مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 159-169

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی گرمایش غیر فعال دیوار خورشیدی و پیش‌بینی دما با شبکه عصبی مصنوعی و مدل تطبیقی عصبی – فازی (انفیس)

اکرم جهانبخشی[1]، افشین احمدی ندوشن[2*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

2-دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

*شهرکرد، صندوق پستی 115، ahmadi@eng.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آذر 1396

پذیرش: 19 دی 1396

ارائه در سایت: 05 بهمن 1396

کلید واژگان:

شبیه‌سازی عددی

دیوارخورشیدی

شبکه عصبی مصنوعی

انفیس

چکیده

در این مقاله، گرمایش هوا در فضای داخلی اتاق توسط دیوار خورشیدی (ترومب) با در نظر گرفتن هدایت حرارتی این دیوار، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. معادلات مومنتوم و انرژی به روش حجم کنترل جبری شده‌اند و به کمک الگوریتم سیمپل به صورت همزمان حل می‌شوند. در ابتدا یک مدل مرجع معرفی و نتایج آن ارائه شده است و سپس با استفاده از این مدل مرجع، پارامترهای موثر بر کارایی دیوار بررسی شده و در نهایت بهینه‌ترین هندسه برای داشتن دیوار خورشیدی با بهترین عملکرد انتخاب شده است. همچنین جهت افزایش کارآیی، فین‌هایی مستطیل شکل بر روی سطح جاذب دیوار قرار گرفته است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد دیوار خورشیدی با فین مستطیلی در تمامی فواصل هوایی بهتر از دیوار ساده عمل می‌کند و به‌طور نمونه در فاصله هوایی برابر 1 متر، دمای اتاق با وجود فین‌های مستطیلی تقریبا 1.24 درصد بیشتر از دیوار ترومب ساده است. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و انفیس میزان افزایش دمای اتاق با افزایش تعداد فین‌ها روی دیوار پیش‌بینی شده است. شبکه عصبی به گونه‌ای آموزش داده شد که بتواند دمای میانگین اتاق را به تعداد فین‌های روی سطح جاذب دیوار خورشیدی وابسته سازد. نتایج به‌دست آمده و مقایسه مقادیر مربع میانگین خطای استاندارد و مربع مجذور میانگین خطا نشان داد مدل انفیس با مقدار مربع میانگین خطای استاندارد برابر 0.742599 نسبت به شبکه عصبی با مقدار مربع میانگین خطای استاندارد برابر 1.1 در پیش‌بینی دما کارآیی مناسب‌تری دارد.

Simulation of passive heating solar wall and prediction the temperature by Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy model (ANFIS)

Akram Jahanbakhshi, Afshin Ahmadi nadooshan*

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
*P.O.B. 115, Shahrekord, ahmadi@eng.sku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 November 2017
Accepted 09 January 2018
Available Online 25 January 2018

Keywords:
Numerical simulation
Trombe wall
Artificial Neural Network
ANFIS

ABSTRACT

In this paper, the interior air of the room heated by the solar wall (Trombe) with respect to Heat conduction in the wall is numerically simulated. Momentum and energy equations have been Algebraic with finite volume method and at the same time are solved with SIMPLE algorithm. First, a reference model is introduced and the results are presented and then with this reference model, the effective parameters on the performance of the wall were investigated and ultimately the most optimal geometry for the solar wall with the best performance was voted.As well, rectangular fins has been put on the surface of the absorbent wall, in order to increase its efficiency. The results show that solar wall with rectangular fins in all air gaps has better performance than plain wall and for example, with rectangular fins in the air gap equal to 1 m, room temperature is approximately 1.24% more than the simple Trombe wall. Then, using Artificial Neural Networks and ANFIS the values increase of room temperature by increasing the number of fins has been projected on the wall. The neural network was trained in such a way that the average temperature of the room depends on the number of fins on the surface of the absorbent the solar wall. The results obtained and compare mean squared error and root-mean-square error showed that ANFIS With the mean squared error equal to 0.742599 has good performance and acceptable accuracy compared with Neural Network With the mean squared error equal 1.1 to predict temperature.

1- مقدمه

سیستم‌های گرمایش و سرمایش، تهویه طبیعی و منابع تجدیدپذیر انرژی براساس دیدگاه توسعه پایدار همواره مورد توجه هستند. همچنین یکی از مسائل مهم در محیط‌های مسکونی و معماری همساز با اقلیم، مسئله گرمایش این فضاها در فصول سرد و سرمایش آن‌ها در دوره‌های گرم سال برای رسیدن به شرایط آسایش انسان است. لذا با ارائه تمهیدات خاص مربوط به شکل، ابعاد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi nadooshan, Simulation of passive heating solar wall and prediction the temperature by Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy model (ANFIS), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 159-169, 2018 (in Persian)

پنجره‌ها، جنس مصالح ساختمانی و شرایط اقلیمی و ... می‌توان حداکثر صرفه جویی را برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها به‌عمل آورد. در روشی که آن را طراحی پسیو ساختمان می‌نامند پنجره‌ها، دیوارها و طبقات به گونه‌ای ساخته می‌شوند تا انرژی خورشید را به‌صورت گرما در زمستان جمع‌آوری، ذخیره و توزیع کنند و گرمای تابستان را نپذیرند. این سبک از طراحی پسیو، نیاز به فعالیت تجهیزات سرمایشی و گرمایشی و مصرف انرژی فسیلی را به حداقل ممکن می‌رساند. از جمله روش‌های گرمایش غیرفعال، استفاده از دیوار ترومب (دیوار خورشیدی) است. این سیستم مشابه دیوار سنگین بنایی است اما دریچه‌هایی در بالا و پایین دیوار ترومب تعبیه می‌شود تا گرمای ذخیره شده در دیوار از طریق جابجایی هوا به فضاهای داخلی انتقال یابد. این دیوار که در فاصله کمی از یک جدار شیشه‌ای قرار می‌گیرد از موادی با چگالی بالا ساخته می‌شود و جداره آن رنگ آمیزی تیره دارد [1]. گرمایش توسط دیوار ترومب مبتنی بر جذب تابش خورشید توسط دیوار با ظرفیت گرمایی و ضریب جذب تابشی بالا است. این دیوار در ضلع جنوبی ساختمان (سمت آفتاب‌گیر در زمستان برای نیمکره شمالی) قرار می‌گیرد. حرارت جذب شده توسط دیوار ترومب در فضای بین دیوار و جداره شیشه‌ای محبوس شده و از طریق پدیده اثر دودکشی و انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشع به هوای داخل اتاق منتقل می‌گردد. وجود فواصل هوایی در دیوار نیز باعث ایجاد جریان هوا بین این دو فضا می‌شود. به‌طور کلی دیوار ترومب، جرم جذب کننده حرارت است که بین خورشید و فضای داخلی خانه قرار می‌گیرد و با تابش خورشید گرم شده و سپس انرژی خود را به اتاق‌ها می‌دهد. در واقع عملکرد این دیوار جذب و انباشت حرارت ناشی از تابش خورشید است.

