

ظرفیت سنجی به کارگیری پوسته‌های دوجداره در طراحی معماری اقلیم گرم و خشک ایران به منظور کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی شهر یزد)*

محمد هادیان پور^۱، محمد جواد مهدوی نژاد^{۲*}، محمدرضا بمانیان^۳، محمد حق شناس^۴

^۱پژوهشگر دوره دکتری معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲دانشیار دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۳استاد دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۴پژوهشگر دوره دکتری معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۴/۱۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۳/۷/۵)

چکیده

نماهای دو پوسته راهکاری مناسب برای به حداقل رساندن دفع گرما در زمستان و جذب گرما در تابستان هستند؛ اما مسئله برافروختگی در حفره بین دو پوسته در ماه‌های گرم سال، از چالش‌های استفاده از این سیستم در اقلیم گرم و خشک ایران است. در این پژوهش برای حل مشکل فوق، تأثیر تغییر اندازه درجه‌های تهویه و تغییر عمق حفره بین دو پوسته را بر کاهش برافروختگی مدلی واقع در شهر یزد، با استفاده از روش شبیه‌سازی CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) در نرم‌افزار فلوئنت، بررسی کرده‌ایم. در این بررسی مشخص شد استفاده مناسب از راهکارهای ارائه شده، می‌تواند دمای داخل حفره را در ماه‌های گرم سال به صورت میانگین تا ۱۸٫۸ درجه سلسیوس کاهش دهد. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار فلوئنت، یک اتاقک دارای نمای دوپوسته بهبودیافته (مجهز شده به بهترین نتایج محاسبات قبلی) با اتاقکی دارای نمای دو پوسته عادی و اتاقکی فاقد نمای دوپوسته در نرم‌افزار Design builder شبیه‌سازی شدند. نتایج حاکی از آن بود که مقدار کل مصرف انرژی اتاقک دارای پوسته دوجداره بهبودیافته، $14,4 \text{ kwh/m}^2$ از مدل بدون پوسته دوجداره کمتر است. این موضوع پتانسیل بالای استفاده از این نوع پوسته‌ها را در کاهش مصرف انرژی ساختمانی واقع در اقلیم گرم و خشک ایران نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

نمای دوپوسته، اقلیم گرم و خشک، برافروختگی، شبیه‌سازی به روش CFD، کاهش مصرف انرژی.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دوره دکتری (در حال انجام) نویسنده اول در رشته معماری با راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره‌ی نویسنده سوم در دانشکده هنر و معماری دانشگاه تربیت مدرس است.

** نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۲۱۴۲۲۵۰، نمابر: ۰۲۱-۸۸۰۰۸۰۹۰، E-mail: mahdavejad@modares.ac.ir

مقدمه

ومحل را برای قرارگیری پرده کرکه‌ای در بین دو پوسته مشخص کرده‌اند (Gratia & De Herde, 2007b).

اگرچه اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه نماهای دو پوسته در مناطق سرد یا معتدل انجام شده، اما پژوهش‌هایی نیز در مورد تأثیر استفاده از این نماها در دیگر مناطق دیده می‌شود. به عنوان مثال، حمزه در سال ۲۰۰۸، تأثیر کاربرد نمای دو پوسته تهویه‌ای دارای شیشه‌های ساده، رنگی و انعکاسی را در جبهه‌های مختلف ساختمانی اداری هفت طبقه واقع در منطقه گرم و خشک (قاهره) توسط نرم‌افزار IESVE بررسی کرده است (Hamza, 2008). هاشمی و دیگران، تأثیر کاربرد نمای دو پوسته را در ساختمان دیوان محاسبات کشور (واقع در شهر تهران)، از طریق اندازه‌گیری تجربی و مدل‌سازی در نرم‌افزار انرژی پلاس بررسی کرده‌اند. آنها نتیجه گرفته‌اند که دمای فضای بین دو پوسته در تابستان بین ۱ تا ۱۰ درجه از دمای فضای خارج بالاتر است و برای حل این مشکل، انجام مطالعات بیشتر بر روی عمق حفره و ابعاد دریچه‌های تهویه را پیشنهاد کرده‌اند (Hashemi et al, 2010).

این پژوهش، ضمن مقایسه عملکرد حرارتی ساختمان دارای نمای دو پوسته با ساختمان‌های فاقد آن، به تعیین استراتژی‌های کاربرد نمای دو پوسته در ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم و خشک (یزد) می‌پردازد. روش استفاده‌شده در این پژوهش، مدل‌سازی و محاسبات نرم‌افزاری است. برای این منظور، نرم‌افزارهای فلونت^۱ و Design-Builder برای انجام شبیه‌سازی استفاده شده‌اند. فلونت نرم‌افزاری چندمنظوره و تجاری است که قابلیت کاربرد آن به منظور انجام محاسبات CFD^۲ در مقالات علمی متعددی تأیید شده است (Kanga & Strand, 2013; Tseng et al, 2011; Pei et al, 2013). از طرف دیگر، Design-Builder نرم‌افزاری است که می‌تواند به عنوان رابط کاربری نرم‌افزار انرژی پلاس، برای ساخت مدل سه‌بعدی، استقرار شرایط مرزی، و محاسبه کلی بار حرارتی و برودتی ساختمان استفاده شود (Radhia et al, 2013). این نرم‌افزار نیز در برخی مقالات علمی برای محاسبه CFD استفاده شده است (Baharvand, 2013; Chung et al, 2014). در این پژوهش از نرم‌افزار فلونت برای سنجش میزان تأثیر هر یک از استراتژی‌ها استفاده شده است. در انتها برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در نرم‌افزار فلونت، نمونه ساختمان دارای پوسته دوجداره مجهز شده با بهترین استراتژی‌های به دست آمده در مرحله قبلی، با ساختمانی دارای پوسته دوجداره معمولی و ساختمانی فاقد پوسته دوجداره، از طریق محاسبه میزان بار حرارتی سرمایش و گرمایش مقایسه شده‌اند.

نمای دو پوسته، عنصری معمارانه است که کاربرد آن در دهه ۸۰ میلادی در اروپا و پس از آن در سایر کشورها رواج یافت. در حال حاضر آنچه اغلب معماران را برای استفاده از این عنصر ساختمانی ترغیب می‌کند، جنبه‌های زیباشناختی و برقراری ارتباط بصری قوی بین فضای داخلی و خارجی ساختمان است. با این حال، ویژگی‌های مثبت نماهای دو پوسته به مباحث زیبایی‌شناسانه محدود نمی‌شود. تأمین آسایش حرارتی و صرفه‌جویی مصرف انرژی از دیگر خصوصیات نماهای دو پوسته است. این نماها با بهره‌گیری از اثر گلخانه، گرما را بین دو پوسته خود به دام می‌اندازد و از این طریق به گرمایش فضا کمک می‌کنند. از طرف دیگر، نماهای دو پوسته حتی در شرایطی که در محیط خارج ساختمان سروصدای زیادی وجود دارد و یا وزش باد شدید است نیز امکان تهویه طبیعی را برای فضای داخلی ساختمان فراهم می‌کنند. در فصل زمستان نیز هوای تازه مورد نیاز ساختمان می‌تواند در فضای بین دو پوسته پیش‌گرم شده و سپس به داخل ساختمان انتقال یابد. کاربرد دیگر این پوسته‌ها در نوسازی ساختمان‌های موجود است، در شرایطی که امکان یا تمایلی برای بازسازی یا تعویض کامل نمای ساختمان‌های موجود نداشته باشیم. کاربرد نماهای تمام شیشه‌ای دو پوسته در ساختمان، مستلزم مدل‌سازی دقیق عملکرد آنها به خصوص در شرایط گرم سال است. از ابتدایی‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در مورد نماهای دو پوسته تا کنون، تهویه فضای بین دو پوسته برای پیشگیری از برافروختگی^۱ در فصل تابستان ضروری دانسته شده است (Gratia & De Herde, 2004a; Schittich, 2001; Wigginton & Harris, 2002; Oesterle et al, 2001). این تهویه می‌تواند به صورت طبیعی، با استفاده از فن یا به صورت تلفیقی انجام گیرد؛ اگرچه تنها راه پیشگیری از برافروختگی، تهویه فضای بین دو پوسته نیست. گراشیا و هرده، برای کاهش خطر برافروختگی نمای دو پوسته در فصل تابستان، توجه به تعداد و ابعاد دریچه‌های تهویه، استفاده از شیشه‌های رنگی یا انعکاسی، و استفاده از پرده‌های کرکه‌ای بین دو پوسته را توصیه کرده‌اند (Gratia & De Herde, 2004b). آنها در تحقیقی دیگر، مواردی از قبیل سطح تابش خورشیدی، جهت‌گیری، استفاده از سایه‌اندازها، نسبت دیوار به پنجره در جداره داخلی، سرعت وزش باد، رنگ سایه‌انداز و دیوار داخلی، عمق حفره بین دو پوسته و نوع شیشه را از طریق مدل‌سازی نرم‌افزاری بررسی کرده‌اند و راهکارهایی برای کنترل اثر گلخانه‌ای به وجود آمده در بین دو پوسته پیشنهاد داده‌اند (Gratia & De Herde, 2007a). همین افراد در پژوهش دیگری، با استفاده از شبیه‌سازی ساختمانی پنج طبقه در نرم‌افزار TAS، بهترین زاویه

