

# آنالیز حساسیت ویژگی‌های ساختاری بر عملکرد حرارتی نمای دوپوسته جعبه‌ای با تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک ایران (مطالعه موردی: شهر تهران)\*

مهندس فریال سادات سیادتی\*\*، دکتر ریما فیاض\*\*\*، دکتر نیلوفر نیک قدم\*\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲

## چکیده

نمای دوپوسته یک عنصر معماری جذاب از نظر بصری است. فرایندهای فیزیکی در نمای دوپوسته پویا و در برهم‌کنش مداوم با یکدیگر هستند و به ویژگی‌های هندسی و حرارتی عناصر مختلف نما بستگی دارند. متغیرهای مستقل موثر در عملکرد حرارتی نمای دوپوسته جعبه‌ای با تهویه طبیعی، شامل عمق حفره، سطح مقطع دریچه‌ها، جنس، موقعیت و زاویه سایه‌بان و جنس شیشه‌ها و متغیرهای وابسته شامل، دمای شیشه داخلی، سرعت جریان هوا و شار گرمایی عبوری از شیشه داخلی است. هدف این مقاله، تعیین میزان تاثیر هر کدام از متغیرهای مستقل بر عملکرد حرارتی نمای دوپوسته جعبه‌ای دارای تهویه طبیعی در فصل تابستان است. برای تحلیل رفتار حرارتی نما، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام شد. نتایج نشان داد، استفاده یاعدم استفاده از سایه‌بان، بیشترین تاثیر را در تغییرات دما (تا ۳٫۷٪) و شار گرمایی عبوری از شیشه داخلی (تا ۶۱٪) و سطح مقطع دریچه‌ها، بیشترین تاثیر را بر سرعت جریان هوا در حفره میانی (تا ۱۱۵٪) دارند.

## واژه‌های کلیدی

تهویه طبیعی، نمای دوپوسته جعبه‌ای، شبیه‌سازی، اقلیم گرم و خشک، دینامیک سیالات محاسباتی، آنالیز حساسیت.

\*این مقاله برگرفته از پایان نامه دکتری فریال سادات سیادتی با عنوان «ارائه الگوی بهینه نمای دوپوسته در ساختمان‌های اداری اقلیم گرم و خشک ایران»، با راهنمایی دکتر ریما فیاض و مشاوره دکتر نیلوفر نیک قدم، در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب است.

\*\* پژوهشگر دکتری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: faryal.siadati@gmail.com

\*\*\* دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر - تهران، ایران. (مسئول مکاتبات)

Email: fayaz@art.ac.ir

\*\*\*\* دانشیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: n\_nikghadam@azad.ac.ir

## مقدمه

که بر رفتار حرارتی و دینامیک سیالاتی آن موثر هستند به صورت زیر قابل دسته بندی هستند (شکل ۱) (Jankovic & Goia, 2021):

- ویژگی های هندسی<sup>۱</sup>: ابعاد حفره میانی، هندسه بازشوها، موقعیت و زاویه سایه بان

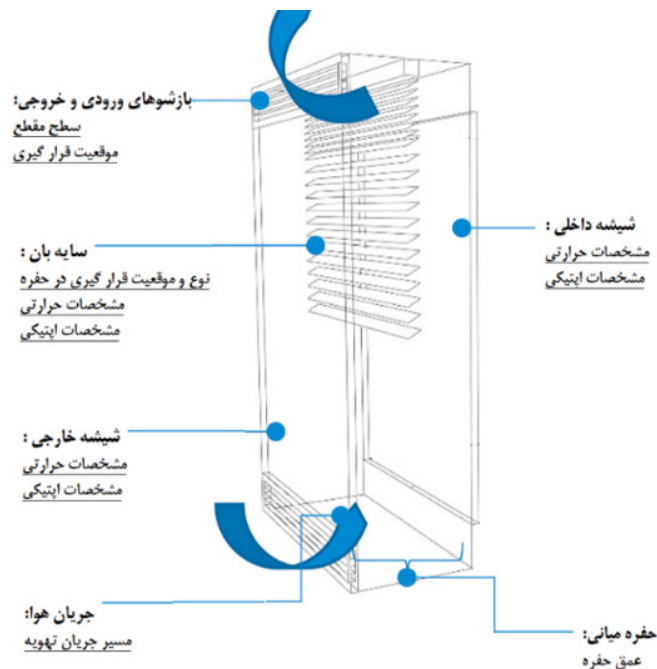
- ویژگی های مصالح<sup>۲</sup>: ویژگی های اپتیکی و گرمایی سطوح شفاف و سایه بان

بسیاری از پژوهش ها در زمینه رفتار حرارتی نماهای دوپوسته، به بررسی تاثیر تغییر در یکی از ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته با تهویه طبیعی بر رفتار حرارتی آن پرداخته و تغییر در چند ویژگی ساختاری نما و تاثیر متقابل تغییر این ویژگی ها بر یکدیگر و رفتار حرارتی نمای دوپوسته کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Jankovic & Goia, 2021). در نظر گرفتن کلیه ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته تهویه طبیعی در هنگام طراحی آن، باعث عملکرد حرارتی مناسب نمای دوپوسته می شود. میزان تاثیر هر یک از ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته بر عملکرد حرارتی آن قابل اندازه گیری و ارزیابی است.