1-1- کاربرد انرژی خورشیدی درساختمان‌های کشور ایران

بخش ساختمان یکی ازعمده‌ترین بخش‌های مصرف کننده انرژی در ایران است و لازم است توجه ویژه‌ای به موضوع بهینه‌سازی مصرف سوخت در این حوزه شود. در این بین جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی، راه حل مناسبی است. بخشی از کاربرد انرژی خورشیدی در ساختمان‌ها بهره‌گیری هر چه بهتر از نورخورشید درجهت تأمین نیازهای گرمایشی و سرمایشی است. از آنجایی که ایران دارای حوزه‌های اقلیمی مختلف است امکانات انرژی خورشیدی نیز تابعی از این حوزه‌های مختلف اقلیمی است. ایران با داشتن حدود 300 روز آفتابی در سال جزو بهترین کشورهای دنیا در زمینه پتانسیل انرژی خورشیدی در جهان است. با توجه به استانداردهای بین‌المللی اگر میانگین انرژی تابشی خورشید در روز بالاتر از 3.5 کیلو وات ساعت در متر مربع باشد، استفاده از انرژی خورشیدی اقتصادی و مقرون به صرفه است. در بسیاری از قسمت‌های ایران انرژی تابشی خورشید بسیار بالاتر از این میانگین بین‌المللی است و در برخی از نقاط حتی بالاتر از 7 تا 8 کیلو وات ساعت بر متر مربع اندازه‌گیری شده است. اما به طور متوسط انرژی تابشی خورشید بر سطح سرزمین ایران حدود 4.5 کیلو وات ساعت بر مترمربع است [2]. پژوهش‌های متعددی در زمینه دیوار خورشیدی و پارامترهای موثر بر عملکرد آن انجام شده است. هو و همکاران [3] مطالعات انجام شده بر روی دیوارهای خورشیدی در 15 سال اخیر را، براساس عملکرد گرمایشی و نیز سرمایشی این دیوارها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای دیوار ترومب، پارامترهای ساختمان و پارامترهای محیط مورد مطالعه، دیوارهای ترومب را از سه دیدگاه، انرژی، محیط زیست و اقتصادی ارزیابی کردند. بن‌یدر [4] جابجایی طبیعی آرام در دیوار خورشیدی کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داد. در پژوهش وی از الگوریتم سیمپلر استفاده شده است و نشان می‌دهد که نسبت عرض به ارتفاع دیوار خورشیدی تاثیر زیادی برکارایی سیستم ندارد. گان [5] با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار فلوئنت به بررسی اثر نیروی شناوری بر جابجایی طبیعی در محفظه‌ای چهارگوش پرداخته است. مزراب و همکارانش [6] علاوه بر مدل‌سازی جابجایی طبیعی، معادلات تشعشع را نیز در نظر گرفتند و نشان دادند که در نظر گرفتن تشعشع باعث کاهش گرادیان‌های دما و افزایش عدد نوسلت متوسط در دامنه حل می‌گردد. کیم و همکاران [7] با استفاده از حل دینامیک سیالات محاسباتی از طریق روش حجم محدود تاثیر محل دریچه‌های ورودی و خروجی در دیوار خورشیدی را بررسی کردند. حقیقی و همکاران [8] به بررسی پدیده تهویه خورشیدی و گرمایش فضای داخلی یک ساختمان در روزهای آفتابی فصل زمستان با استفاده از دودکش خورشیدی پرداختند و نتایج کار خود را برای دماهای متفاوتی از هوای محیط پیرامون ارائه دادند. احمد و آتالا [9] خنک‌سازی اتاقی در تابستان را توسط دیوار ترومب و یک واحد خنک کننده تبخیری در یک منطقه گرم و خشک بررسی نمودند. در این آزمایش آن‌ها با اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف اتاقک تست به این نتیجه رسیدند که دمای اتاق نسبت به دمای محیط خارج کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. یانگ و ونگ [10] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، دودکش خورشیدی را در مناطق گرم و مرطوب شبیه‌سازی کردند و تاثیر دمای هوا بر روی کارایی دیوار ترومب را بررسی نمودند. دارکوا و اوکالاقان [11] کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به‌صورت لایه‌ای، مسطح و نازک برای متعادل‌سازی دمای اتاق در شب مفیدتر است و دمای اتاق را به میزان 17% بیشتر از لایه‌ای که شامل مخلوط ماده تغییر فاز دهنده و گچ است افزایش می‌دهد. کیواسادا و همکاران [12] انواع روش‌های جدید فعال و غیرفعال تهویه مطبوع خورشیدی را بررسی کردند. این مقاله در مورد نماهایی است که جاذب و منعکس کننده تابش خورشیدی هستند اما نمی‌توانند به‌طور مستقیم انرژی خورشیدی را به ساختمان انتقال دهند. اونیشی و همکاران [13] رفتار گرمایی اتاق دارای دیوار ترومب را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر انرژی خورشیدی، یک گرمکن الکتریکی نیز در دیوار تعبیه شده بود. در این مطالعه هفت نوع مختلف (تابلوی بتنی و سه تابلو با سه نوع ماده‌ی تغییر فاز دهنده با گرمکن و بدون گرمکن الکتیریکی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که این کاربرد برای خانه‌های با مصرف کم انرژی سودمند است. لی و همکاران [14] با ارایه مدل ریاضی و حل معادلات حاکم بر جریان در سیستم دیوار خورشیدی ترومب با استفاده از روش حجم محدود نشان دادند که مهمترین عامل موثر بر جذب حرارت، فاصله هوایی بین دیوار ترومب و جداره شیشه‌ای است. همچنین نشان دادند که افزایش گرمای خورشیدی و عرض کانال، دو پارامتر تاثیرگذار بر مقدار جریان هوا و انتقال گرما است. فرس [15] اثرات تغییر مولفه‌های دیوار ترومب در بار حرارتی ساختمان را مورد مطالعه قرار داد و از زبان برنامه نویسی جاوا برای محاسبه بار حرارتی، افزایش انرژی خورشیدی و انرژی کمکی با توجه به تغییرات موجود استفاده کرد. تست‌های آزمایشگاهی بر روی دیوار ترومب در دو ساختمان کم مصرف توسط تورسلینی و همکاران [16] انجام گرفت و نتایج از طریق ثبت داده‌های شار گرمایی توسط حسگرهای دما و عکسبرداری مادون قرمز بررسی شد. آن‌ها دریافتند که اثر خالص حرارتی سالانه دیوار در هنگام طراحی دیوار ترومب باید در نظر گرفته شود زیرا بارهای خنک‌کننده اضافی بر عملکرد سیستم خنک‌کننده تاثیرگذار است. ربانی و همکاران [17]

تجزیه و تحلیل انتقال حرارت در دیوار ترومب با طراحی کانال جدید در یزد را برای کوتاه‌ترین و گرم‌ترین روزهای زمستان مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها بررسی تاثیر نوع انتقال حرارت بر تغییرات دما در پشت دیوار ترومب و جذب انرژی در طول روز بود. آن‌ها با یک طراحی جدید، عملکرد دیوار ترومب را بهبود بخشیدند و نشان دادند که نقش انتقال هدایت در ساعت‌های اولیه و اواخر روز محسوس‌تر از انتقال گرمای جابجایی است. همچنین نشان دادند که انتقال گرما در سردترین روز به علت اختلاف دما در بین قسمت‌های مختلف سیستم دیوار ترومب بیشتر است. جلال و سجدا [18] از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی جریان جابجایی آزاد در اتاق با وجود دیوار ترومب استفاده کردند و تاثیر مصالح مختلف را بر عملکرد دیوار گرمایی بررسی نمودند. به منظور مطالعه تاثیر وجود پره، فنایی و همکاران [19] به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد مبادله کن‌های گرمایی لوله‌ای پره‌دار پرداختند. آن‌ها 4 نوع زائده تولید کننده گردابه از جمله مثلثی ساده، مثلثی زاویه دار، مکعبی ساده و مکعبی زاویه‌دار را به منظور بررسی افزایش میزان انتقال حرارت بین سیال و سطح پره و جداره لوله در نظر گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین افزایش عدد ناسلت و افت فشار برحسب عدد رینولدز به ترتیب با میزان 80٪ و 2.95٪ مربوط به مدل‌های بدون گردابه (مدل پایه) و مدل با گردابه مکعبی زاویه‌دار است. در کار حاضر اثرات انتقال حرارت جابجایی، تشعشع و هدایت برای دیوار خورشیدی، در نظر گرفته شده است. همچنین تلاش شده است تا طرحی بهینه جهت افزایش کارایی دیوار خورشیدی در زمستان ارائه شود. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی و حل دامنه جریان سیال و انتقال حرارت در دیوار ترومب برای شرایط ذکر شده و پیش‌بینی دما با شبکه عصبی مصنوعی و مدل تطبیقی عصبی – فازی (انفیس) است.

2- مدل فیزیکی، فرضیات و شرایط مرزی

در این مقاله هندسه مورد نظر مطابق "شکل 1" اتاقی دوبعدی است که ضلع جنوبی آن مقابل تابش خورشید قرار دارد. ابعاد مورد تحلیل برای اتاق $4(m) \times 4(m)$ انتخاب شده است و فرض بر این است که دیواره جنوبی به منظور افزایش شار حرارتی و عبور بهتر نور خورشید از جنس شیشه و دیواره شمالی به‌منظور جذب بیشتر نورخورشید و ایجاد گرادیان حرارتی بالاتر از جنس سفال است. مشخصات این مواد در جدول 1 بیان شده است.

همچنین اتاق دارای دریچه ورودی و خروجی هوا، به ترتیب با ابعاد (m) 0.5 و (m) 0.2 است. جهت تحلیل مساله ابعاد فاصله هوایی و فاصله سطح جاذب دیوار تا شیشه متغیر در نظر گرفته شده است. ضخامت دیوار همواره ثابت و برابر (m) 0.2 است. در یک طرح خورشیدی دو مسئله اصلی شامل چگونگی طراحی برای بهره‌وری بیشتر از انرژی خورشیدی و توجه به چگونگی طراحی برای به حداقل رساندن اتلاف‌های حرارتی مطرح می‌شود که عدم توجه به هر یک از این موارد، موجب عدم کارایی لازم طرح موردنظر خواهد شد. به همین جهت در ادامه تحلیل‌ها تاثیر افزودن فین‌های مستطیلی به سطح جاذب دیوار مطالعه شده است و مقادیر افزایش دمای اتاق با افزایش تعداد فین‌ها به کمک شبکه عصبی مصنوعی و مدل انفیس بررسی شده است تا بهینه‌ترین مدل جهت پیش‌بینی دما انتخاب گردد. "شکل 1" بیانگر شرایط مرزی حاکم بر شبیه‌سازی حاضر در نرم افزار انسیس- فلوئنت است. شرایط مرزی در ورودی و خروجی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان مشخص هستند. انتخاب این شرط در زمانی که احتمال وجود جریان برگشتی در طول مراحل تکرار برای برقراری نرخ همگرایی وجود دارد مناسب است. فشار کاری محیط برابر یک اتمسفر لحاظ شده است. سیال عامل نیز هوا است. محاسبات براساس شرایط اقلیمی معتدل انجام می‌پذیرد. از اینرو دمای متوسط محیط خارج در زمستان به‌طور میانگین 10 درجه سانتی‌گراد و توان تابشی خورشید بر روی دیواره شیشه‌ای در زمستان به طور متوسط 100 ،300 و 500 وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. مشخصات تشعشعی مصالح نیز در جدول 2 ذکر شده است. با توجه به استفاده از تشعشع در این مطالعه در مرزهای ورودی و خروجی قابلیت انتشار متناسب با مرز، مورد توجه قرار گرفته است. تابش خورشید از طریق جدار شیشه‌ای منتقل شده و سپس توسط سطح جاذب دیوار جذب می‌شود و دمای آن افزایش می‌یابد که منجر به افزایش دمای هوای محصور و کاهش چگالی آن می‌شود. در نتیجه حرکت جریان هوا به سمت فاصله هوایی آغاز شده و در نهایت به فضای داخلی اتاق راه می‌یابد. استفاده از شیشه کم گسیل به طور محسوسی کارایی دیوار ترومب را افزایش می‌دهد ولی از آن‌جایی که دسترسی به شیشه ساده در مقایسه با نوع کم گسیل آسان‌تر است در این شبیه‌سازی نیز مشخصات شیشه ساده مدنظر قرار گرفته است. در روش حل عددی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی بازده دیوار خورشیدی، با توجه به میانگین دمای حاصل شده در فضای اتاق و در فصل زمستان، لازم است بسیاری از پارامترها به خصوص میزان تشعشع را به صورت کنترل شده شبیه‌سازی نمود. تولید شبکه و شبیه‌سازی در تمامی مدل‌ها توسط نرم‌افزار انسیس – فلوئنت انجام شده است. روش گسسته‌سازی و حل عددی معادلات براساس روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل است. همچنین گسسته‌سازی متغیر فشار طبق روش پرستو[1] بوده و گسسته‌سازی سایر متغیرها نیز مرتبه دو است. مطالعه عددی نیز به صورت پایا است. معادلات حاکم بر حل مسئله شامل معادلات پیوستگی، معادله اندازه حرکت، معادله انرژی، معادلات جریان آشفته دو معادله‌ای خطی مدل $k-\varepsilon$ [2] و معادله تشعشع مدل DO[3] است. هنگام استفاده از این مدل باید ضرایب جذب و پراکندگی مربوط به هوا و ضریب شکست سطوح برای محیط‌های جامد و نیز سیال تعریف شود. در این مطالعه شیشه به‌عنوان سطح نیمه‌شفاف و سایر دیوارها به عنوان سطوح کدر در نظر گرفته شده‌اند. دقت همگرایی باقیمانده‌ها نیز برابر 10^{-6} انتخاب شد.