۱. مدل‌سازی در نرم‌افزار فلونت

می‌شوند. نرم‌افزار فلونت یکی از برنامه‌های رایانه‌ای است که به علت قدرت، دقت و سادگی استفاده از آن، برای شبیه‌سازی

نرم‌افزارهای دینامیک سیال محاسباتی برای پیش‌بینی جریان و حرکت هوا و پاسخ دمای برای مدل آزمایشگاهی استفاده

با نصب اطلاعات اقلیمی شهریزد بر روی این نرم افزار، داده‌های اولیه‌ای طبق جدول ۱ به دست آمد. سپس این داده‌ها برای تعیین دمای شرایط مرزی مدل ساخته شده در فلوننت به کار گرفته شدند. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد عملکرد کلی پوسته‌های دوجداره به سبب تعدد پدیده‌های تأثیرگذار بر آنها، بسیار پیچیده است؛ جریان هوا، انتقال حرارت، همرفت، تابش با طول موج کوتاه و بلند و ... همگی عملکرد پوسته‌ها را متأثر می‌کنند. اساساً دو نوع جریان هوا در نماهای دوپوسته تهویه‌ای اتفاق می‌افتد: یکی جریان آشفته که دمای زیاد و سرعت بسیار پایینی دارد و دیگری جریانی پیوسته که دمای پایین و سرعت بیشتری دارد، البته صرف ایجاد حرکت هوا در نماهای دوپوسته توسط دریچه‌ها کافی نیست و کنترل مسیر حرکت هوا در نماهای دوپوسته نیز اهمیت زیادی دارد. مسیر حرکت هوا در نماهای دوپوسته در اثر تهویه ایجاد شده توسط دریچه‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که از مهم‌ترین آنها فاصله عمودی بین دریچه ورودی و خروجی هوا است. هرچه دریچه ورودی هوا به کف و دریچه خروجی هوا به سقف نزدیک‌تر باشد، سطح بیشتری از پوسته درونی تحت وزش و جریان خنک‌کننده هوا قرار می‌گیرد و جریان آشفته بیشتر به سمت پوسته خارجی کشیده می‌شود که این امر به خنک نگه داشتن پوسته درونی که با فضای اتاق در تماس مستقیم است کمک قابل توجهی می‌کند.

۱-۱. تأثیر وجود دریچه‌های تهویه

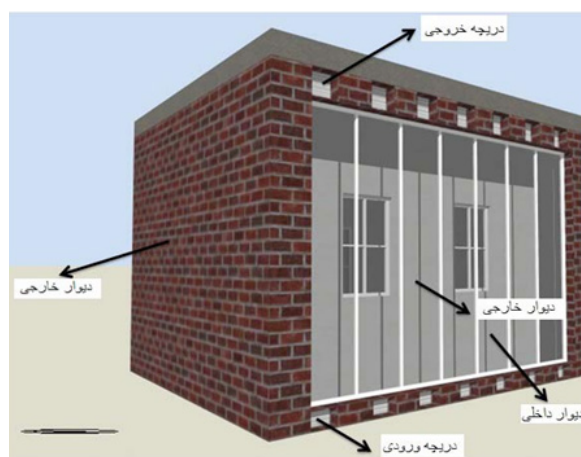
در این بخش نمای دوپوسته بدون دریچه تهویه (ST)، با حالت دارای دریچه تهویه (STV) مقایسه شده است. در مدل فاقد تهویه، رفتار جریان هوا تحت تأثیر مستقیم برآیند بار گرمایی است که به دلیل اثر گلخانه در حفره نما تولید می‌شود. بررسی سطوح هم‌دما در شکل ۲، انباشتگی گرما را در سطوح فوقانی نشان می‌دهد؛ به این معنا که در فضاهای بدون تهویه، با افزایش ارتفاع، برافروختگی به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در نمای بدون تهویه، اثر گلخانه‌ای باعث افزایش دما و توسعه جریان آشفته می‌شود. برآیند شار گرمایی حاصل از شیشه درونی و همچنین گرمای منعکس شده توسط سطوح داخلی، اساس انتقال همرفتی در اتاق را تعیین می‌کند و به صورت اثر دودکشی، جریان هوا را از دهانه پایینی ورودی به دهانه خروجی می‌کشاند. در مورد رفتار جریان هوا در درون فضای نمای تهویه‌ای، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است به وضوح جریان آرام و

مهندسی جریان سیال استفاده می‌شود. در این پژوهش، از نسخه ۶،۳،۲۶ این نرم افزار برای شبیه‌سازی مدلی با خصوصیات زیر استفاده شده است:

اتاقی به طول، عرض و ارتفاع ۲۴۰۰ میلی‌متر و طول ۳ متر دارای نمای دوپوسته به عرض حفره ۸۰۰ و ارتفاع حفره ۲۴۰۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ در نرم افزار مدل سازی شده است. شبکه تولید شده برای محاسبه توسط نرم افزار، در فضای اتاق با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر و در نزدیکی دیواره شیشه‌ای که محل اصلی نیروهای انتقال همرفتی است، با ابعاد ۱×۱ میلی‌متری ایجاد شده است. دمای محیط برابر متوسط بیشینه دمای هوای شهریزد در ماه‌های معتدل (مهر، آبان، آذر، فروردین، اردیبهشت و خرداد) در ساعت ۱۵ بعد از ظهر، برابر ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. دیواره‌ها از جنس پانل عایق دار با ضریب انتقال حرارت $0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$ و سقف از جنس دال بتنی با ضریب انتقال حرارت $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ فرض شده است. اتاق دارای دو پنجره با قاب PVC و شیشه دو جداره است که ضریب انتقال حرارت $3 \text{ W/m}^2\text{k}$ دارند. شیشه پنجره‌ها و پوسته نما از نوع شیشه ساده چهار میلی‌متری با ضریب عبور ۰،۸۲ است.

برای ساده‌تر شدن روند محاسبات نرم افزار، مدل به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد. معادله انرژی، فعال در نظر گرفته شده است. سیال جریان با توجه به سرعت ورودی (۳ متر بر ثانیه)، غیرقابل تراکم است. در انتخاب مدل لزجت^۴ با توجه به شرایط جریان، از مدل آشفتگی k-epsilon استفاده شد. معادلات پیوستگی^۵، ممنتوم^۶، k و epsilon حاکم بر جریان بودند و محدوده خطا برای حل این معادلات $1e^{-6}$ در نظر گرفته شد. معادلات پس از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ تکرار همگرا شدند. از معیار Wall Yplus به منظور تعیین میزان اعتبار داده‌ها استفاده شد؛ به این صورت که حساسیت شبکه در نزدیکی دیواره‌ها به نحوی تنظیم شد که $30 < y+ < 5$ باشد.