هدف از این پژوهش، بررسی میزان تاثیر تغییر در ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته جعبه ای دارای تهویه طبیعی، شامل ویژگی های هندسی و ویژگی های مصالح تشکیل دهنده، در راستای بهبود عملکرد حرارتی نما، در اقلیم گرم و خشک ایران (شهر تهران) در فصل تابستان است. برای ارزیابی میزان اثرگذاری هر عامل، از آنالیز حساسیت استفاده شد. ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته جعبه ای که در این پژوهش اثرات تغییر آنها بر عملکرد حرارتی نما بررسی شد، شامل جنس شیشه ها، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی هوا، عدم استفاده یا استفاده از سایه بان با زوایای مختلف و عمق حفره میانی بود. بدین ترتیب میزان تاثیر تغییر هر کدام از این ویژگی های ساختاری بر عملکرد حرارتی نمای دوپوسته (در راستای ارتقای آن) در ظهر گرمترین روز سال در شهر تهران برای نمای جنوبی ساختمان مشخص گردید. در همه حالات، موقعیت سایه بان در یک سوم حفره میانی سمت شیشه خارجی، موقعیت دریچه های ورودی و خروجی هوا در سمت جانبی خارجی نمای دوپوسته جعبه ای (سمت شیشه خارجی) و مسیر جریان هوا از بیرون به بیرون در نظر گرفته شد. هدف نهایی این مقاله پاسخ به پرسش زیر است:

- کدام ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی به ترتیب تاثیر بیشتری در ۱- کاهش عبور انرژی گرمایی از سطح شیشه داخلی، ۲- کاهش دمای سطح شیشه داخلی، ۳- افزایش سرعت جریان هوا در حفره میانی نمای دوپوسته را برای نمای جنوبی در شهر تهران دارد؟

نمای دوپوسته<sup>۱</sup> از یک ساختار چند لایه اغلب شفاف، متشکل از لایه خارجی، لایه داخلی و حفره میانی<sup>۲</sup> بین این دو لایه تشکیل می شود که ممکن است بر اساس مقتضیات اقلیمی، دارای اجزایی برای کنترل بصری، جذب حرارتی و تابشی نیز باشد (Kim, 2020). نماهای دوپوسته دارای تیپ های هندسی متفاوت جعبه ای<sup>۳</sup>، کریدوری<sup>۴</sup>، شافت<sup>۵</sup> و چند طبقه ای پوسته<sup>۶</sup> هستند و بر اساس نوع شکل گیری جریان تهویه در حفره میانی به سه دسته تهویه به صورت طبیعی<sup>۷</sup>، مکانیکی و هیبریدی<sup>۸</sup> (طبیعی و مکانیکی) تقسیم بندی می شوند (Barbosa & Ip, 2014; Tao et al., 2021). نمای دوپوسته به دلیل قابلیت انعطاف پذیری در مسیرهای جریان تهویه حفره میانی از لحاظ نظری یک سیستم پیشرفته برای مدیریت تعامل بین فضای خارجی و داخلی ساختمان است. مسیرهای جریان تهویه حفره میانی شامل تهویه از بیرون به بیرون<sup>۹</sup> (تهویه طبیعی)، از درون به درون<sup>۱۰</sup>، از بیرون به درون<sup>۱۱</sup>، از درون به بیرون<sup>۱۲</sup> و داخل حفره میانی<sup>۱۳</sup> می باشد (Ahmed et al., 2016; Hachem-Vermette, 2020). نماهای دوپوسته در صورت طراحی مناسب می توانند عملکرد حرارتی و نور طبیعی مناسب، جذابیت بصری، آسایش حرارتی و بهبود شرایط عایق صوتی را به ارمغان بیاورند (Shameri et al., 2011; Tao et al., 2021). باید توجه داشت سطوح شیشه ای بزرگ در صورت عدم طراحی مناسب و عدم مدیریت در دوره بهره برداری در کنترل جریان تهویه، فعال سازی سایه بان و تعمیر و تعویض قطعات معیوب، می تواند باعث نقصان عملکردی نمای دوپوسته شود (Pasut & Di Carli, 2021; Oh et al., 2012; Tao et al., 2021). نماهای دوپوسته به طور گسترده به عنوان یک راه حل تکنولوژیک مورد بررسی قرار گرفته اند. پیوند ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته با رفتار مکانیکی، حرارتی و سیالاتی آنها پیچیده است. انتقال جرم<sup>۱۴</sup>، مومنتم<sup>۱۵</sup> و انرژی گرمایی<sup>۱۶</sup> در نمای دوپوسته بسیار پویا و در تعامل مداوم هستند و تحت تاثیر دمای داخلی و خارجی، سرعت و جهت باد، شدت تابش ورودی و عبوری از نما و اختلاف فشار بین حفره میانی و محیط باز اطراف قرار دارند لذا تنها پس از درک کلیه فرایندهای فیزیکی، اقدامات طراحی (به عنوان مثال انتخاب و بهینه سازی ویژگی های ساختاری نما شامل ویژگی های هندسی، حرارتی، فیزیکی، نوری و آیرودینامیکی<sup>۱۷</sup>) و استراتژی های بهره برداری و عملکردی نمای دوپوسته را می توان به طور آگاهانه برای دستیابی به اهداف عملکردی مطلوب برنامه ریزی کرد (Parra et al., 2015; Tao et al., 2021). به طور کلی ویژگی های ساختاری<sup>۱۸</sup> نمای دوپوسته با تهویه طبیعی<sup>۱۹</sup>



شکل ۱. ویژگی‌های ساختاری موثر بر رفتار حرارتی نمای دو پوسته با تهویه طبیعی  
Figure 1. Structural features affecting the thermal behavior of a natural ventilated double skin facade

## پیشینه پژوهش

نمای دو پوسته با تهویه طبیعی به دلیل ماهیت پیچیده جریان هوا و عدم قابلیت پیش بینی رفتار حرارتی و مکانیک سیالاتی نسبت به نمای دو پوسته با تهویه مکانیکی بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. پیش بینی عملکرد حرارتی نمای دو پوسته پیچیده تر از سایر سیستم های نمای ساختمان است. انتشار گرما در لایه های جامد و سیال نمای دو پوسته با مکانیسم های انتقال حرارت در لایه و محیط اطراف که می تواند ترکیبی از حالات رسانش<sup>۲۲</sup>، تابش<sup>۲۳</sup> و همرفت<sup>۲۴</sup> باشد تعیین می شود. انتقال حرارت از طریق رسانش در نمای دو پوسته تقریباً ناچیز و قابل چشم پوشی است. معمولاً پارامترهای رسانش در لایه شیشه و سایه بان لحاظ می شود و از رسانش هوا در حفره میانی صرف نظر می گردد (Jankovic & Goia, 2021). انتقال حرارت از طریق تابش، بین لایه های شیشه، لایه های شیشه و سایه بان و بین سطوح داخلی نما و محیط اطراف رخ می دهد (Hens, 2017). لیکن عدم قطعیت اصلی در پیش بینی عملکرد حرارتی نمای دو پوسته ناشی از انتقال حرارت از طریق همرفت بوده که روابط فیزیکی و عددی پیچیده تری دارد (Jankovic & Goia, 2021). روش دینامیک سیالات