3- معادلات حاکم

با توجه به این‌که جریان مورد بررسی در این مطالعه جریان آشفته است،

جدول 1 مشخصات مصالح مورد استفاده در دیوار خورشیدی

Table 1 Specifications of materials used in solar walls

جنس مصالح در سیستم دیوار خورشیدی	چگالی (kg/m^3)	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)
هوا	1.225	0.0242	1006.43
سفال (آجر)	1700	0.69	840
شیشه	2203	1.05	840

جدول 2 مشخصات تشعشعی مصالح مورد استفاده در دیوار خورشیدی [8]

Table 2 Radiation specifications of materials used in solar walls [8]

سطوح	ضریب جذب(α)	ضریب نشر(ε)
سطح جاذب سفالی(آجری) دیوار	0.95	0.95
شیشه	0.06	0.9

[1] Prest
[2] Discrete Ordinates
[3] Realizable $k-\varepsilon$

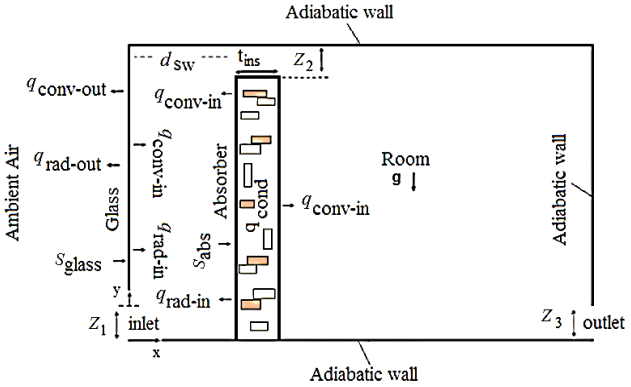


Fig. 1 Boundary conditions simulation

شکل 1 نمایش شرایط مرزی حاکم بر شبیه‌سازی

معادلات اصلی پیوستگی، مومنتوم در جهت x و مومنتوم در جهت y به صورت روابط (1- 3) می‌باشند [8]:

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

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{u})}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial y}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left((\mu+\mu_t)\frac{\partial(\bar{u})}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left((\mu+\mu_t)\frac{\partial(\bar{u})}{\partial y}\right)-\frac{2}{3}\rho\frac{\partial k}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{v})}{\partial y}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left((\mu+\mu_t)\frac{\partial(\bar{v})}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left((\mu+\mu_t)\frac{\partial(\bar{v})}{\partial y}\right)-\frac{2}{3}\rho\frac{\partial k}{\partial y}-\rho_0\beta(T-T_0)g \tag{3}$$

معادلات انتقال برای انرژی جنبشی جریان مغشوش k، و ε در مدل $k-\varepsilon$ به صورت رابطه‌های (4) و (5) است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\delta_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k+P_b-\rho\varepsilon+S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_j)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}P_b+S_\varepsilon \tag{5}$$

$$C_{1\varepsilon}=1.44\,,C_{3\varepsilon}=-0.33\,,C_2=1.9,\delta_k=1.0\,,\delta_\varepsilon=1.2$$

P_k بیانگر تولید انرژی جنبشی مغشوش ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط است و P_b تولید انرژی جنبشی متلاطم ناشی از شناوری است.

$$P_k=\mu_t s^2 \tag{6}$$

$$P_b=\beta g_i\frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{7}$$

Pr_t عدد پرانتل جریان مغشوش است که در مدل $k-\varepsilon$ برابر 0.85 در نظر گرفته می‌شود. g_i نیز مولفه بردار گرانشی در جهت i است. معادله انرژی برای ناحیه سیال به صورت رابطه (8) و در نواحی جامد معادله انرژی به صورت رابطه (9) است [8]:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}T_f)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\bar{v}T_f)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\frac{\lambda}{c_p}+\frac{\mu_t}{pr_t}\right)\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\frac{\lambda}{c_p}+\frac{\mu_t}{pr_t}\right)\frac{\partial T_f}{\partial y}\right) \tag{8}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho h')\right)=\nabla(\acute{k}\nabla T)+c' \tag{9}$$

T دما، ρ چگالی و h' آنتالپی محسوس است. $\acute{k}$ نیز ضریب هدایت حرارتی است و c' می‌تواند منابع گرما (به صورت حجمی) در نظر گرفته شود.

هدف از این مطالعه ارائه بهترین شکل طراحی دیوار خورشیدی به منظور گرمایش فضای داخلی ساختمان و در محدوده شرایط آسایش انسان است. اغلب افراد زمانی که حرارت محیط برابر با 22 درجه سانتی‌گراد است در شرایط آسایش خواهند بود [20].

4- شبکه عصبی مصنوعی

یک شبکه عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از نرون‌های متصل به هم در لایه‌های مختلف است که اطلاعاتی را برای یکدیگر ارسال می‌کنند. ساده‌ترین شکل شبکه فقط یک لایه ورودی و یک لایه خروجی دارد. شبکه شبیه یک سیستم ورودی-خروجی عمل می‌کند و ارزش نرون‌های ورودی را برای محاسبه ارزش نرون خروجی مورد استفاده قرار می‌دهد. معمولا یکی از ورودی‌ها برای تمام مشاهدات دارای ارزش یک است و جمله اریب نامیده می‌شود. ارتباط میان یک ورودی و خروجی به وسیله یک وزن، که بیانگر اهمیت نسبی ورودی مذکور در محاسبه ارزش خروجی است مشخص می‌شود [21]. برای پیدا کردن ارزش وزن‌های شبکه از اصطلاح یادگیری استفاده می‌شود. یادگیری به دو صورت تحت نظارت و بدون نظارت است. در یادگیری با نظارت، ارزش‌های متغیر هدف مشخص شده و سپس خطای پیش‌بینی توسط محاسبه اختلاف خروجی شبکه با ارزش‌های متغیرهای هدف، اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های مختلف تکرار وزن‌های شبکه تعدیل می‌شود و اصطلاحا شبکه آموزش داده می‌شود به شکلی که خطای پیش‌بینی داخل نمونه که به وسیله مجموع مربعات خطا یا میانگین خطای مطلق اندازه‌گیری شده است، حداقل شود. همین‌طور که وزن‌ها با هر تکرار تغییر می‌کند بیان می‌شود که شبکه در حال یادگیری است.

5- سیستم فازی عصبی انفیس

ایجاد یک سیستم فازی قدرتمند نیاز به سعی و خطا برای رسیدن به بهترین کارآیی ممکن دارد. یکی از سیستم‌های عصبی فازی معروف برای تخمین توابع، مدل انفیس است که توسط جانگ و همکارانش پیشنهاد شد [22]. ساختار انفیس شامل قابلیت‌های استنتاج سیستم فازی و انطباق‌پذیری شبکه عصبی است. انفیس روشی برای بهبود بخشیدن به قوانین سیستم فازی با کمک الگوریتم‌های آموزشی در شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی، انفیس به‌علت تنظیم پذیری پارامترهای سیستم فازی، سریع‌تر آموزش می‌بیند و همچنین دقت بیشتری دارد زیرا یک سیستم فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند [23]. در انفیس لازم است در لایه اول نوع تابع عضویت و تعداد آن مشخص شود.

6- اعتبارسنجی روش حل

به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی در این پژوهش، مقادیر متوسط دمای اتاق برای شدت تابش‌های مختلف در کار حاضر و مرجع [8] مقایسه شده است. "شکل 2" نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج حاصل شده می‌باشد. در مرجع [8] حقیقی و معرفت، قابلیت دودکش خورشیدی را برای پاسخگویی به نیازهای حرارتی افراد و تهویه مورد نیاز در روزهای زمستان به صورت عددی بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که این سیستم قادر است شرایط آسایش خوبی را در طول یک روز زمستانی برای فضای داخلی اتاق ایجاد نماید. آن‌ها حتی در شدت تابش ضعیف خورشید برابر با 215 وات بر متر مربع و دمای پایین محیط خارج برابر با 5 درجه سانتی‌گراد، به نتایج قابل قبولی دست یافتند.