به منظور انجام سریع‌تر محاسبات توسط نرم افزار فلوننت، ابتدا مدل مورد نظر در نرم افزار Design-builder شبیه‌سازی شد و



تصویر ۱- اتاق مورد مطالعه در مدل سازی.

جدول ۱- وضعیت دمای شرایط مرزی و کل گرمای کسب شده داخلی.

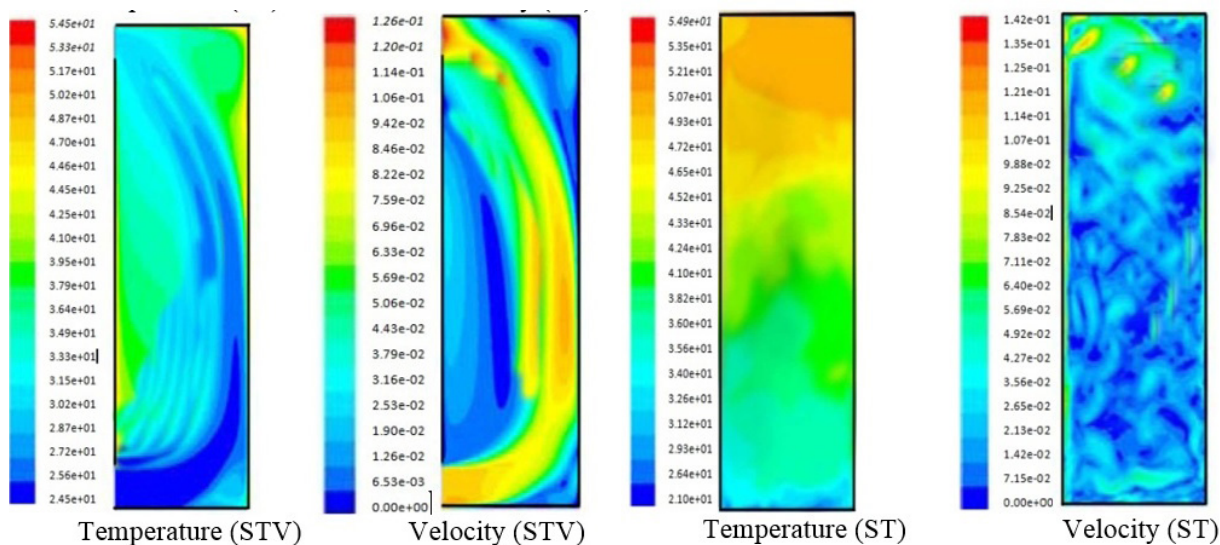
	Sealed Cavity (ST)	Ventilated Cavity (STV)
Surface Temperature Walls (°C)	34,80	30,50
Surface Temperature Ceiling (°C)	35,20	31,00
Surface Temperature Floor (°C)	30,10	24,50
Total Internal Heat Gains (W/m ²)	253,86	205,79

هوای داخل حفره در آن کد ارتفاعی در نظر گرفته ایم. مقادیر میانگین دما در ارتفاع های مختلف در شکل ۴ و مقادیر میانگین سرعت جریان هوا در ارتفاع های مختلف در شکل ۵ مشخص شده اند. شکل ۴ نشان می دهد در نمای بدون تهویه، دما در نقاط فوقانی حفره به ۴۷ درجه سلسیوس می رسد و تفاوت دمای بالا و پایین حفره نما، ۲۱ درجه سلسیوس است. در نمای فاقد تهویه، با افزایش ارتفاع، دما به صورت مداوم افزایش می یابد؛ در حالی که در نمای تهویه ای افزایش دما متغیر است. برای درک این تفاوت، بررسی شکل ۵ الزامی است.

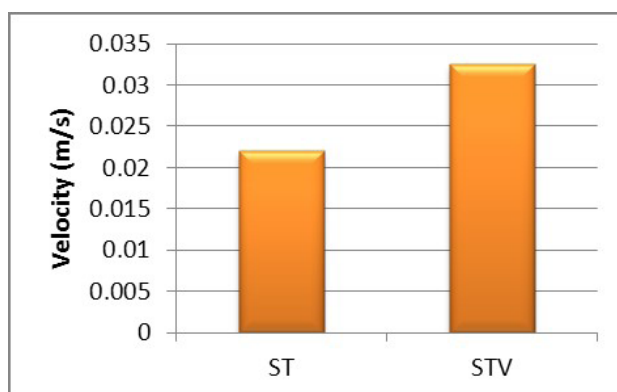
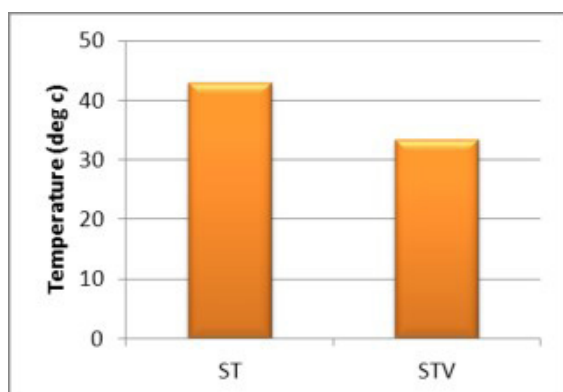
شکل ۵ نشان می دهد که در نمای تهویه ای (به علت جریان هوای ثابت از دهانه ورودی به خروجی) حرکت مداوم هوا وجود دارد. در ارتفاع دهانه ورودی و خروجی هوا، به مقادیر بالاتری برای بردار سرعت رسیده ایم و در مرکز پوسته به دلیل کاهش اندازه و جهت گردابه موجود در پشت پوسته خارجی، بردار سرعت کاهش می یابد. در نمای تهویه ای اگرچه حداکثر سرعت جریان هوا (0.09 m/s) نسبت به حالت فاقد تهویه تغییر زیادی نکرده، اما نوسانات کمتری را در جریان هوا شاهد هستیم. به عبارت دیگر، وجود جریان پیوسته از دریچه ورودی به دریچه

پیوسته ای از دهانه ورودی به دهانه خروجی هوا وجود دارد. مزیت جریان پیوسته، نزدیکی آن به پوسته درونی است که منجر به کاهش دمای پوسته متصل به فضای داخلی می شود. در مقابل، جریان آشفته (گردابه ای) در مجاورت پوسته خارجی تشکیل می شود. کمترین حد سرعت (0.01 متر بر ثانیه) و بیشترین حد دما (37.8 درجه سلسیوس) در جریان گردابه ای رخ می دهد و در مقابل، بیشترین حد سرعت (0.09 متر بر ثانیه) و کمترین حد دما (28.7 درجه سلسیوس) در جریان پیوسته اتفاق می افتد.

میانگین دما و سرعت جریان هوا در کل فضای بین دو پوسته در شکل ۳ مشخص شده است. وقتی حفره بین دو پوسته با تهویه همراه باشد کاهش 9.65 درجه سلسیوس در میانگین دما و افزایش 0.01 متر بر ثانیه سرعت جریان هوا را مشاهده می کنیم. به منظور مطالعه دقیق تر مدل ها، سه محور عمودی را در حفره بین دو پوسته تعریف کرده ایم که یکی در وسط حفره، دیگری به فاصله دو سانتی متری از کنار جداره داخلی و سومی به فاصله دو سانتی متری در کنار جداره خارجی قرار دارند. هر محور را به بخش های 0.5 سانتی متری تقسیم کرده ایم و میانگین دما و سرعت جریان هوا در هر سه گره را به عنوان متوسط دما و سرعت جریان



تصویر ۲- سطوح هم سرعت و هم دما در نمای دو پوسته با و بدون تهویه.



تصویر ۳- مقایسه میانگین دما (چپ) و میانگین سرعت جریان هوا (راست) در نمای دو پوسته تهویه ای (STV) و بدون تهویه (ST).