محاسباتی<sup>۲۵</sup> ابزار مناسبی برای دستیابی به راه حل جامع بررسی این پدیده ها محسوب می شود (Kim, 2020). نرم افزار فلوئنت به عنوان نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه سازی رفتار نمای دو پوسته در پژوهش های پیشین بسیار پر کاربرد بوده است (Tao et al., 2021). در پژوهش های پیشین بر روی نمای دو پوسته با تهویه طبیعی، مدل های آشفتگی RNG k- $\epsilon$  و SST k- $\omega$ ، مدل های تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S)، مدل هندسی دو بعدی و سه بعدی، مش بندی ساختار یافته مثلثی و مکعبی برای حالت سه بعدی و مش بندی ترکیبی برای حالت دو بعدی و الگوریتم حل Simple بیشترین استفاده را در نرم افزار فلوئنت داشته است (Li et al., 2019; Hassanli et al., 2018). با توجه به گستردگی و پیچیدگی فرایندهای فیزیکی درون در نمای دو پوسته تحت تابش خورشید و انواع متنوع گزینه های مدل آشفتگی، مدل تابشی، مش بندی و الگوریتم های حل ارائه شده در نرم افزار، که تاثیر بسزایی در دقت و صحت نتایج شبیه سازی دارد، لزوم صحت سنجی روش شبیه سازی فرایندهای فیزیکی رخ داده در نمای دو پوسته با نرم افزار فلوئنت مشخص است.

شیشه) شده و بخشی از سطح شیشه عبور کرده و وارد فضای داخلی ساختمان می شود. گرم شدن اجزای داخلی نمای دوپوسته، منجر به گرم شدن هوای اطراف این سطوح شده که با کاهش چگالی، هوای گرم شده به سمت بالا حرکت کرده و مکش در محل دریچه ورودی رخ می دهد و جریان تهویه طبیعی در حفره میانی شکل می گیرد. ابعاد دریچه ها و حفره میانی و موقعیت سایه بان نسبت به شیشه های داخلی و خارجی، عوامل تعیین کننده شدت جریان هوا در حفره میانی هستند. بر اساس خصوصیات هندسی و جنس مصالح نمای دوپوسته، بخشی از انرژی گرمایی به صورت همرفت از طریق دریچه خروجی نما خارج شده و بخش دیگری به سمت شیشه داخلی متمایل شده و به فضای داخلی ساختمان وارد می شود. گرمای وارد شده به فضای داخلی ساختمان، مجموع گرمای منتقل شده از طریق تابش مستقیم عبور کرده از سطح شیشه داخلی و گرمای منتقل شده از طریق جریان همرفتی است (Sharma et al., 2021). بنابراین ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته با تهویه طبیعی که بر رفتار حرارتی و دینامیک سیالاتی آن موثر هستند شامل، ویژگی های هندسی (ابعاد حفره میانی، مسیر جریان هوا، سطح بازوها، موقعیت و زاویه سایه بان) و ویژگی های مصالح (ویژگی های اپتیکی و گرمایی سطوح شفاف و سایه بان) می باشد.

- ابعاد حفره میانی: در نمای دو پوسته، ارتفاع نما عاملی بسیار مهم است زیرا اثر دودکشی<sup>۲۸</sup> را افزایش می دهد و جریان هوا را در داخل حفره میانی تسریع می کند (Zhang & Yang, 2019). به همین دلیل نمای دوپوسته نوع شافتی و نوع پیوسته برای تهویه طبیعی در مقایسه با نوع کریدوری و جعبه ای مناسب تر هستند (Barbosa & Ip, 2014). مطالعات نشان می دهد که حفره میانی باریک تر، جریان طبیعی هوا در حفره را برجسته تر می کند (Hou et al., 2020). در نمای دوپوسته تیپ جعبه ای، ارتفاع نما محدود به ارتفاع هر طبقه از ساختمان است. برخی از محققان (El Ahmar et al., 2019) تاکید می کنند که سطح مقطع نمای دوپوسته به دلیل انتشار گرما از سطوح داغ و در نتیجه رخداد پدیده بیش گرمایش، نباید زیاد کم عمق باشد. عمق حفره میانی در اقلیم سرد که هدف در آن حفظ گرما در داخل حفره میانی است نباید از ۲۰ سانتیمتر و در اقلیم گرم که هدف تخلیه گرما از داخل حفره میانی به بیرون است نباید از ۶۰ سانتیمتر بیشتر شود (El Ahmar et al., 2019). در شهر دبی نمای دوپوسته تهویه طبیعی با عمق های ۶۰ و ۱۲۰ سانتیمتر بررسی شده است (Aldawoud et al., 2020). در اقلیم گرم و خشک ایران (شهر تهران)، نمای دوپوسته با عمقهای ۸۰ تا ۱۶۰ سانتیمتر بررسی و استفاده شده است (Tahsildoost, 2018; Pourshab et al.,

انتقال حرارت از طریق همرفت در عمومی ترین شکل خود با قانون تبرید نیوتن<sup>۲۶</sup> توصیف می شود، یعنی فرض بر این است که سرعت انتقال حرارت همرفتی، متناسب با تفاوت بین دمای سطح و سیال است. در مهندسی سیالات برای جریان های سیال داخل حفره مانند حفره میانی نمای دوپوسته، تفاوت دمای محلی در عمق حفره بستگی به سرعت جریان هوا در حفره میانی و توزیع دما در نزدیکی سطوح شیشه ای و سایه بان دارد، ضمن آنکه عواملی مانند شرایط مرزی نامتقارن و تاثیر متقابل سطوح هم مرز می توانند باعث پیچیدگی و تصادفی شدن محاسبات شوند (Jankovic & Goia, 2021). محرک هایی مانند شدت تشعشع خورشیدی، زاویه تابش، دمای بیرون و سرعت و جهت وزش باد باعث ناپایداری و تصادفی شدن جریان می شوند. شناسایی و تخمین مقادیر مربوط به انتقال حرارت از طریق همرفت با اضافه شدن عناصر هندسی دیگر به حفره میانی نمای دوپوسته از جمله سایه بان، بسیار پیچیده تر می شود.