احمد و آتالا [9] بررسی تجربی سرمایش غیرفعال خورشیدی در مناطق گرم با استفاده از دیواره‌های ترومب همراه با رطوبت‌زنی را انجام داده‌اند. در این مرجع روشی جهت کاهش گرمای حاصل از تشعشعات خورشیدی وارد شده به ساختمان در فصل تابستان ارائه شده است که شامل دیوار ترومب و یک واحد خنک کننده تبخیری است و در یک اتاقک تست به‌صورت آزمایشگاهی اجرا شده است. هندسه‌های مطالعه شده در مراجع [8] و [9] در "شکل 3" نشان داده شده است. در ادامه تغییرات زمانی دمای متوسط اتاق نیز در کار حاضر و مرجع [9] با یکدیگر در "شکل 4" مقایسه شده است که بیانگر این است که تقارب نزدیکی بین نتایج وجود دارد.

7-استقلال حل از شبکه

برای حل کاملا دقیق یک میدان جریان آشفته لازم است از شبکه محاسباتی

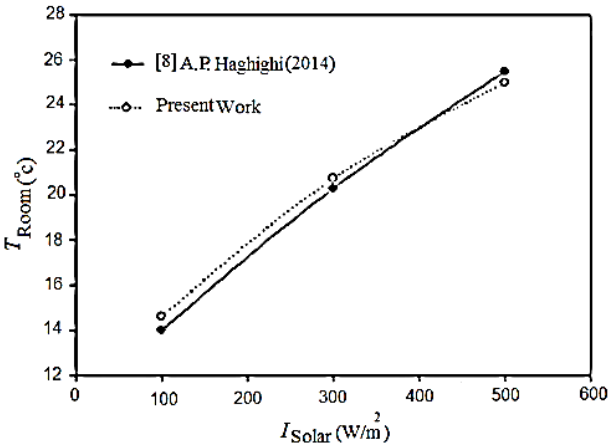


Fig. 2 Compare simulation results and results of reference [8]

شکل 2 مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج مرجع [8]

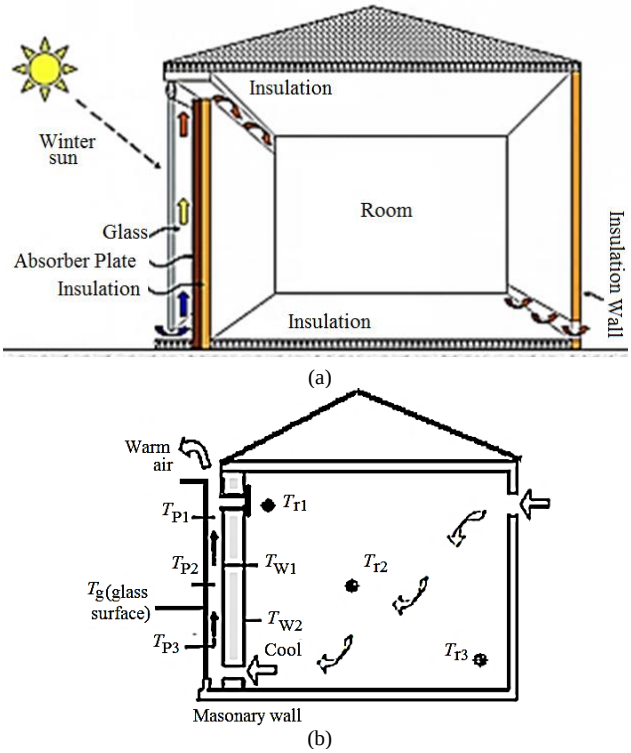


Fig. 3 The geometry studied in the references (a) [8] & (b) [9]

شکل 3 هندسه مطالعه شده در مراجع (a) [8] و (b) [9]

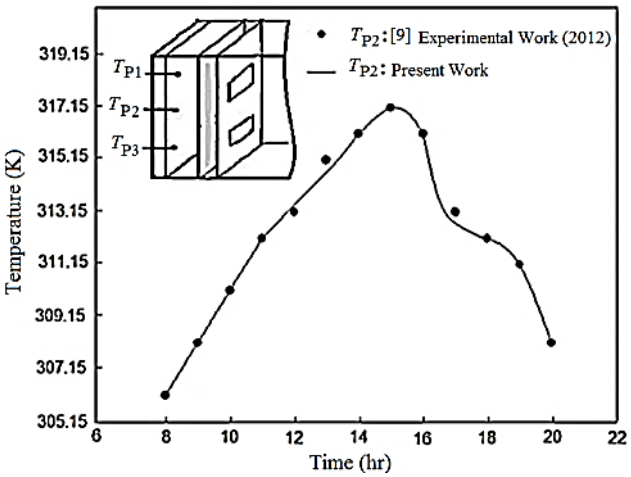


Fig. 4 Compare simulation results and results of reference [9]

شکل 4 مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج مرجع [9]

استفاده شود که اندازه المان‌های آن کوچک‌تر از، کوچک‌ترین گردابه‌های موجود در جریان باشد. در نزدیکی دیواره‌ها، جریان تحت تاثیر لزجت قرار دارد. سرعت جریان متوسط فقط به فاصله y از دیوار، چگالی سیال، لزجت سیال و تنش برشی دیوار بستگی خواهد داشت. ضخامت سلول‌های نزدیک جدار را می‌توان با مقدار y^+ مثبت چک کرد. y^+ پارامتری بی‌بعد است و طبق رابطه (10) تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \tag{10}$$

در این تحقیق مقدار y^+ در سلول‌های نزدیک دیوار ترومب $y^+ \approx 1$ است تا به خوبی در داخل زیر لایه لزج قرار گیرد.

برای انتخاب شبکه حل مناسب، میانگین دمای اتاق، برای شبکه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود از شبکه 60×60 به بعد اختلاف بسیار ناچیزی در مقادیر متوسط دمای اتاق وجود دارد.

8- بیان نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

8-1- بررسی اثر فین‌ها و ارتفاع دیوار ترومب بر شکل جریان‌های هوایی، انتقال حرارت و دمای میانگین اتاق

"شکل‌های 5 و 6" بیانگر خطوط جریان و دما برای حالت‌های مختلف دیوار خورشیدی ساده و دیوار خورشیدی با فین مستطیلی است. این نتایج برای شدت تابش 500 وات بر متر مربع ارائه شده است. فین‌ها یا همان سطوح گسترش یافته در سیستم‌های حرارتی به منظور افزایش حرارت، زمانی کاربرد دارند که انتقال حرارت رسانشی در داخل جسم و انتقال حرارت جابجایی از مرزهای آن به‌طور همزمان صورت گیرد. مشاهده می‌شود در فاصله‌های هوایی کوچک روند تشکیل گردابه‌ها برای دیوار ساده نسبت به دیوار فین‌دار متفاوت است. هر چه فاصله هوایی بزرگ‌تر شود این تفاوت کم‌تر شده و در این حالت گردابه‌ها تقریبا مشابه هستند. با توجه به آسایش حرارتی ساکنین اتاق مطلوب این است که تلاش گردد تعداد گردابه‌های به وجود آمده کم شود تا چرخش یکنواخت‌تری از هوا در داخل اتاق وجود داشته باشد. این شرایط با

جدول 3 تاثیر تعداد نقاط شبکه بر میانگین دمای اتاق

Table 3 The impact of the network on the average room temperature

تعداد گره	30×30	45×45	60×60	75×75	90×90
T_{Room}(K)	289.014	288.32	287.5	287.47	287.46

در نظر گرفتن فین‌هایی روی سطح جاذب دیوار و در فضایی که برای ساکنان قابل استفاده و دسترسی نیست (همان فضای بین سطح شیشه‌ای و سطح جاذب دیوار) حاصل شده است. هر چه فاصله هوایی بزرگ‌تر باشد برای ساکنین اتاق مطلوب‌تر است، زیرا در سمت نورگیر اتاق قرار دارد و فضای داخلی اتاق می‌تواند نور بهتری را از ضلع جنوبی ساختمان دریافت نماید. بنابراین در مورد فواصل هوایی بزرگ‌تر استفاده از فین کاربرد بیشتری دارد

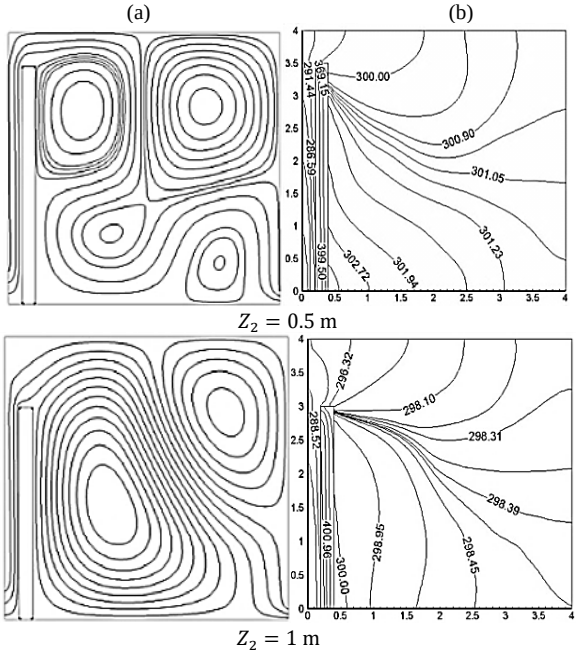


Fig. 5 Flow lines (a) and temperature lines (b) for simple wall in conditions $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 5 خطوط جریان (a) و خطوط دما (b) برای دیوار ساده در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