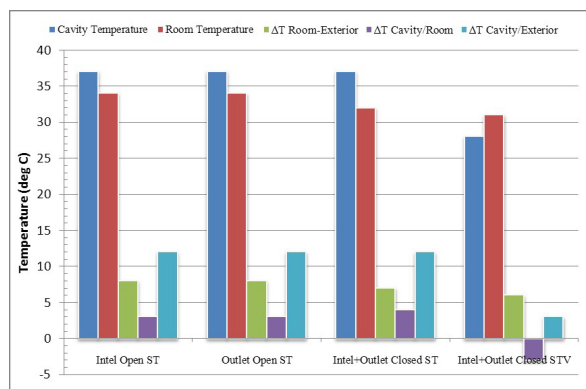
پوسته دوجداره را نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد چگونه با تغییر اندازه درپچه‌های تهویه ورودی و خروجی از ۱۲٫۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر مربع، دمای داخل حفره کاهش یافته است. این شکل همچنین نشان می‌دهد تأثیر اندازه درپچه‌ها بر دمای داخل حفره برای درپچه‌های بزرگتر از ۱۰۰ میلی‌متر مربع ناچیز خواهد بود و بهتر است در این بازه، بیشتر توجه معطوف بر افزایش سرعت هوا بر روی پوسته داخلی پوسته دوجداره باشد.

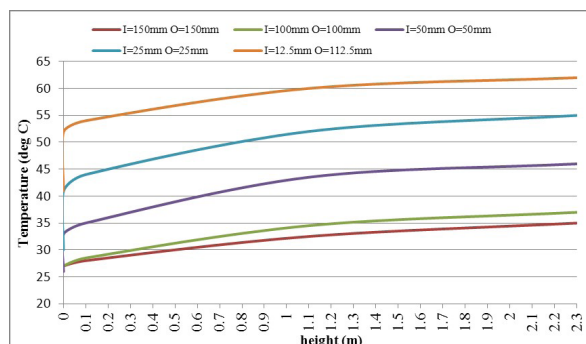
شکل ۸ تأثیرپذیری جریان هوا از تغییر اندازه ورودی و خروجی هوا را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه درپچه ورودی و خروجی از ۱۲٫۵ تا ۲۰۰ میلی‌متر مربع، جریان آشفته (گردابه‌ای) به تدریج کم‌تر می‌شود و جریان پیوسته شروع به شکل گرفتن می‌کند. هنگامی که اندازه درپچه‌ها 150mm^2 است میانگین سرعت حرکت هوا مطلوب و نزدیک به ابعاد 200mm^2 است، اما جریان پیوسته‌ای بر روی پوسته داخلی نمای دوجداره مشاهده نمی‌شود و آشفته‌گی جریان بیشتر است. از طرفی عملاً افزایش اندازه درپچه‌ها به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر مربع، بر کارایی پوسته تأثیر منفی می‌گذارد.

۲-۲-۱. تغییر اندازه درپچه خروجی و ثابت ماندن اندازه درپچه ورودی:

شکل ۹ نشان می‌دهد که در شرایط ثابت ماندن اندازه دهانه ورودی (برابر ۲۰۰ میلی‌متر مربع) و افزایش اندازه دهانه خروجی، ماکزیمم سرعت هوا نیز به تدریج افزایش می‌یابد و جریان پیوسته



تصویر ۶- مقایسه بیشینه دمای حفره، اتاق و هوای بیرون در حالت‌های با و بدون تهویه.



تصویر ۷- دمای ارتفاع‌های مختلف فضای بین دو پوسته تحت تأثیر اندازه‌های مختلف درپچه‌های تهویه.

خروجی، از آشفته‌گی هوا در حفره نما جلوگیری می‌کند.

مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که حتی در نمای تهویه‌ای، دقیقاً در نواحی که جریان هوا حالت آشفته (گردابه‌ای) دارد، با افزایش دما روبرو هستیم. این موضوع اهمیت جریان پیوسته در کاهش برافروختگی را آشکار می‌کند.

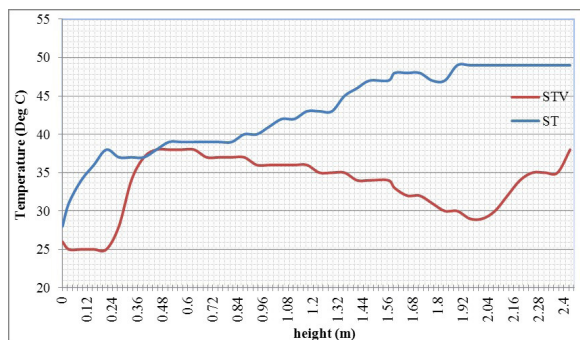
نتیجه مدل‌سازی‌های این بخش در شکل ۶ مشخص شده است. شکل ۶ نشان‌دهنده تأثیر زیاد باز بودن هر دو درپچه ورودی و خروجی هوا و تهویه نمای دوپوسته بر کاهش برافروختگی است؛ به صورتی که حتی در صورت باز بودن فقط یکی از درپچه‌ها نتیجه بهتری نسبت به هنگامی که هر دو درپچه بسته باشد می‌گیریم؛ هر چند که این کاهش دما چندان محسوس نیست.

۲-۱. بررسی اندازه درپچه‌های تهویه

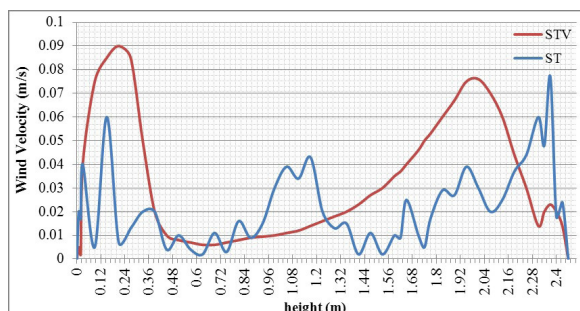
اندازه درپچه‌ها عامل دیگری است که مستقیماً بر عملکرد کلی جریان هوا در درون فضای نما تأثیر می‌گذارد. تغییر در اندازه درپچه‌ها ممکن است به سه صورت انجام پذیرد:

۱-۲-۱. تغییرات مساوی اندازه درپچه‌های ورودی و خروجی:

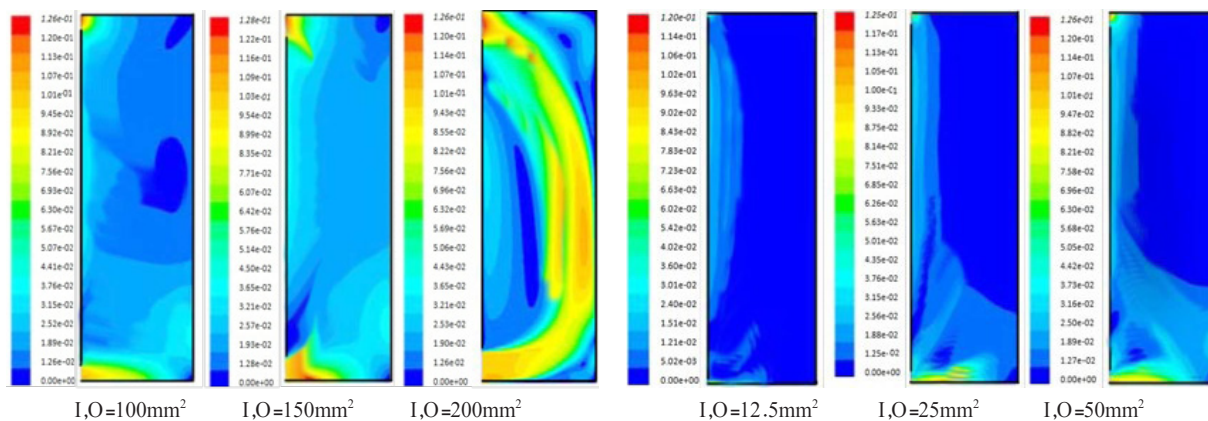
کاهش متوازن اندازه درپچه‌های ورودی و خروجی، منجر به کاهش تدریجی سرعت جریان هوا و افزایش تدریجی میانگین دما در حفره بین دو پوسته می‌شود. شکل ۷ دمای محاسبه شده در حفره بین دو پوسته دارای درپچه‌های تهویه ورودی و خروجی به ابعاد ۱۲٫۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میلی‌متر مربع در پایین و بالای