استفاده از نمای دوپوسته با تهویه طبیعی در آب و هوای گرم که دارای میزان تابش زیاد است، کمتر توصیه می شود زیرا عناصر داخلی نما ممکن است تا دمای ۷۰ درجه سانتیگراد گرم شده و در نهایت پدیده بیش گرمایش<sup>۲۷</sup> و آسیب قطعات ظریفی مانند موتور های عناصر سایه انداز رخ دهد (Colombo et al., 2017; Jankovic & Goia, 2021). در نمای دوپوسته جریان ناشی از شناوری بین دو صفحه موازی عمودی (Pasut & Di Carli, 2012; Cherif et al., 2020)، باعث به وجود آمدن جریان گردش هوا به صورت دو طرفه با شتاب رو به بالا در نزدیکی طرف گرم شده همراه با شتاب نزولی به سمت پایین در طرف مقابل می شود. این الگو به همراه جریان گردابی در قسمت مرکزی حفره شکل می گیرد. شدیدترین نوسانات سرعت و دما مربوط به ناحیه رو به روی طرف گرم شده بوده و باعث کاهش دمای دیواره در این ناحیه می شود (Pasut & Di Carli, 2012; Cherif et al., 2020). در نمای دوپوسته با رسیدن تابش خورشید به سطح شیشه خارجی نما، بر اساس خصوصیات گرمایی شیشه، بخشی از طیف گرمایی تابش، منعکس، بخشی در شیشه جذب و تبدیل به انرژی گرمایی (افزایش دمای شیشه) شده و بخشی نیز از سطح شیشه گذر می کند. انرژی تابشی گذر کرده به سطح سایه بان رسیده و بر اساس زاویه و خصوصیات گرمایی سایه بان، بخشی منعکس و بخشی جذب و تبدیل به انرژی گرمایی (و منجر به افزایش دمای سایه بان) شده و بر اساس زاویه سایه بان، بخشی نیز ممکن است از سطح سایه بان عبور کند. به همین ترتیب انرژی تابشی عبور کرده از سطح سایه بان به شیشه داخلی رسیده و بر اساس خصوصیات گرمایی شیشه، بخشی منعکس، بخشی جذب و تبدیل به انرژی گرمایی (افزایش دمای

(2020 & Zomorodian). بهبود عملکرد حرارتی نمای دوپوسته تهویه طبیعی با افزایش عمق حفره در اقلیم گرم و خشک نسبت به اقلیم سرد مشخص است. تعیین عمق حفره بایستی با توجه به شرایط متفاوت اقلیمی و جهت گیری نما در سایت انجام گیرد. جهت تخمین اولیه در شبیه سازی و با توجه به پژوهش های انجام شده، اعدادی در بازه ۳۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر مناسب است.

مسیر جریان هوا: مسیر های مختلف جریان هوا به طور قابل توجهی بر ضریب جذب حرارتی خورشیدی<sup>۲۹</sup> تاثیر می گذارد. در شرایط تابستانی و با تابش خورشیدی، تهویه از بیرون به بیرون به دلیل افزایش اثر دودکشی و متعاقب آن کاهش حرارت منتقل شده و کاهش بار خنک کننده فضای داخلی ساختمان مناسب تر است (Sanchez et al., 2016). مشخصات هندسی حفره، دریچه ها و موقعیت و زاویه سایه بان به همراه مشخصات مصالح استفاده شده در نمای دوپوسته، در شکل گیری و جهت گیری مسیر جریان هوای ناشی از تهویه طبیعی در حفره میانی نما موثر است (Tao et al., 2021). پارامترهای موثر در نحوه شکل گیری مسیر جریان هوا با پارامترهای موثر بر عملکرد حرارتی نمای دوپوسته تهویه طبیعی مشابه است.

سطح بازشوها: سطح بازشوها و عرض حفره عملکرد کلی نمای دوپوسته را تحت تاثیر قرار می دهد (Ikrima Amaireh, 2017). برای شرایط معمولی تابستان در اقلیم گرم، اندازه بازشوها تاثیر قابل ملاحظه ای نسبت به عمق حفره میانی در حالت تهویه از بیرون به بیرون بر دمای حفره میانی دارد (Kim, 2020). افزایش عمق حفره می تواند منجر به افزایش دمای حفره میانی شود در حالی که بازشوی بزرگ تر منجر به کاهش دمای حفره می شود. برای نمای دوپوسته با سایه بان و عناصر با جرم حرارتی بالا، مساحت بزرگتر بازشوها باعث جریان شناوری قوی تر می شود (Hong et al., 2019). تاثیر مشترک عمق حفره و اندازه بازشوها بسیار پیچیده است و ابعاد غیر بهینه می تواند تا حد زیادی عملکرد مثبت جریان هوای طبیعی ناشی از تهویه هوا را در تابستان کاهش دهد (Tao et al., 2021). پارامتر سطح بازشوها به همراه پارامترهایی مانند عمق حفره میانی و موقعیت سایه بان در شدت و مسیر جریان هوا موثر هستند. تاثیرات مشترک این پارامترها می تواند در نهایت منجر به بهبود عملکرد حرارتی نما و یا رخداد شرایط بر عکس شود، لذا افزایش سطح بازشوها که در اکثر مواقع باعث افزایش شدت جریان هوا در حفره میانی می شود، تضمینی بر ارتقای عملکرد حرارتی نمای دوپوسته تهویه طبیعی نخواهد بود.