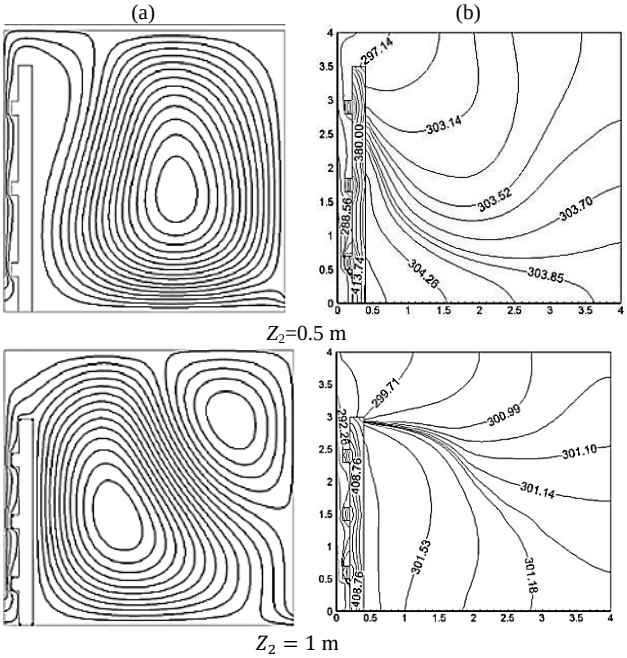


Fig. 6 Flow lines (a) and temperature lines (b) to the wall with rectangular fins in conditions $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 6 خطوط جریان (a) و خطوط دما (b) برای دیوار با فین مستطیلی در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

زیرا میانگین دمایی بالاتری را برای اتاق ایجاد کرده است. اگر فاصله هوایی خیلی کوچک باشد غیر از مشکلات ایجاد شده جهت نصب و تمیزکاری و ... این امکان وجود دارد که جریان هوا به خوبی ایجاد نشود.

علت این امر، افزایش افت اصطکاکی جریان به دلیل تنگ شدن مسیر حرکت هوا است. از طرف دیگر، اگر اندازه فاصله هوایی افزایش چشمگیری 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 فضای بین دیوار و شیشه است. همچنین از مقایسه خطوط همدما در نقاط یکسان و حالت‌های مشابه می‌توان مشاهده نمود که فین مستطیلی باعث می‌شود دمای بالاتری در اتاق ایجاد شود و کم‌ترین دما مربوط به دیوار بدون فین است. بنابراین فین مستطیلی برای بهینه کردن عملکرد دیوار خورشیدی راهکار مناسبی است. وجود فین مستطیلی میانگین دمایی بالاتری را برای اتاق ایجاد می‌کند که این موضوع در نمودار "شکل 7" نیز مشخص است و بیانگر میانگین دمایی اتاق در فواصل هوایی مختلف است. ساخت فین مستطیلی نیز از لحاظ طراحی هندسه راحت و ارزان‌تر از سایر شکل‌های هندسی است. از مقایسه خطوط دما و همچنین با توجه به "شکل 7" مشخص است که با افزایش فاصله هوایی دمای میانگین اتاق کاهش می‌یابد. بنابراین برای داشتن دمای بالاتر نیاز به فاصله هوایی کوچک‌تر است. دلیل این امر را می‌توان افزایش سطح انتقال حرارت دانست.

8-2- اثر افزایش توان تابشی

با افزایش توان تابشی، انرژی دریافتی توسط دیوار ترومب افزایش می‌یابد که این امر باعث ایجاد اختلاف دمای بیشتر و افزایش نیروهای شناوری و طبیعتا افزایش دبی جریان خروجی خواهد شد. همان‌طور که در کانتورهای خطوط جریان مشخص است، جریان هوا یک جریان چرخشی در مقطع ارتفاعی دامنه سیال است که 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 فاصله هوایی خارج شده و با ورود به فضای اتاق که دمای کم‌تری دارد، به سمت پایین حرکت می‌کند. "شکل‌های 8 و 9" بیان کننده دمای میانگین اتاق در شدت تابش‌های متفاوت برای دیوار خورشیدی ساده و فین‌دار است. نکته قابل توجه این است که در شدت تابش بالا، با افزایش فاصله هوایی در

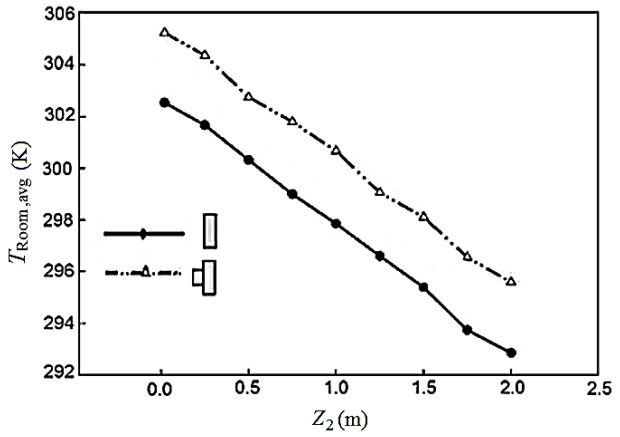


Fig. 7 Compare the average temperature room in the $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 7 مقایسه دمای میانگین اتاق در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

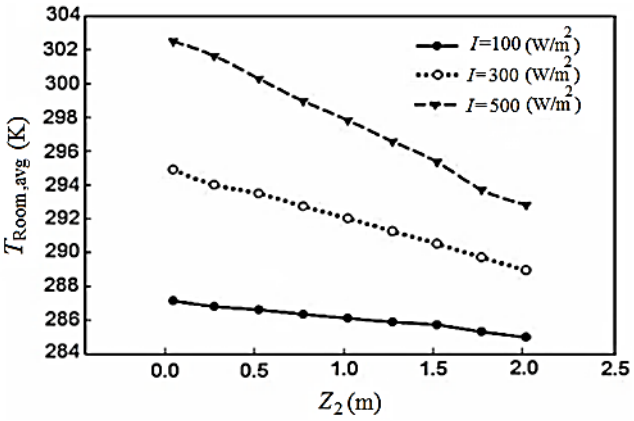


Fig. 8 Compare the average temperature of the room at different radiation intensity for simple wall in the condition $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 8 مقایسه دمای میانگین اتاق در شدت تابش‌های متفاوت برای دیوار ساده در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

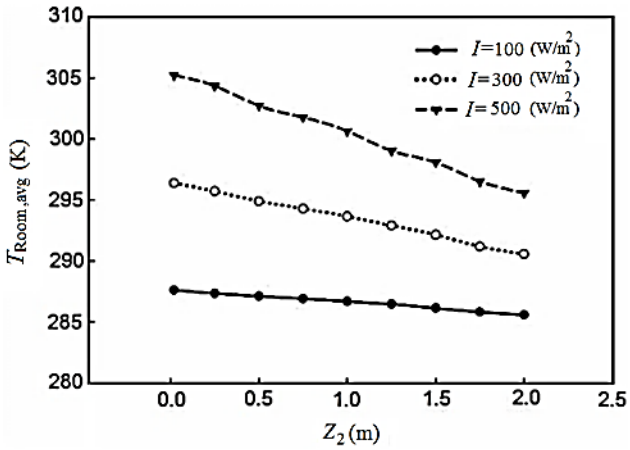


Fig. 9 Compare the average temperature of the room at different radiation intensity for the wall with rectangular fins in the condition $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 9 مقایسه دمای میانگین اتاق در شدت تابش‌های متفاوت برای دیواره با فین مستطیلی در $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

هر دو هندسه دیوار، کاهش شدیدتری در دمای میانگین اتاق مشاهده می‌شود.

8-3- بررسی تأثیر فاصله عرضی بین سطح جاذب دیوار و جداره شیشه‌ای

یکی از عوامل مهم که بر کارایی دیوار خورشیدی تأثیرگذار است، فاصله بین دیوار جاذب و جدار شیشه‌ای است. کانتورهای دما و خطوط جریان و نیز مقایسه دمای میانگین اتاق در حالت‌های مختلف d_{sw} در "شکل 10" و نمودار "شکل 11" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله عرضی، دمای میانگین اتاق کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه هدف دستیابی به دمای میانگین بالاتری است، در این هندسه و برای شدت تابش‌های موجود مقدار بهینه فاصله d_{sw} را می‌توان در محدوده $0.1(\mathrm{m}) \ll d_{sw} \ll 0.3(\mathrm{m})$ در نظر گرفت. همچنین از مقایسه نتایج تا این مرحله مشخص است که تاثیر تغییرات فاصله هوایی در میانگین دمای اتاق نسبت به تغییرات فاصله عرضی بین سطح جاذب دیوار و جداره شیشه‌ای بیشتر است.

8-4- مقایسه شار حرارتی در حالت‌های مختلف بر روی سطح داخلی

در این قسمت شار حرارتی منتقل شده به هوای در حال جریان در اتاق، برای دیوار ساده و دیوار فین‌دار مقایسه شده است. برای مقایسه بهتر در این مطالعه پارامتری با عنوان بازده حرارتی کلی (η) دیوار خورشیدی تعریف می‌شود که به صورت درصد نسبت انرژی حرارتی منتقل شده به هوای اتاق توسط دیوار به مقدار انرژی تابشی خورشید است که پس از عبور از شیشه به دیوار می‌رسد. برای مقادیر مشخصی از فاصله z_2 بازده حرارتی در جدول 4 ارائه شده است.