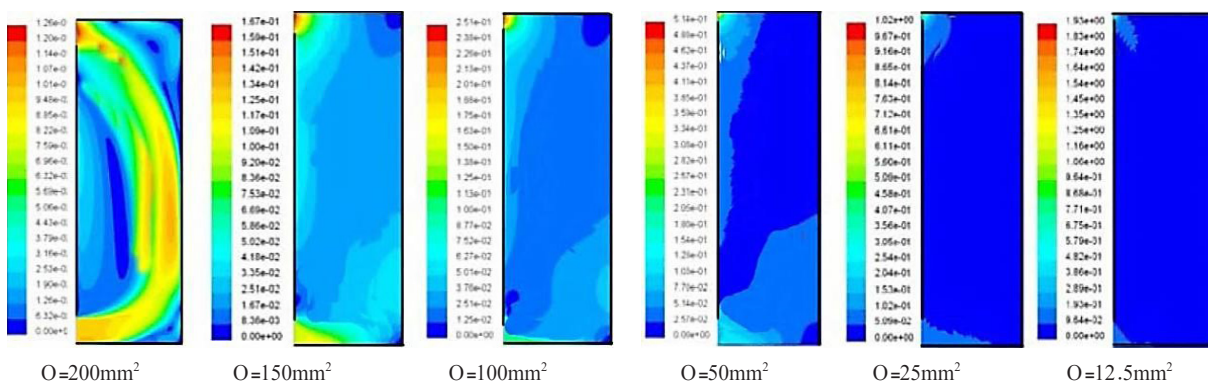
تصویر ۴- مقایسه مقدار دمای محور مرکزی حفره نمای دوپوسته، در دو حالت با و بدون تهویه.



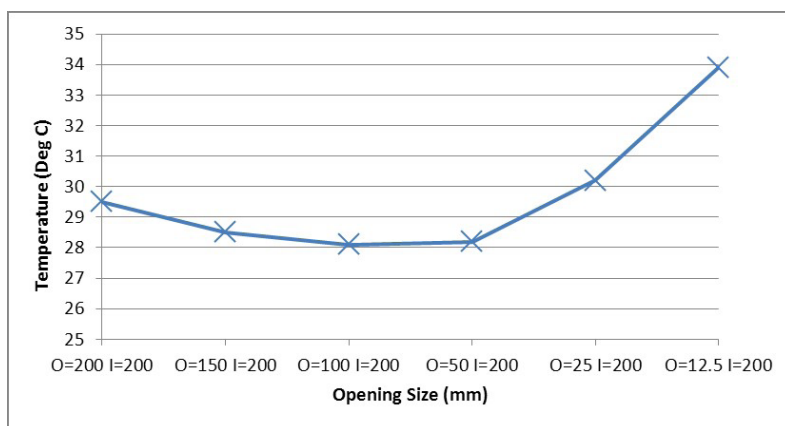
تصویر ۵- مقایسه سرعت جریان هوا در داخل حفره بین دو پوسته در دو حالت با و بدون تهویه.



تصویر ۸- سطوح هم‌سرعت در فضای بین دوپوسته برای اندازه‌های مختلف دریچه‌های موجود بر روی پوسته خارجی.



تصویر ۹- سطوح هم‌سرعت در فضای بین دوپوسته برای اندازه‌های مختلف دریچه خروجی، با اندازه ثابت ۲۰۰mm² برای دریچه ورودی.



تصویر ۱۰- میانگین دمای فضای بین دوپوسته برای اندازه‌های مختلف دریچه ورودی، به شرط اندازه ثابت ۲۰۰mm² برای دریچه خروجی.

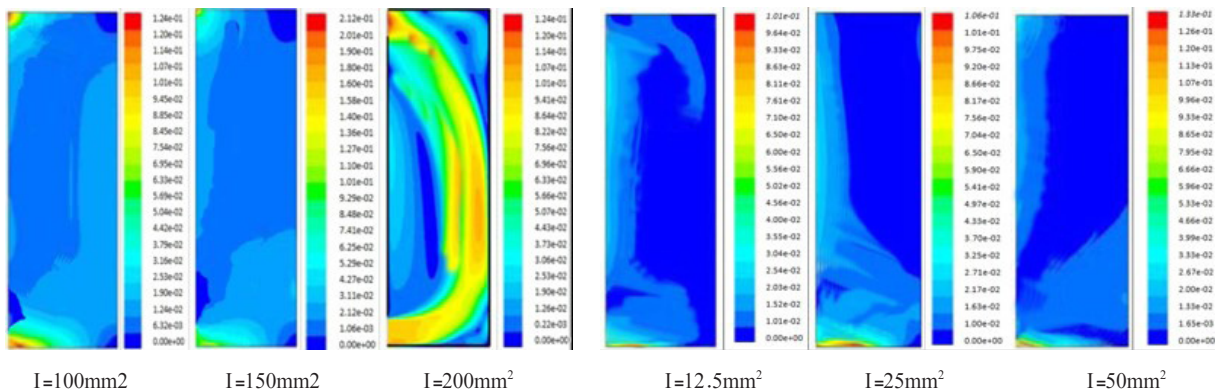
هوای رفتار بیپوسته آرامی را بین سه جریان گردابه‌ای شروع می‌کند. با رسیدن اندازه دهانه ورودی هوا به ۵۰ میلی‌متر مربع، جریان پایدار می‌شود و با وجود کم شدن سرعت هوا بر روی جداره داخلی، میانگین سرعت هوا در کل پوسته افزایش می‌یابد. اما با کاهش اندازه دهانه ورودی هوا بیشتر از ۵۰ میلی‌متر مربع، بردار کلی سرعت به طور محسوسی کم می‌شود و میانگین دمای حفره افزایش می‌یابد. مقایسه نمودارهای ۷، ۱۰ و ۱۲ نشان می‌دهد با ثابت نگه داشتن دریچه خروجی و کاهش اندازه دریچه ورودی، میانگین کلی دما نسبت به حالتی که اندازه دریچه‌ها به طور یکسان کاهش یابند، پایین‌تر است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد زمانی که اندازه دریچه ورودی برابر ۵۰ و اندازه دریچه خروجی برابر ۲۰۰ میلی‌متر مربع

نزدیک به پوسته داخلی شروع به شکل گرفتن می‌کند. با این حال، توجه به شکل ۱۰ نشان می‌دهد میانگین دمای هوای بین دو پوسته وقتی به حداقل خود می‌رسد که اندازه دهانه خروجی ۵۰ میلی‌متر مربع باشد. در این حالت، اگرچه جریان هوا بر روی پوسته داخلی متمرکز نشده، اما به دلیل متأثر کردن کل فضای حفره، عملکرد کلی پوسته را بهبود بخشیده است.