موقعیت سایه بان: در نمای دوپوسته با تهویه طبیعی، انتقال گرما از طریق تابش مستقیم نسبت به انتقال از طریق همرفت و رسانش

غالب است. بنابراین مهم ترین عنصر سازه ای در کنترل انتقال حرارت، سایه بان است. سایه بان با جلوگیری از تابش به سطح شیشه داخلی نما و جذب گرما، باعث گرم شدن هوای مجاور خود و رخداد پدیده دودکشی می شود (Barbosa & Ip, 2014; Pourshab et al., 2020). سایه بان حفره میانی را به دو کانال عمودی تقسیم می کند و در حالت عمومی برای اقلیم گرم در فصل تابستان، بهترین موقعیت نصب سایه بان، در نزدیکی سطح شیشه خارجی نمای دوپوسته، در هر دو حالت تهویه مکانیکی و طبیعی است (Barbosa & Ip, 2014; Iyi et al., 2014; Ikrima Amaireh, 2017).

متغیرهای وابسته برای بررسی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته، شامل دو پارامتر اصلی دما و سرعت جریان هوا در حفره میانی (یا دبی جرمی هوای ورودی و خروجی از دریچه ها) بوده که در اکثر تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است (Cho & Cho, 2018; Cherif et al., 2020). این دو پارامتر اصلی در پژوهش های مبتنی بر آنالیز عددی و شبیه سازی و در پژوهش های آزمایشگاهی قابل اندازه گیری و برای اعتبار سنجی روش های عددی، نتایج قابل مقایسه هستند. پارامتر دیگر شار گرمایی<sup>۳۰</sup>، مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در واحد زمان و بر واحد سطح است (Parra et al., 2015). شار گرمایی اجسام مجموع شار گرمایی ساطع شده ناشی از (یا به صورت) تابش به (از) آن اجسام و شار گرمایی ناشی از دمای اجسام است (Parra et al., 2015). بنابراین برای بررسی و ارزیابی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته، سه پارامتر دما سطح شیشه داخلی، سرعت جریان هوا در حفره و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نما به ساختمان از نتایج شبیه سازی نرم افزار فلونت استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

### روش پژوهش

مطالعات تجربی<sup>۳۱</sup> و دینامیک سیالات محاسباتی دو روش پژوهش برای بررسی مکانیسم های حرارتی و سیالاتی در نماهای دوپوسته است. مطالعات تجربی اولین و معتبرترین منبع اطلاعات است لیکن عدم انعطاف پذیری در مقایسه با مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی از معایب آن است. از طرف دیگر مطالعات تجربی به دلیل آنکه تنها راه کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل های عددی است بسیار مهم می باشند. مطالعات مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی که با استفاده از مطالعات تجربی اعتبار سنجی شده باشد، بهترین رویکرد برای ارائه درک کامل از رابطه علت و معلولی بین متغیر های مختلف در نمای دوپوسته را ارائه می دهد (Jankovic & Goia, 2021). در شبیه سازی با دینامیک سیالات محاسباتی، یک سیستم نمای دوپوسته به تعدادی سلول تقسیم می شود که برای هر سلول بایستی حداقل سه معادله بقا

و تکانه محاسبه می شود. شناوری حرارتی، مکانیزم اصلی جریان هوا در درون فضای نمای دو پوسته است. معادله ۱ نشان دهنده مدل آشفتگی k-ε RNG و معادله ۲ نشان دهنده مدل تابشی DO است (Tao et al., 2021).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ a_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

معادله ۱

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega'$$

معادله ۲

که در آن  $\rho$  چگالی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $t$  زمان بر حسب ثانیه،  $S$  شار گرمایی بر حسب وات بر مترمربع،  $k$  انرژی جنبشی متلاطم بر حسب ژول،  $\epsilon$  نرخ اتلاف آشفتگی،  $\alpha$  ضریب جذب و  $n$  ضریب شکست است (Tao et al., 2021).

### صحت‌سنجی

برای شبیه‌سازی عملکرد نمای دوپوسته جعبه‌ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت، مش بندی به صورت خطی<sup>۴۱</sup> از نوع مثلث بندی<sup>۴۲</sup> با الگوریتم تطابق تکه<sup>۴۳</sup> انجام شد. هندسه مدل به صورت سه بعدی (3D) مدل شد، ابعاد مش بندی، ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد و کنترل ابعاد و نوع مش بندی بر اساس کنترل نتایج پارامتر  $Y^+$ <sup>۴۴</sup> در نزدیکی دیواره‌ها به مقدار نزدیک به عدد ۱ (Tao et al., 2021; Tao et al., 2021) انجام شد. چگالی هوا به صورت تابعی از دما، مدل آشفتگی k-ε RNG، مدل تابشی DO، طرح متغیرها به صورت First-order scheme، الگوریتم به صورت Simple و متغیر فشار بر اساس Body-force weighted در نرم افزار فلونت تنظیم گردید (Pasut & De Carli, 2012). برای صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی در نرم افزار فلونت، نتایج ثبت شده آزمایشگاهی (Mei et al., 2007) که بر روی یک نمونه نمای دوپوسته جعبه‌ای با تهویه طبیعی (شکل ۲) انجام شده با نتایج شبیه‌سازی همین نمونه در نرم افزار فلونت مقایسه شد. در مقالات تائو و همکاران (Tao et al., 2021)، کیم (Kim, 2020) و ایی و همکاران (Iyi et al., 2014) از نتایج ثبت شده آزمایشگاهی (Mei et al., 2007) برای صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی نمای دوپوسته تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت استفاده شده است.

در جدول ۱، مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی می و همکاران و نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار فلونت ارائه شد. رده «الف» نشان دهنده