همچنین در نمودار "شکل 12" شار حرارتی منتقل شده به فضای داخلی اتاق توسط دیوار خورشیدی ساده و فین‌دار در یک فاصله هوایی مشخص مقایسه شده است. نتایج برای دیوار ساده و دیوار فین‌دار نشان می‌دهند که بازده خورشیدی با افزودن فین‌های مستطیلی بر روی دیوار

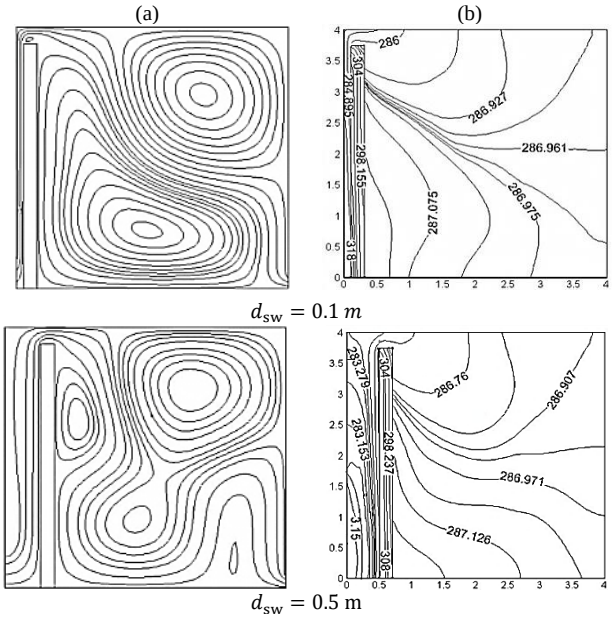


Fig. 10 Flow lines (a) and temperature lines (b) for different d_{sw} in conditions $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 10 خطوط جریان (a) و خطوط دما (b) برای دیوار ساده و d_{sw}های مختلف در شرایط $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

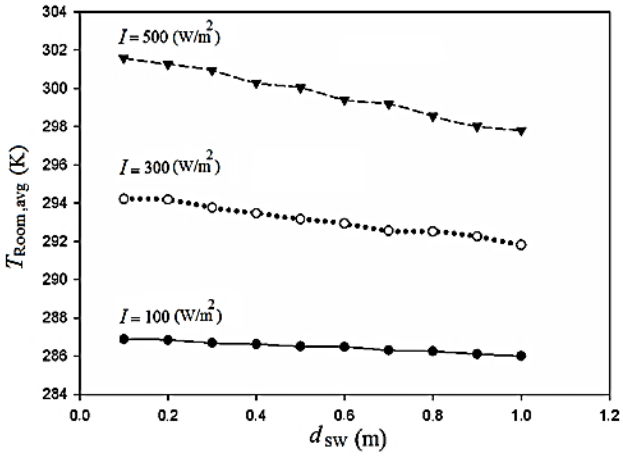


Fig. 11 Compare the average temperature of the room for different d_{sw} in conditions $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m

شکل 11 مقایسه دمای میانگین اتاق در حالت‌های مختلف d_{sw} در شرایط $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m

جدول 4 مقایسه بازده حرارتی دیوار خورشیدی ساده و فین‌دار

Table 4 Compare solar thermal efficiency between the simple wall and the wall with rectangular fins

Z_2	دیوار ساده	دیوار فین‌دار
0.02 (m)	$\eta = ٪76.83$	$\eta = ٪88.4$
0.5 (m)	$\eta = ٪76.7$	$\eta = ٪90.2$
1.25(m)	$\eta = ٪75.63$	$\eta = ٪92.4$
2 (m)	$\eta = ٪74.2$	$\eta = ٪97.8$

افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که مقدار انرژی جذب شده توسط دیوار فین‌دار بیشتر از دیوار ساده است زیرا برخی از قسمت‌های سطح جاذب دیوار فین دار نور خورشید را با زاویه برخورد کوچک‌تری دریافت می‌کنند که موجب بالا رفتن میزان جذب کلی نسبت به یک دیوار ساده می‌شود. با افزودن فین به دیوار، جرم حرارتی دیوار نیز افزایش می‌یابد که در نهایت باعث افزایش انرژی جذب شده در دیوار شده و به‌دنبال آن شار حرارتی بیشتری به فضای اتاق باز می‌گردد. همچنین اگر جرم کافی مورد استفاده قرار گیرد می‌تواند مزیتی فصلی ایجاد کند. یعنی در زمستان باعث افزایش دما شده و در تابستان نیز دما را کاهش دهد. زیرا می‌توان گرمایی که از دیوار ترومب به عنوان یک گردآورنده‌ی انرژی خورشیدی به‌دست می‌آید را جهت تامین سرمایش فضای داخلی ساختمان‌ها به کار برد، که با تامین انرژی مدارهای پمپ حرارتی جذبی یا تجهیزات دیگر در فصول گرم امکان‌پذیر است. همچنین مشخص است که با افزایش فاصله هوایی برای دیوار ساده میزان بازده خورشیدی کاهش می‌یابد. که با توجه به مقایسه دمای میانگین اتاق در فواصل هوایی مختلف این نتیجه قابل انتظار است. اما در مورد دیوار فین‌دار با افزایش فاصله هوایی η نیز افزایش یافته است ولی همانند دیوار ساده دمای میانگین اتاق کاهش می‌یابد. با توجه به کانتورهای خطوط جریان در "شکل 13"علت این کاهش میانگین دمایی را می‌توان به این صورت بیان کرد که هر چند در دیوار خورشیدی فین‌دار با افزایش Z_2 مقدار انرژی گرمایی منتقل شده به هوای داخلی اتاق افزایش می‌یابد اما حجم هوایی که به صورت گردابه چرخشی در تماس با سطح دیوار قرار می‌گیرد کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش Z_2 هسته‌ی کوچکی از جریان سیال در مجاور دیوار در گردش است و به دلیل این کاهش سطح تماس هوا با دیوار، مقدار انرژی گرمایی که به هوا منتقل می‌شود کاهش می‌یابد و این کاهش در برابر افزایش بازده حرارتی برای دیوار فین‌دار موثرتر است.

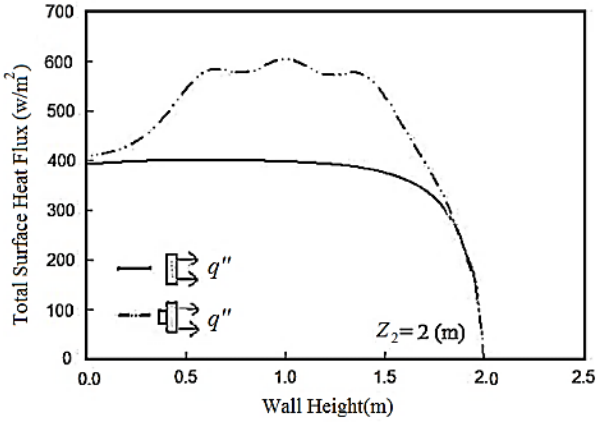


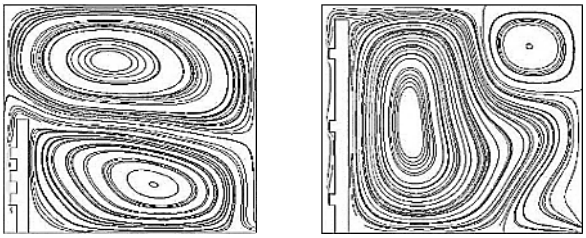
Fig. 12 Compare solar heat flux transferred to the interior of the room in conditions $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 12 مقایسه شار حرارتی انتقالی به فضای داخلی اتاق توسط دیوار خورشیدی در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

5-8- نتایج مربوط به تغییر تعداد فین‌های روی سطح جاذب دیوارخورشیدی

مشاهده شد که فین مستطیلی میانگین دمای بالاتری برای اتاق ایجاد می‌کند. بنابراین لازم است تا تاثیر افزایش تعداد فین‌ها روی دیوار خورشیدی نیز بررسی شود. فین‌ها دارای آرایش یکسان هستند و با اضافه شدن تعداد فین‌ها فاصله بین آن‌ها کاهش می‌یابد. در "شکل 14" باتوجه به خطوط همدما مشخص است که با افزایش تعداد فین‌ها دمای اتاق افزایش می‌یابد. زیرا نرخ جریان هوای خنک وارد شونده در فاصله بین پره‌ها کاهش یافته است و در این حالت هوا سریع‌تر گرم شده و تماس بیشتری با سطح جاذب دیوار خورشیدی دارد. روند افزایش دمای میانگین برای تعداد مشخصی از فین‌ها رخ می‌دهد و افزایش بیشتر تعداد فین‌ها موجب کاهش دمای میانگین اتاق خواهد شد که در نمودار "شکل 15" نشان داده شده است. بنابراین حد بهینه‌ای برای اضافه کردن فین‌ها وجود خواهد داشت. به‌عبارتی افزایش تعداد فین‌ها تا جایی می‌تواند انجام گیرد که تداخل لایه مرزی بر روی سطح جاذب دیوار ایجاد نشود که این امر به ارتفاع دیوار ترومب نیز بستگی خواهد داشت. در این هندسه افزایش تعداد فین‌ها بیش از 11 عدد برای شرایط موجود سبب کاهش دمای میانگین اتاق می‌گردد. به طور کلی فین‌ها دو اثر را پدید می آورند ابتدا این‌که در اثر دمای بالای سطوح فین، شناوری بیشتری ایجاد می‌شود و همچنین حرکت سیال را به سبب قرارگیری به صورت مانع در مسیر جریان سیال آرام می‌کنند.

