seo, 2012, An Influence of the Opening Location of the Trombe Wall System on Indoor Airflow and Thermal Environment, National Research Foundation of Korea, Gwangju 501-759.

[18] Vı´ctor Herna´ndez, David Morillo´ n, Roberto Best, Jose´ Ferna´ndez, Rafael Almanza, Norberto Chargoy, 2006, Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2464–2469.

[19] Y Li, X Duanmu, Y Sun, J Li and H Jia, 2007, STUDY ON THE AIR MOVEMENT CHARACTER IN SOLAR WALL SYSTEM, Building Simulation 2007.

[20] Ansys fluent Software user guid.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-18 ]