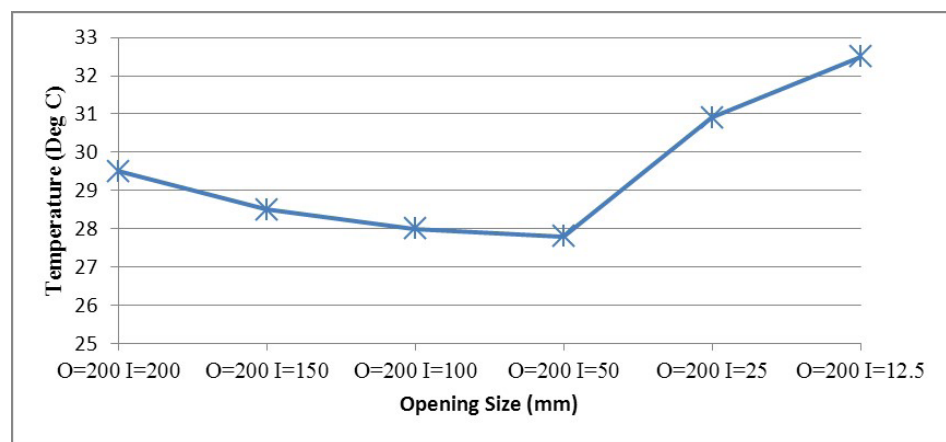
۳-۲-۱. تغییر اندازه دریچه ورودی و ثابت ماندن اندازه دریچه خروجی:

شکل ۱۱ نشان می‌دهد با کاهش اندازه دهانه ورودی هوا از ۲۰۰ به ۱۰۰ میلی‌متر مربع، ماکزیمم سرعت به تدریج کاهش می‌یابد و جریان

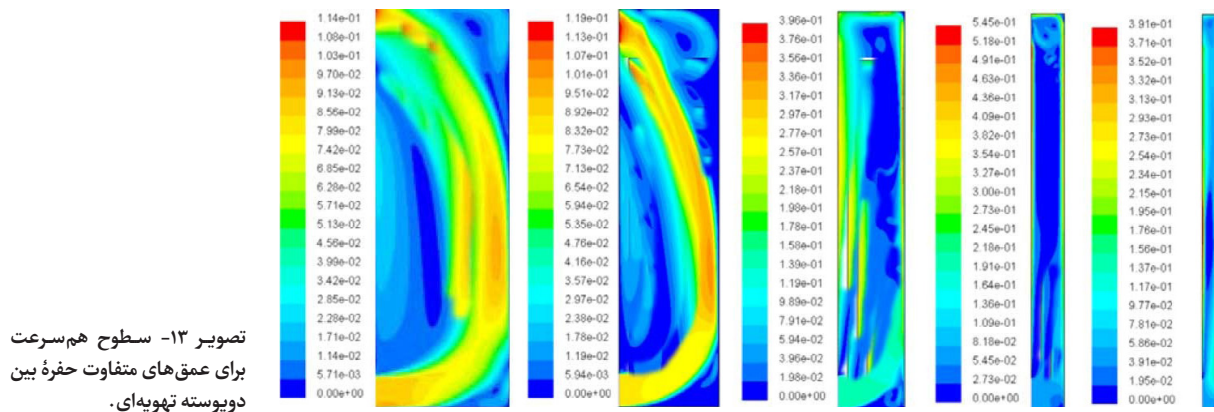
ظرفیت سنجی به کارگیری پوسته‌های دوجداره در طراحی معماری اقلیم گرم و خشک ایران به منظور کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی شهر یزد)



تصویر ۱۱- سطوح هم‌سرعت در داخل نمای دوپوسته برای اندازه‌های مختلف دریچه ورودی، با اندازه ثابت 200mm^2 برای دریچه خروجی.



تصویر ۱۲- میانگین دمای حفره برای اندازه‌های مختلف دریچه ورودی، به شرط اندازه ثابت 200mm^2 برای دریچه خروجی.



تصویر ۱۳- سطوح هم‌سرعت برای عمق‌های متفاوت حفره بین دوپوسته تهویه‌ای.

دوجداره پرداختیم. در این بررسی، عمق‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر برای حفره بین دو پوسته ارزیابی شد. به منظور حفظ دقت نتایج، شبکه مدل در دامنه اندازه سلول‌ها نیز به همان نسبت کاهش یافت. نتایج این مدل‌سازی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص شده است.

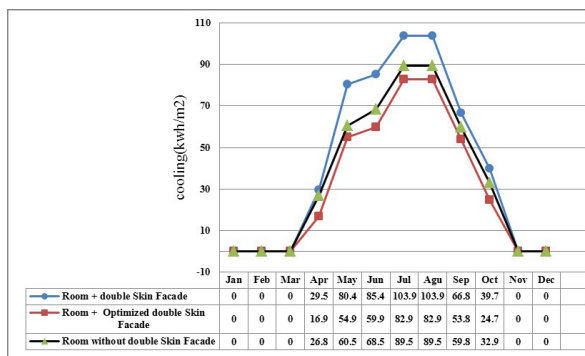
همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص است، جریان هوای منظم و پیوسته در تماس با پوسته داخلی حفره در شرایطی ایجاد می‌شود که عمق حفره بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر باشد. در شکل ۱۴ مشخص است همین جریان هوای پیوسته باعث شده سطح دمای داخل حفره هنگامی که عمق آن ۶۰۰ میلی‌متر است در پایین‌ترین سطح قرار گیرد. با افزایش عمق نما از ۶۰۰ به ۸۰۰

باشد، میانگین دمای حفره به حداقل خود می‌رسد، اگرچه در این حالت جریان هوا بر روی پوسته داخلی وجود ندارد.

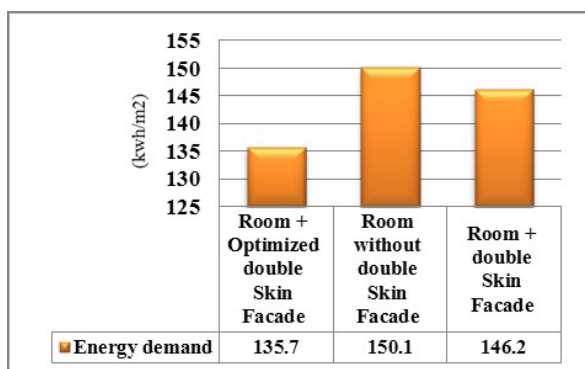
به صورت کلی می‌توان گفت وقتی که نسبت اندازه دهانه خروجی و ورودی هوا برابر ۴ باشد به کمترین دما دست می‌یابیم؛ در این بین، اولویت با ثابت ماندن دهانه خروجی و تغییر دهانه ورودی است. این موضوع تأثیر مستقیم کاهش نسبت اندازه دهانه‌ها را بر برافروختگی نشان می‌دهد.

۳-۱. بررسی عمق فضای بین دو پوسته

در گام بعدی به مدل‌سازی وضعیت دمای داخل حفره نمای دوپوسته تهویه‌ای تحت تأثیر عمق‌های مختلف برای حفره نمای



تصویر ۱۶- مقایسه مصرف انرژی جهت ایجاد سرمایش برای ۳ مدل مورد مطالعه.



تصویر ۱۷- مقایسه کل مصرف انرژی در طول سال برای مدل های مورد مطالعه.

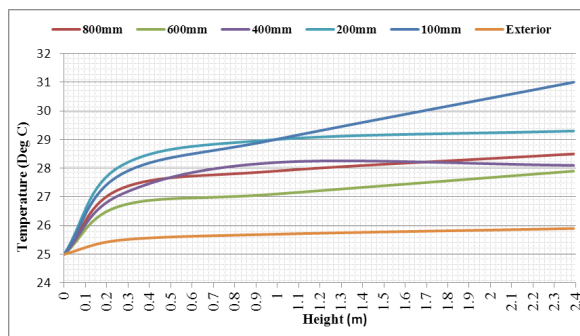
باید به این نکته هم توجه داشت که در تعیین عمق حفره، ارتفاع و همچنین طول پوسته هم اهمیت زیادی دارد. ضمن این که ابعاد فضای مرتبط با نمای دوپوسته نیز بر عملکرد این نماها بسیار تأثیرگذار است. همچنین تصمیم گیری برای تعیین عمق حفره تحت تأثیر موارد دیگری نیز قرار می گیرد. از قبیل:

- فضای کافی برای تجهیزات سایه اندازی و عناصر سازه‌ای وجود داشته باشد.
- امکان دسترسی به داخل حفره برای شستشو و تعمیرات فراهم باشد.
- حفره به عنوان مجرای برای انتشار آلودگی یا سرایت آتش به سایر طبقات عمل نکند.