در نتیجه افزایش تعداد فین‌ها بر روی دیوار بر حسب اینکه کدام یک از اثرات بر دیگری غلبه کند می‌تواند باعث بهبود یا کاهش جابجایی طبیعی شود. نیروی اصطکاک با افزایش سطوح جامد افزایش می‌یابد تا در نهایت جریان سیال و انتقال حرارت را متوقف سازد. افزایش نیروی اصطکاک ممکن است از افزایش شناوری بیشتر شود، این شرایط منجر به کاهش دبی جریان و کاهش انتقال حرارت خواهد شد. به همین دلیل دیوار با فین‌های متراکم برای گرمایش به روش جابجایی طبیعی مناسب نیستند. وقتی فین‌های



$Z_2 = 2$ m $\qquad$ $Z_2 = 0.25$ m

Fig. 13 Flow lines in various air gaps for the solar wall with fins

شکل 13 خطوط جریان در فواصل هوایی مختلف برای دیوار خورشیدی فین‌دار

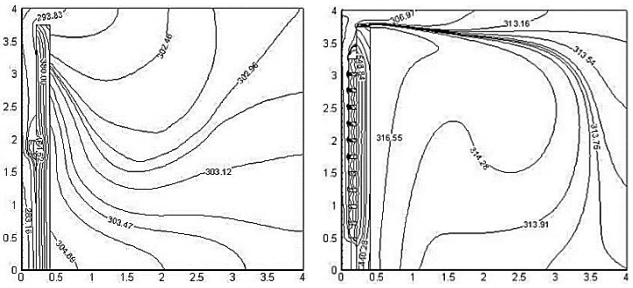


Fig. 14 Contours of temperature in condition $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m, $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 14 کانتورهای خطوط دما در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m, $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

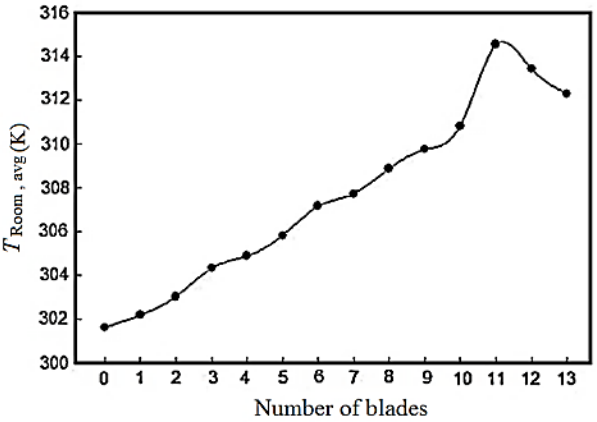


Fig. 15 Average temperature in the room with the number of fins $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

شکل 15 دمای میانگین اتاق با افزایش تعداد فین‌ها در شرایط $d_{sw} = 0.2$ m , $Z_1 = 0.5$ m , $Z_2 = 0.25$ m , $Z_3 = 0.2$m , $I = 500(\mathrm{W/m^2})$

متراکم کنار هم قرار می‌گیرند در فاصله بین آن‌ها کانال‌های باریکی پدید می‌آیند که تمایل به ساکن نمودن جریان دارند. بنابراین بر اثر سد کردن عبور جریان، شناوری اضافی از بین رفته و مشخصه‌های انتقال حرارت تقلیل می‌یابند. وقتی فاصله بین فین‌ها افزایش یابد فین‌ها مقاومت زیادی در برابر جریان از خود نشان نمی‌دهند و اثرات شناوری تعیین کننده می‌شود. در نتیجه ممکن است انتقال حرارت جابجایی طبیعی بهبود یابد. در واقع وقتی که فین‌ها برای بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی بین یک جامد و یک سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند دبی جریان سیال در مجاورت سطح جامد با توجه به تغییرات نیروهای شناوری و اصطکاک باید مورد توجه قرار گیرد. واضح است که افزایش تعداد فین‌ها تنها وقتی دارای مزیت است که افزایش در نیروی شناوری بیش از اصطکاک اضافی ایجاد شده باشد.

9- نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی چند لایه

در ادامه با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم لونبرگ-مارکوارت [24] به بررسی نتایج مربوط به افزایش تعداد فین‌ها روی سطح جاذب دیوار پرداخته شده است. شبکه عصبی انتخابی شامل لایه ورودی، میانی و خروجی است که معماری آن بر مبنای ارتباطات بین نرون‌ها در لایه‌های مختلف است. تعداد نرون‌های لایه اول برابر تعداد متغیرهای مستقل ورودی و تعداد نرون‌های لایه خروجی معادل تعداد متغیرهای بردار پیش‌بینی است. تعداد نرون‌های لایه میانی، انعطاف شبکه در میزان دقت پیش‌بینی را کنترل می‌کند. کلیه عملیات اجرایی شبکه عصبی مصنوعی در محیط نرم افزار متلب انجام شده است و در ادامه عملکرد مدل از طریق معیارهای آماری از جمله روابط رگرسیونی و ضریب همبستگی بین مقادیر حاصل شده از حلگر دینامیک سیالات محاسباتی و دمای پیش‌بینی شده، ارزیابی می‌شود.

شبکه عصبی به‌گونه‌ای آموزش داده شد که دمای میانگین اتاق را به تعداد فین‌های روی سطح جاذب دیوار خورشیدی وابسته سازد. داده‌های ارائه شده به‌عنوان ورودی همان تعداد فین‌های روی سطح جاذب دیوار است و خروجی شبکه، میانگین دمای داخلی اتاق خواهد بود. به منظور طراحی شبکه‌ای با کمترین خطا و بیشترین دقت در پیش‌بینی، طرح‌های مختلفی از شبکه عصبی با تعداد لایه‌های متفاوت بررسی شد. در این تحقیق شبکه طراحی شده با یک ورودی و یک خروجی و 10 لایه میانی است. این شبکه یک شبکه چند لایه است. در این مطالعه شبکه عصبی با 10 لایه پنهان از لحاظ حجم محاسبه و قابلیت پیاده‌سازی بر روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بالاترین بازده را نشان داد. در "شکل 16" نتایج ضریب همبستگی خطی خروجی (R) در مراحل آموزش، اعتبار سنجی و تست شبکه عصبی نشان داده شده است. در این شکل خروجی شبکه عصبی در مقابل هدف‌ها به صورت دایره‌های توخالی هستند و بهترین تناسب خطی با خطوط نقطه چین نشان داده شده است. مشاهده می‌شود خط برازش شده (خروجی برابر با هدف) به این نیم‌ساز نزدیک است که بیانگر توانایی شبکه عصبی در پیش‌بینی مقادیر دمای میانگین اتاق است. پراکنش نقاط، نشان‌دهنده همبستگی مثبت میان داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی عددی در حلگر دینامیک سیالات محاسباتی و پیش‌بینی انجام شده توسط شبکه عصبی است. در جدول 5 نتایج رگرسیون خروجی در مراحل آموزش، اعتبار سنجی و تست شبکه عصبی بیان شده است.

R ضریب همبستگی است و نشان دهنده همبستگی مناسب بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و داده‌های حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی چند لایه در مراحل مختلف است. هر چه مقدار R به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده نزدیکی بیش‌تر مقادیر برآورد شده به مقادیر شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی است.

10- نتایج حاصل از استنتاج فازی عصبی انفیس

به منظور اجرای مدل انفیس نیاز به مشخص کردن تعداد توابع عضویت است. به عبارتی دیگر این توابع ساختار نهایی مدل انفیس را تشکیل می‌دهند. برای مقادیر ورودی و خروجی انفیس از توابع مثلثی با 3 تابع عضویت استفاده شده است و تعداد قوانین تعیین شده در این مدل 3 عدد است. میزان خطای مرحله تست نیز برابر 0.001 در نظر گرفته شده است. در این مطالعه ارزیابی عملکرد شبکه عصبی و انفیس با مقایسه دو شاخص مربع میانگین خطای استاندارد[1] و مربع مجذور میانگین خطا[2] انجام گرفته است. مقدار ایده‌آل برای معیارهای mse و rmse صفر است. طبق نتایج ارائه شده در جدول 6 انفیس توانسته است با میزان خطای 0.74 پیش‌بینی بهتری داشته باشد. در حالی‌که شبکه عصبی با میزان خطای 1.1 نتوانسته به میزان دقت انفیس برسد. همچنین مقدار rmse در انفیس به صفر نزدیک‌تر است که بیانگر خطای کمتر مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی است. بنابراین بهترین برآوردها مربوط به روش انفیس است که با دقت بیشتری می‌تواند میانگین دمای اتاق را در حضور فین‌ها مدل‌سازی نماید. در "شکل 17" نیز نتیجه پیش‌بینی سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی ارائه شده است. مشخص است که پراکندگی زیادی در داده‌ها وجود ندارد و این مدل برای برآورد دمای اتاق مناسب خواهد بود. به طور مثال انفیس دمای اتاق را با ورودی برابر 5.5 (تعداد فین روی سطح جاذب دیوار خورشیدی) برابر با 307 (میانگین دمای اتاق برحسب درجه کلوین)

جدول 5 نتایج ضریب همبستگی خطی خروجی در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی

Table 5 Results of regression, the output of the training, validation and test of Neural Network

مراحل خروجی	مقادیر R
R حاصل از آموزش	1
R حاصل از اعتبارسنجی	1
R حاصل از تست	1
R نهایی	0.97