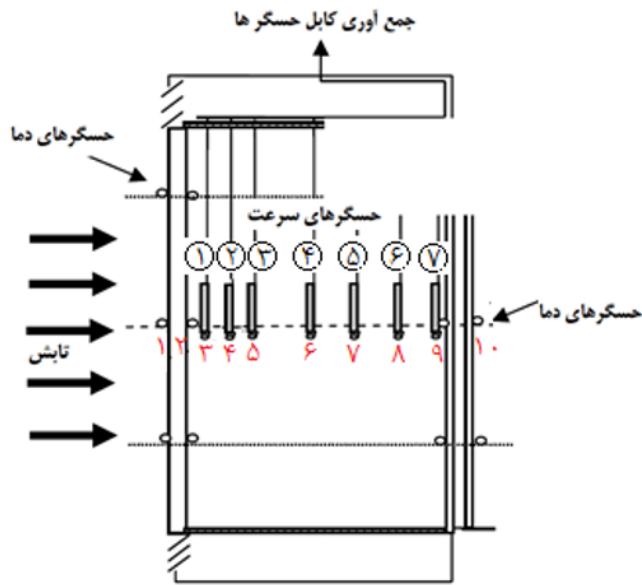
جرم، مومنتوم و انرژی برقرار شود. معادلات دیفرانسیل جزئی نشان دهنده این اصول بقا (معادلات ناویر استوکس<sup>۴۵</sup>) را می‌توان با استفاده از روش‌های المان محدود<sup>۴۶</sup> حل کرد (Hensen & Lamberts, 2012). در روش دینامیک سیالات محاسباتی، تعدادی از محققان کد<sup>۴۴</sup> یا نرم افزار<sup>۴۵</sup> خود را برای تجزیه و تحلیل حرارتی و جریان هوا در نمای دوپوسته استفاده کرده‌اند (Tkachenko et al., 2019). اما اکثر محققان در مطالعات خود از بسته‌های نرم افزاری تجاری دینامیک سیالات محاسباتی مانند انسیس فلونت<sup>۴۶</sup>، تاس<sup>۴۷</sup>، کام سول<sup>۴۸</sup> و فونیکس<sup>۴۹</sup> استفاده کرده‌اند. همانطور که پیش از این اشاره شد، در بین مدل‌های آشفتگی برای حل معادلات ناویر استوکس با رینولدز متوسط، دو معادله k-ε و k-ε RNG بیشترین کاربرد با سطح دقت خوبی در نتایج و زمان محاسبات کمتر را نسبت به سایر معادلات برای نمای دوپوسته با تهویه طبیعی دارد (Choi et al., 2019). برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و دینامیک سیالات محاسباتی، اعتبار‌سنجی با استفاده از نتایج روش‌های تجربی (آزمایشگاهی) حائز اهمیت است، ضمن آنکه تعداد کمی از مطالعات تجربی در نماهای دوپوسته، هر دو اندازه‌گیری‌های حرارتی و سرعت جریان هوا در حفره را گزارش کرده‌اند (Jankovic & Goia, 2021).

نقطه قوت اصلی در روش دینامیک سیالات محاسباتی، توانایی آن در شبیه‌سازی دقیق سرعت، دما و میدان فشار است که می‌توان اطلاعات دقیقی در مورد عملکرد حرارتی و تبادلات انرژی در نمای دوپوسته استخراج نمود، هر چند زمان زیادی برای انجام محاسبات صرف شود. تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی در نماهای دوپوسته معمولاً برای فرایند بهینه‌سازی یا حل مسائل طراحی مانند یافتن عمق حفره میانی مطلوب، انتخاب سیستم و محل سایه‌بان، نوع پوشش‌ها، مسیر جریان هوا و جریان هوا در اطراف پره‌های سایه‌بان استفاده می‌شود (Jankovic & Goia, 2021).

روش پژوهش بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای جهت بررسی سوابق و پیشینه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی است. در بخش مطالعات کتابخانه‌ای به بررسی برخی از پژوهش‌های مرتبط با موضوع پژوهش پرداخته و در ادامه با انجام شبیه‌سازی نمای دوپوسته با نرم افزار Ansys Fluent-Ver 2019 R2 و بررسی نتایج سرعت جریان هوا، دما و انرژی گرمایی عبوری<sup>۴۰</sup> از سطوح شفاف، عملکرد حرارتی نمای دو پوسته تیپ جعبه‌ای ارزیابی شد.

### معادلات حاکم

در نرم افزار فلونت، جریان هوا با استفاده از معادلات پایستگی جرم



شکل ۲. مقطع نمای دو پوسته آزمایشگاهی می و همکاران و محل تعبیه حسگرهای حرارتی و سرعت سنج (Mei et al., 2007)  
Figure 2. Cross-sectional view of double skin facade of May et al. test and the location of thermal and velocity sensors (Mei et al., 2007)

جدول ۱: مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلونت برای مدل سه بعدی با اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان متنوع و اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران - بخش بالایی جدول بالا: مقایسه مقایسه سرعت در حفره میانی و بخش پایین جدول: دما  
Table 1. Comparison between simulation results with Fluent software for 3D model with 8 mm mesh size and various canopy angles and laboratory measurements of May et al., Top table: Comparison of velocity comparison in the cavity and bottom table: Temperature

شماره حسگر سرعت		۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
سایه بان با زاویه ۰ درجه	الف	الف	ب	ب	ب	الف	الف	الف	الف	
سایه بان با زاویه ۳۰ درجه	ب	الف	ب	ب	ب	ب	الف	ب	ب	
سایه بان با زاویه ۴۵ درجه	الف	الف	ب	ب	ب	ب	الف	الف	الف	
سایه بان با زاویه ۶۰ درجه	ب	ب	ب	ب	ب	ج	ب	ب	ب	
سایه بان با زاویه ۹۰ درجه	الف	الف	ب	ب	ب	ب	الف	الف	الف	
شماره حسگر دما	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
سایه بان با زاویه ۰ درجه	الف	ب	ب	ب	ج	ب	ب	ب	ب	الف
سایه بان با زاویه ۳۰ درجه	الف	ب	ب	ج	ب	ب	ب	ب	ب	الف
سایه بان با زاویه ۴۵ درجه	الف	ب	ب	ب	ب	ب	ب	ب	ب	الف
سایه بان با زاویه ۶۰ درجه	الف	ب	ب	ج	ب	ب	ب	ب	ب	الف
سایه بان با زاویه ۹۰ درجه	الف	ب	ب	ب	ب	ب	ب	ب	ب	الف

۱- پوسته خارجی و داخلی نمای دو پوسته، شیشه شفاف تک جداره به ضخامت ۱۲ میلیمتر با طول ۲۰۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵۰ سانتیمتر و در داخل قاب آلومینیومی است.