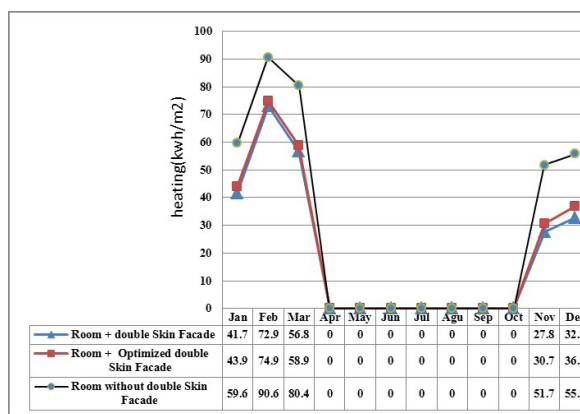
بایستی توجه داشت که هر پروژه باتوجه به شرایط خود و ارتفاع و حجم هوای داخل حفره، عمق بهینه خود را دارد. بنابراین به منظور جلوگیری از برافروختگی، بایستی تعادل بهینه‌ای میان ارتفاع و عمق در نمای دوپوسته‌ای به وجود آید.

۲. اعتبارسنجی نتایج

در انتها، مدل دوپوسته «بهبود یافته» که با مطلوب ترین نتایج کسب شده در مراحل قبلی مجهز شده است، با مدل دارای نمای دوپوسته عادی و مدل فاقد نمای دوپوسته مقایسه شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی نتایج (خروجی های نرم افزار فلونت)، در این مرحله، از نرم افزار Design Builder برای مدل سازی استفاده



تصویر ۱۴- شرایط دمای فضای بین دوپوسته تهویه‌ای تحت تأثیر عمق های مختلف حفره.



تصویر ۱۵- مقایسه مصرف انرژی جهت گرمایش برای سه مدل مورد مطالعه.

میلی متر، سرعت جریان پیوسته کم می شود و دمای حفره اندکی افزایش می یابد.

هنگامی که عمق نما ۴۰۰ میلی متر است، سرعت جریان هوای درون حفره افزایش می یابد؛ اما در شکل ۱۳ مشخص است که این جریان هوا مسیر مشخصی ندارد و حرکت گردابه‌ای را دنبال می کند. این باعث می شود دمای حفره درحالتی که عمق آن ۴۰۰ میلی متر است، نسبت به عمق ۶۰۰ و حتی ۸۰۰ میلی متر بالاتر باشد. در عمق های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی متر نیز عدم تناسب بین عمق و ارتفاع حفره به عدم تهویه مناسب و افزایش دمای آنها منجر می شود. از نتایج مدل سازی ها در این بخش می توان نتیجه گرفت که تغییرات عمق تأثیر چشمگیری بر چگونگی و سرعت جریان هوای داخل حفره دارد. در صورتی که ضریب انتقال حرارت شیشه ها کنترل شود و نمای دوجداره به صورت صحیح عایق بندی شود، تغییر عمق فضای داخل حفره می تواند تفاوتی در حدود ۶ تا ۱۰ درجه سلسیوس برای عمق های مختلف ایجاد کند. از طرف دیگر، در نماهای دوپوسته بدون تهویه هم هرچه عمق فضای حفره بیشتر باشد، تابش عبوری از جداره خارجی باید حجم بیشتری از هوا را (با استفاده از اثر گلخانه) گرم کند. این مسئله خود به پایین آمدن دمای داخل حفره می انجامد. اما این به معنای بهبود عملکرد نمای دوپوسته نیست؛ زیرا این کار، عملکرد گرمایشی پوسته در شرایط سرد را هم مختل می کند.

در مدل مورد مطالعه، عمق ۶۰۰ میلی متر عملکرد بهتری نسبت به بقیه موارد ایجاد می کرد. البته برای تعیین عمق بهینه

را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد در تمامی ماه‌هایی که به گرمایش احتیاج داریم، مصرف انرژی در فضای داری پوسته دوجداره بهبود یافته نسبت به فضای دارای پوسته دوجداره معمولی و فضای فاقد پوسته دوجداره پایین تر است. اوج مصرف انرژی گرمایشی را در ماه فوریه (بهمن) شاهد هستیم، که در مدل فاقد پوسته دوجداره 90.6 kWh/m^2 است؛ در حالی که این میزان برای مدل دارای پوسته دوجداره بهبود یافته 74.9 kWh/m^2 و برای مدل دارای پوسته دوجداره معمولی 72.9 kWh/m^2 است. این مقادیر، تأثیر مناسب استفاده از هرنوع پوسته دوجداره را برای کاهش بار گرمایشی فضا نشان می‌دهد.

شکل ۱۶ نتایج شبیه‌سازی مصرف انرژی سرمایشی را در سه مدل مورد بررسی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار مصرف انرژی سرمایشی، به مدل دارای پوسته دوجداره معمولی مربوط است که در اوج نیاز به سرمایش در ماه آگوست (مرداد) 103.9 kWh/m^2 مصرف می‌کند. در همین زمان، میزان مصرف انرژی سرمایشی مدل فاقد پوسته دوجداره به 89.5 kWh/m^2 بالغ می‌شود. این در حالی است که میزان مصرف انرژی سرمایشی در مدل دارای پوسته دوجداره بهبود یافته به 82.9 kWh/m^2 می‌رسد که نه تنها تأثیر مثبت راهکارهای جلوگیری از برافروختگی را نسبت به مدل دارای نمای دوپوسته معمولی نشان می‌دهد، بلکه بیانگر این امر است که تمهیدات پیشنهادی این پژوهش می‌توانند در کنار کاهش بار گرمایشی، حتی کاهش بار سرمایشی فضا را نیز موجب شود؛ حتی در شهری واقع در اقلیم گرم و خشک نظیر یزد.

مصرف سالیانه انرژی به ازای هر مترمربع فضا، برای هر سه مدل در شکل ۱۷ آمده است. بر این اساس، مقدار کل مصرف انرژی (سرمایش و گرمایش) مدل دارای پوسته دوجداره بهبود یافته ($14/4 \text{ kWh/m}^2$) از مدل فاقد پوسته دوجداره کمتر است.

یکی دیگر از نقاط قابل توجه در شکل ۱۷، بیشتر بودن مصرف انرژی سالیانه ساختمان فاقد پوسته دوجداره، نسبت به ساختمان دارای پوسته دوجداره معمولی است. این امر نشان می‌دهد اگرچه کاربرد پوسته دوجداره معمولی باعث افزایش بار سرمایش می‌شود، اما با کاهش بار گرمایش این میزان را جبران می‌کند. این موضوع، پتانسیل بالای کاربرد پوسته‌های دوجداره در صرفه جویی مصرف انرژی را نشان می‌دهد. اگرچه با توجه به اندک بودن این تفاوت ($3/9 \text{ kWh/m}^2$)، نمی‌توان نماهای دوجداره معمولی را برای منطقه‌ای گرم و خشک نظیر یزد پیشنهاد کرد.