[1] Mse
[2] Rmse

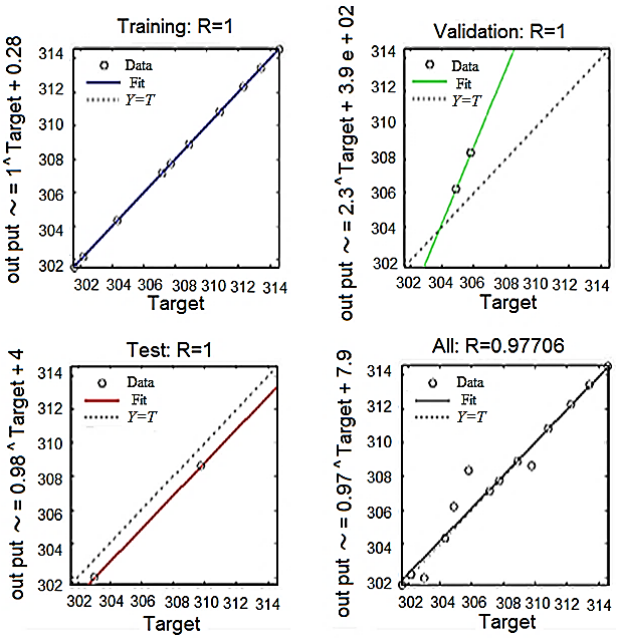


Fig. 16 Regression Neural Network

شکل 16 رگرسیون شبکه عصبی

جدول 6 مقایسه مقادیر میانگین توان دوم خطا (mse) و میانگین مربع خطاها (rmse) در شبکه عصبی و انفیس

Table 6 Compare mse and rmse values in neural network and ANFIS

مقایسه مقادیر خطا در انفیس و شبکه عصبی مصنوعی	مقادیر
میانگین توان دوم خطا (ANFIS)	0.742599
میانگین مربع خطاها (ANFIS)	0.861742
میانگین توان دوم خطا (ANN)	1.1
میانگین مربع خطاها (ANN)	1.048809

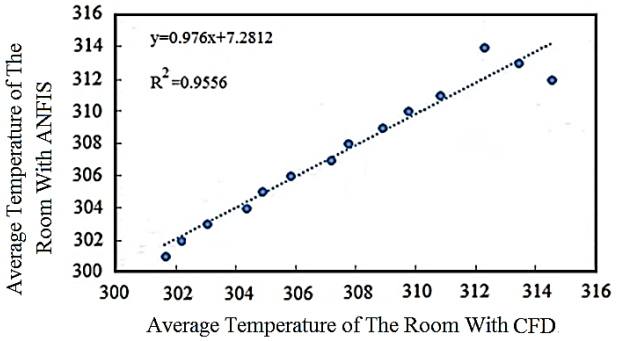


Fig. 17 Chart of efficiency predicted by ANFIS and value of simulation with CFD solver

شکل 17 نمودار بازده پیش‌بینی شده توسط انفیس و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با حلگر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پیش‌بینی کرده است.

11- نتیجه‌گیری

در این مقاله گرمایش غیرفعال ساختمان با استفاده از دیوار خورشیدی ساده و فین‌دار بررسی شده است. همچنین اثر افزایش تعداد فین‌ها روی سطح جاذب توسط شبیه‌سازی حلگر دینامیک سیالات محاسباتی، شبکه عصبی و انفیس مطالعه شد و در نهایت با استفاده از انفیس مدلی بهینه برای پیش‌بینی دمای میانگین اتاق به‌دست آمد. با تحلیل نتایج می‌توان مشاهده کرد که:

الف) هندسه بهینه برای دیوار ترومب وابسته به میزان فاصله هوایی، تعداد فین‌های روی سطح جاذب و فاصله دیوار از جدار شیشه‌ای است.

ب) با افزایش توان تابشی، انرژی دریافتی توسط سطح جاذب دیوار ترومب افزایش می‌یابد که باعث ایجاد اختلاف دمای بیشتر و در نتیجه افزایش نیروهای شناوری در فضای داخلی اتاق می‌شود. همچنین دبی خروجی جریان هوا نیز افزایش می‌یابد.

ج) افزایش فاصله هوایی باعث کاهش دمای میانگین اتاق می‌شود که به علت کاهش سطح انتقال حرارت در دیوار ترومب است. بنابراین برای داشتن دمای بالاتر نیاز به فاصله هوایی کوچک‌تر است.

د) تعبیه فین مستطیلی شکل بر روی سطح جاذب دیوار ترومب به تعداد مشخص، میانگین دمایی را نسبت به دیوار ساده افزایش می‌دهد. به طوری که در بیشترین شدت تابش برای بیشترین فاصله هوایی موجود دمای اتاق نزدیک به 2.74 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همچنین وجود دیواره فین‌دار باعث می‌شود جریان یکنواخت‌تری از هوا در داخل اتاق ایجاد شود که امری مفید در جهت تامین شرایط آسایش افراد است.

م) افزایش فاصله بین سطح جاذب دیوار و سطح شیشه‌ای نیز منجر به کاهش دمای میانگین اتاق خواهد شد که در شدت تابش‌های بیشتر محسوس‌تر است.

و) شبکه عصبی آموزش دیده و انفیس قادر هستند با خطای اندکی مقادیر دمای میانگین اتاق را پیش‌بینی نمایند و با توجه به این‌که مقادیر mse و rmse در انفیس به صفر نزدیک‌تر است بنابراین در این پژوهش، استنتاج فازی عصبی انفیس نسبت به شبکه عصبی مصنوعی از قدرت بیشتری برای پیش‌بینی نتایج برخوردار است و مدلی بهینه برای این مطالعه است.

12- فهرست علایم

h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
I	شدت تابش خورشید (W/m^2)
p	فشار (Pa)
T	دما (K)
u	سرعت جریان در راستای x (ms^{-1})
v	سرعت جریان در راستای y (ms^{-1})

علایم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
ε	ضریب پخش
α	ضریب جذب
$\acute{\varepsilon}$	تانسور اتلاف

زیرنویس‌ها

Abs	سطح جاذب دیوار خورشیدی
Glass	شیشه
In	ورودی

13- مراجع

[1] F. Trombe, J. F. Robert, M. Cabanot, B. Sesolis, Concrete walls to collect and hold heat, *Solar Energy*, Vol. 2, No. 13, pp. 13-16, 1977.
[2] Iran Renewable Energy Organization (SUNA), http://www.satba.gov.ir/en/home
[3] Hu. Zhongting, He. Wei, Ji. Jie, Shengyao Zhang, A review on the

application of Trombe wall system in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 976-987, 2017

[4] R. Ben, Z. G. Du .Yedder, E. Bilgen, Numerical study of laminar natural convection in composite trombe wall systems, *Solar & Wind Technology*, Vol. 7, No. 6, pp. 675-683, 1991.

[5] G. Gan, Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 410–420, 2006.

[6] A. Mezrhab, M. Rabhi, Modeling of the thermal transfers in an enclosure of the trombe wall type, *Thermodynamic Analysis in Renewable Energy*, Vol. 10, No. 62, pp. 9-14, 2008

[7] S. Kim, J. Seo, 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, Korea pp. 1-6, 2012.

[8] A. P. Haghighi, M. Maerefat, Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days usingsolar chimney, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 10, pp. 72–79, journal ISSN: 2210-6707, February 2014.

[9] M. S. Ahmed, M. Attalla, Experimental studyof passive solar cooling in hot arid regions using trombe walls with humidification, *Advances in Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer, Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE '12)*, pp. 29-34, 2012.

[10] A. Y. K. Tan, N. H. Wong, Parameterization studies of solar chimneys in the tropics, *Energies*, Vol. 6, pp. 145-163, 2013.

[11] K. Darkwa, P. O. Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 8–9, pp. 853–858, 2006

[12] Gu. Quesada, D. Rousse, Y. Dutil, Messaoud badache, stephane halle, a comprehensive review of solar facades opaque solar facades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16 , pp. 2820– 2832, 2012.

[13] J. Onishi, H. Soeda, M. Mizuno, Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system, *Renewable Energy*, Vol. 22, No. 1–3, pp. 61–66, 2001.

[14] Y. Li, X. Duanmu, Y. Sun, J. Li, H. Jia, Study on the air movement character in solar wall system, *Building Simulation 2007, College of Architecture and Civil Engineering*, Beijing University of Technology, Beijing, 100022, China, pp. 927–931, 2007

[15] A. Fares, The effect of changing trombe wall component on the thermal load, *Energy Procedia*, Vol. 19, pp. 47–54, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.181, 2012.

[16] P. Torcellini, S. Pless, Trombe walls in low-energy buildings: practical experiences, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/CP-550-36277, pp. 1-8, July 2004

[17] M. Rabani, V. Kalantar, M. Rabani, Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design, *Energy*, Vol. 134, pp. 943-950, 2017

[18] M. J. Galal, S. F. Sajda, Simulation of trombe wall in Baghdad atmosphere, *Solar Energy, 5th Conference on Energy Conservation in Building, At Tehran, Iran*, pp. 66-71, 2006.

[19] S. A. Fanaee, M. Rezaei, The investigation of appendages vortex effect on the main working parameter of the tube - finned heat exchanger, *tabriz Mechanical Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 333–338, 2017. (in Persian فارسی)

[20] L. G. Berglund, R. R. Gonzalez, Application of acceptable temperature drifts to built environments as a mode of energy conservation, , *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA, ASHRAE Transactions*, Vol. 84,No.1, pp. 110-121, 1978.

[21] M. Culloch Warren, W. Pitts, A logical calculus of ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 4, No. 5, pp. 115–133, 1943.

[22] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system, IEEE transactions on systems, man and cybernetics, *Department of Electrical Engineering and Computer Science, California University., Berkeley, CA, USA*, Vol. 23, No. 3, pp. 665– 685, Issue: 3, 1993

[23] J. M. Mendel, Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions, Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ 07458, pp. 1-576, ISBN 0-13-040969-3, www.phptr.com, 2001

[24] D. W. Marquardt, An algorithm for the least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431–441, Jun, 1963.