۲- سایه بان کرکره ای با طول ۲۰۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۱۰ سانتیمتر بوده و هر ردیف کرکره سایه بان به عرض ۸ سانتیمتر، ضخامت ۱ سانتیمتر و از جنس آلومینیوم و رنگ روشن است. محل قرار گیری سایه بان در یک سوم سمت خارجی نمای دو پوسته به سمت لایه خارجی نما و از جنس آلومینیومی است.

۳- دمای اولیه هوای داخل نمای دو پوسته، سایه بان ها و شیشه داخلی و خارجی، معادل  $38/10$  درجه سانتیگراد، شدت تابش مستقیم خورشید ۸۵۵ وات بر متر مربع و تابش انعکاسی بر سطوح عمودی، ۱۴۶ وات بر متر مربع و با زاویه تابشی متوسط  $59/10$  درجه نسبت به خط افق به سطح شیشه خارجی نمای دو پوسته به عنوان ورودی در نرم افزار فلوئنت اعمال شده است. از اثر وزش باد در شبیه سازی نمای دوپوسته صرف نظر گردید.

۴- شبیه سازی نمای دو پوسته برای عمق حفره میانی به مقدار ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح مقطع درجه های ورودی و خروجی ۰،۲، ۰،۴، ۰،۸ متر مربع انجام گردید. بدین ترتیب تاثیر متغیر های مستقل عمق حفره میانی و سطح مقطع درجه ها و تاثیر متقابل این دو متغیر بر متغیر های وابسته سرعت جریان هوا، دما و شار گرمایی عبوری از جداره های شیشه ای نمای دو پوسته قابل بررسی گردید.

۵- برای بررسی عملکرد نماهای دوپوسته با سایه بان و بررسی سرعت جریان تهویه، دما و انرژی گرمایی جداره های شیشه ای نمای دو پوسته، نمای دو پوسته با سایه بان با زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در یک سوم نزدیک به جداره خارجی نما و حالت بدون سایه بان، بررسی گردید.

۶- برای بررسی تاثیر مشخصه های حرارتی و اپتیکی سطوح شفاف نمای دوپوسته بر عملکرد حرارتی آن، شبیه سازی ها برای دو حالت ۱- شیشه داخلی و خارجی از نوع معمولی، ۲- شیشه داخلی از نوع معمولی و سطح داخلی شیشه خارجی از نوع کم گسیل انجام گردید. در جدول ۲ مشخصات مصالح به کار رفته در شبیه سازی های نمای دو پوسته و در شکل ۳، نمونه خروجی توزیع دما در نمای دوپوسته از نرم افزار فلوئنت (۳-ج) و نمونه خروجی توزیع سرعت جریان هوا در نمای دوپوسته از نرم افزار فلوئنت (۳-د) ارائه شده است.

### نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج حاصل از شبیه سازی های که با تغییر در متغیر های مستقل (عمق حفره میانی، سطح مقطع درجه ها، زاویه

اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی زیر ۱۰٪، رده «ب» نشان دهنده اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ و رده «ج» نشان دهنده اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ است.

### شبیه سازی

در ادامه روند شبیه سازی ارائه می شود.

### اقلیم مورد مطالعه

اقلیم مورد مطالعه در این پژوهش، اقلیم گرم و خشک و شهر تهران به عنوان نماینده این اقلیم انتخاب شد. شهر تهران به عنوان پایتخت ایران و سومین شهر پرجمعیت خاورمیانه که بیشترین تمرکز را در وجود ساختمان های اداری بلند مرتبه در کشور دارا است و نمونه هایی از اجرای نمای دوپوسته در آن وجود دارد، به عنوان شهر مورد مطالعه در این پژوهش برای اقلیم گرم و خشک (نیمه بیابانی خشک و سرد) انتخاب شد. مطابق طبقه بندی کوپن گیگر، اقلیم تهران Bsk و بر اساس دمای حداقل ۱۸ و حداکثر ۲۵ درجه سانتیگراد، دارای ۲۲۲۳ درجه روز گرمایشی و ۴۶۳ درجه روز سرمایشی مطابق اندازه گیری های ایستگاه سینوپتیک مهر آباد است (Tahsildoost, 2018 & Zomorodian). مطابق آمار ۱۰ ساله اخیر هواشناسی ایستگاه مهر آباد در گرم ترین روز سال (روز اول مرداد ماه)، بین ساعت ۱۱ تا ۱۵ که بیشترین تابش به نمای جنوبی صورت می گیرد، دما معادل  $38/10$  درجه سانتیگراد، شدت تابش مستقیم خورشید، بین ساعات مذکور ۸۵۵ وات بر متر مربع و تابش انعکاسی بر سطوح عمودی، ۱۴۶ وات بر متر مربع و با زاویه تابش  $59/10$  درجه نسبت به خط افقی بر سطوح عمودی تابیده می شود. با توجه به اینکه شبیه سازی برای ظهر گرم ترین روز سال در شهر تهران انجام شد و بر اساس داده های هواشناسی ایستگاه مهرآباد در اواخر تیر و اوایل مرداد وزش باد قابل ملاحظه ای به نمای جنوبی ساختمان وجود ندارد، لذا از اثرات وزش باد در شبیه سازی نمای دوپوسته صرف نظر گردید.

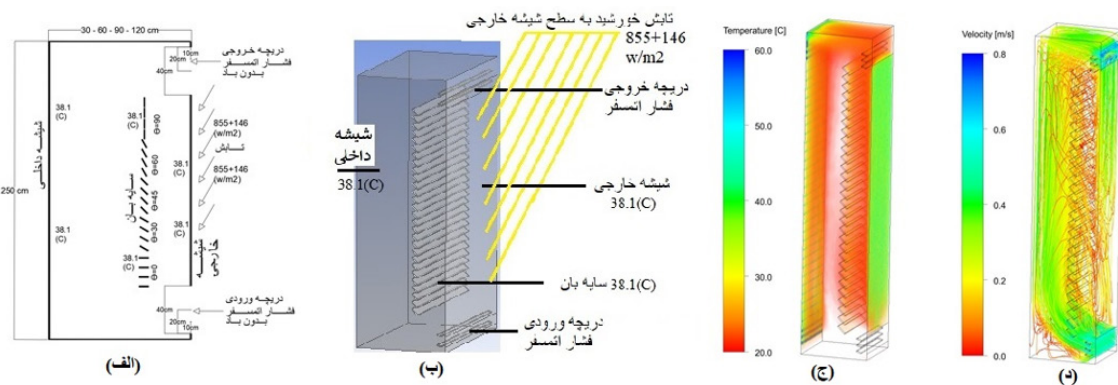
### توصیف مدل و شرایط مرزی

در این پژوهش ۱۴۴ سناریوی شبیه سازی با تغییر پارامترهای مستقل موثر در عملکرد نمای دوپوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط مرزی شامل مشخصات تابشی و حرارتی اعمال شده به نمای دو پوسته تیپ جعبه ای و ابعاد هندسی و جنس مصالح نمای دو پوسته در دو قسمت پارامترهای ثابت و پارامترهای متغیر در شبیه سازی به شرح زیر است (شکل ۳-الف و ۳-ب):