شد. ویژگی‌های فیزیکی مشترک هر سه مدل مورد مطالعه شامل موارد ذیل است:

- اتاقک دارای ابعاد $2,4 \times 2,4$ متر
- سقف به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر از جنس تیرچه بلوک سفالی، دارای ۸ سانتی‌متر عایق پلی‌استایرن و اندود داخلی
- دیوارها از جنس آجر سفالی ۱۵ سانتی‌متری به همراه ۵ سانتی‌متر آجر نما، ۵ سانتی‌متر پشم شیشه و اندود داخلی
- دو پنجره با قاب پی‌وی‌سی و شیشه دوجداره با ضریب انتقال حرارت $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ هریک با مساحت یک متر مربع
- درب چوبی با ضریب انتقال حرارت $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ و مساحت $5,4$ متر مربع

در جبهه جنوبی مدل پیشنهادی، پوسته دوجداره تهویه‌ای به کار گرفته شده که علاوه بر خصوصیات فوق شامل موارد ذیل است:

- دارای هفت عدد دریچه تهویه ورود هوا با ابعاد 10×10 سانتی‌متر در پایین پوسته دوجداره و هفت عدد دریچه تهویه خروجی هوا با ابعاد 40×40 سانتی‌متر در بالای نمای دوپوسته
- عمق حفره پوسته دوجداره ۶۰ سانتی‌متر
- به کار گرفتن لوورهای خارجی مشکی‌رنگ در فضای بین دو پوسته و در نظر گرفتن شیشه بافت‌دار برای جداره خارجی دریچه‌های تهویه روی جدار بیرونی در فصل زمستان کاملاً بسته و در بقیه فصول باز هستند. از طرفی دریچه‌های تهویه روی جداره داخلی فقط در فصل تابستان بسته و در بقیه فصول باز اند. بقیه شرایط اعمال شده در مدل‌سازی به شرح ذیل است:
- کاربری فضا مسکونی در نظر گرفته شده
- نرخ لباس زمستان 1 clo و نرخ لباس تابستانی 0.5 clo در نظر گرفته شده
- برای فضا دو لامپ فلورسنت در نظر گرفته شده
- کمترین حد تهویه طبیعی به ازای مساحت فضا در نظر گرفته شده

همچنین در دو مدلی که پوسته دوجداره در آن به کار گرفته شده، فضای داخل حفره به عنوان مازاد بر مساحت اتاق در نظر گرفته شده و در مدل‌سازی نیز به عنوان جزئی از فضای سکونتی در نظر گرفته نشده است. تمامی مدل‌ها در شرایط یکسان قرار گرفته‌اند و محاسبات با استفاده از فایل اطلاعات اقلیمی شهر یزد تهیه شده از وبگاه شرکت انرژی پلاس (URL ۱) انجام گرفته است. شکل ۱۵ میزان مصرف انرژی گرمایشی در سه مدل مورد مطالعه

نتیجه

- نسبت اندازه دریچه تهویه ورودی به خروجی بایستی ۱ به ۴ باشد (مساحت 50 mm^2 برای دریچه تهویه ورودی و مساحت 200 mm^2 برای دریچه تهویه خروجی)
- دریچه تهویه ورودی و خروجی حفره بایستی حداکثر فاصله ممکن را داشته باشند (در منتهی‌الیه بالا و پایین حفره نصب شوند)
- نسبت عمق حفره به ارتفاع آن بایستی ۱ به ۴ باشد (عمق حفره 600 mm برای ارتفاع حفره 2400 mm) البته با توجه به

در این پژوهش، ضمن تأکید بر خطرات افروختگی نمای دو پوسته واقع در اقلیم گرم و خشک ایران (شهر یزد) در فصل تابستان، مطالعات انجام شده در زمینه خنک‌کردن حفره بین دو پوسته بررسی شد. در ادامه، تأثیر وجود دریچه‌های تهویه و اندازه آنها و همچنین تغییر فاصله بین دو پوسته بر کاهش برافروختگی فضای بین دو پوسته توسط شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلونت بررسی شد. در این مطالعه، اختصاراً نتایج زیر به دست آمد:

نمای دوپوسته کمتر بود. این موضوع نشان می‌دهد نماهای دوپوسته در صورت طراحی مناسب می‌توانند حتی در مناطق گرم و خشک عملکرد مناسبی داشته باشند. در نهایت بایستی به این نکته اشاره کرد که علاوه بر مطالب بررسی شده در این مقاله، پارامترهای بسیاری در افزایش عملکرد پوسته‌های دوجداره در اقلیم گرم و خشک نقش دارند. لذا انجام مطالعات تکمیلی از قبیل بررسی تأثیر نوع شیشه و یا سایه‌اندازی مناسب می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر کاهش برافروختگی در حفره بین دوپوسته و افزایش عملکرد این نماها در اقلیم گرم و خشک داشته باشد.

توضیحات مطرح شده در قسمت ۲-۳ ابعاد ذکر شده، فقط مربوط به همین اتاقک هستند و برای هر نمای دو پوسته ای باید جداگانه نسبت ابعاد درست را با توجه به شرایط پیدا نمود. به منظور اعتبارسنجی نتایج، از نرم‌افزار Design-Builder برای مقایسه مدل دارای خصوصیات فوق با مدل دارای نمای دوپوسته معمولی و مدل فاقد نمای دوپوسته استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد میزان مصرف انرژی کل (گرمایش و سرمایش) در ساختمان دارای نمای دوپوسته بهبود یافته (دارای مشخصات فوق)، $14.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ از ساختمان فاقد

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری جناب آقای دکتر جمال خداکرمی و آقای دکتر فرشاد نصراللهی کمال سپاسگزاری را دارند.

پی‌نوشت‌ها

areas; Energy and Buildings 40: 240–248.

Hashemi, N.; Fayazb, R.; Sarshar M.; (2010) *Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate*; Energy and Buildings 42: 1823–1832.

Kanga, Daeho; Strand, K. Richard; (2013) *Modeling of simultaneous heat and mass transfer within passive down-draft evaporative cooling (PDEC) towers with spray in FLUENT*; Energy and Buildings 62: 196–209.

Oesterle, E; Lieb, R.; Lutz, M; Heusler, W; (2001) *Double-skin Facades, Integrated Planning*; Prestel Verlag, Munich, p. 207.

Pei, Fenglai; Yuan, Hongxun; Zhang, Tong; Zhou, Su; (2013) *A Study on PEMFC Performance and Faults Diagnosis Using FLUENT 3D Models*; Procedia Engineering 61: 370–375.

Radhia, Hassan; Sharples, Stephen; Fikiry, Fayze; (2013) *Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings*; Energy and Buildings 56: 179–188.

Schittich, C; (2001) *Building Skins, Concepts, Layers, Materials*; Edition Detail, p. 196.

Tseng, Yung-Shin; Wang, Jong-Rong; Tsai, Fengjee Peter; Cheng, Yi-Hsiang; Shih, Chunkuan; (2011) *Thermal design investigation of a new tube-type dry-storage system through CFD simulations*; Annals of Nuclear Energy 38: 1088–1097.

Wigginton, M; Harris, J; (2002) *Intelligent Skins*; Gray Publishing, Tunbridge Wells, Kent, p. 176.

URL 1: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weath-erdata/2_asia_wmo_region_2/IRN_Yazd.408210_ITMY.zip (visited on 2014-06-04)

1 Overheating.

2 Fluent.

3 Computational Fluid Dynamics (CFD).

4 Viscose Model.

5 Continuity.

6 Momentum.

فهرست منابع

Baharvand, Mohammad; Bin Ahmad, Mohd hamdan; Safikhani, Ta-bassom; Majid, R.B.A.; (2013) *Design-Builder Verification and Validation for Indoor Natural Ventilation*; Journal of Basic Applied Science Resource 3: 182–189.

Chung, Leng Pau; Ahmad, Mohd Hamdan Bin; Ossen, Dilshan Remaz; Hamid, Malsiah (2014) *Application of CFD in Prediction of Indoor Building Thermal Performance as an Effective Pre-Design Tool Towards Sustainability*; World Applied Sciences Journal 30: 269–279.

Gratia, Elisabeth; De Herde, André; (2004a) *Natural ventilation in a double-skin facade*; Energy and Buildings 36: 137–146.

Gratia, Elisabeth; De Herde, André; (2004b) *Optimal operation of a south double-skin facade*; Energy and Buildings 36: 41–60.

Gratia, Elisabeth; De Herde, André; (2007a) *Greenhouse effect in double-skin facade*; Energy and Buildings 39: 199–211.

Gratia, Elisabeth; De Herde, André; (2007b) *The most efficient position of shading devices in a double-skin facade*; Energy and Buildings 39: 364–373.

Hamza, Neveen; (2008) *Double versus single skin facades in hot arid*