جدول ۲. مشخصات مصالح  
Table 2. Material specifications

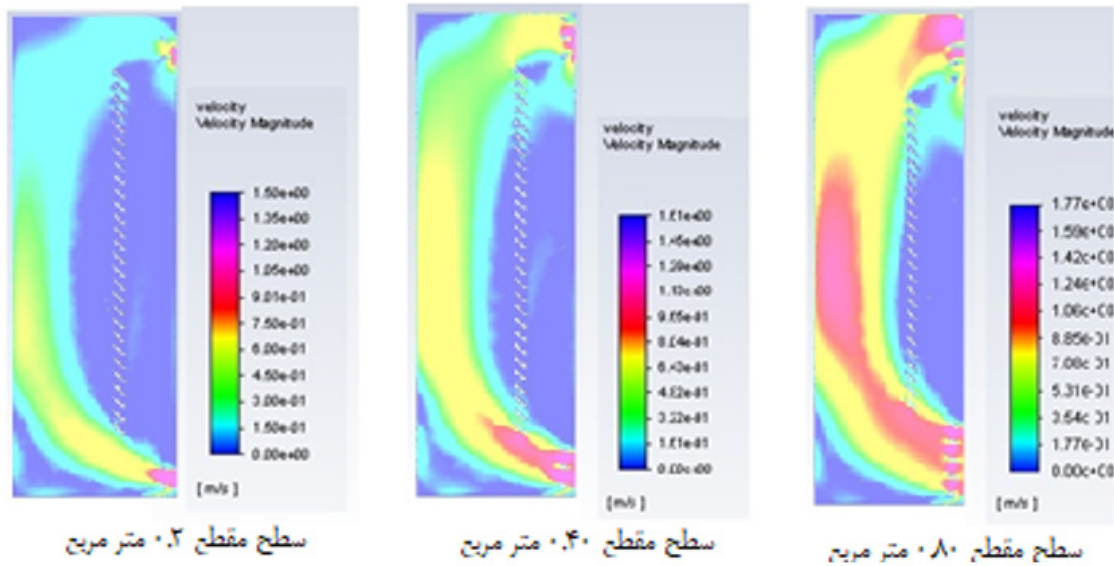
مشخصات مصالح	شیشه معمولی	شیشه کم گسیل	سایه بان آلومینیومی
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۷۱۹
گرمای ویژه <sup>۲۰</sup> (J/kg.k)	۸۴۰	۸۴۰	۸۷۱
رسانایی گرمایی <sup>۲۱</sup> (w/m.k)	۱/۷	۱/۷	۲۰۲/۴
ضریب جذب <sup>۲۲</sup> (m/1)	۳۰	۳۰	-
ضریب شکست <sup>۲۳</sup>	۱/۵	۱/۵	۱/۴۴
ضریب گسیل <sup>۲۴</sup>	۰/۸۴	۰/۲۴	۰/۷
ضریب گذر خورشیدی <sup>۲۵</sup>	۰/۸۴	۰/۴۲	-
ضریب انعکاس خورشیدی <sup>۲۶</sup>	۰/۰۷۵	۰/۲۵	-
ضریب جذب خورشیدی <sup>۲۷</sup>	۰/۰۸۵	۰/۳۳	-



شکل ۳. محدوده شبیه سازی و شرایط مرزی به صورت دوبعدی (الف) و سه بعدی (ب)، نمونه خروجی توزیع دما در نمای دوپوسته به صورت سه بعدی از نرم افزار فلونت (ج) و نمونه خروجی توزیع سرعت جریان هوا در نمای دوپوسته به صورت سه بعدی از نرم افزار فلونت (د)  
Figure 3. Simulation range and boundary conditions in 2D (a) and 3D (b), sample of temperature distribution output in 2D view from Fluent software (c) and sample output of air flow velocity distribution in DSF from Fluent software (d)

می یابد. تغییر عرض حفره میانی، باعث تغییر دمای سطح شیشه داخلی تا حداکثر ۰.۸۰ درجه سانتیگراد (تا ۲٪) می شود. با افزایش عمق حفره میانی در حالت با سایه بان، شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی در غالب موارد کاهش می یابد. تغییر عرض حفره میانی، باعث تغییر شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی (برای زوایای مختلف سایه بان) تا حداکثر ۲.۸۰ وات بر متر مربع (تا ۶.۵٪) می شود. سطح مقطع دریچه ها: با ثابت ماندن سایر متغیرهای مستقل موثر و با افزایش سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی، سرعت جریان هوا ناشی از تهویه طبیعی در حفره میانی افزایش می یابد (شکل ۴).

سایه بان، جنس سایه بان و جنس شیشه) انجام شده اند با یکدیگر مقایسه می شوند. نتایج حاصل (متغیرهای وابسته) شامل دمای سطح شیشه داخلی، سرعت جریان هوا و شار عبوری گرمایی (مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در واحد زمان و بر واحد سطح) از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته تیپ جعبه ای می باشد. -عمق حفره میانی: با ثابت ماندن سایر متغیرهای مستقل موثر و با افزایش عمق حفره میانی در مقادیر ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر، سرعت جریان هوا ناشی از تهویه طبیعی در حفره میانی کاهش می یابد. با افزایش عمق، دمای سطح شیشه داخلی در غالب موارد کاهش



شکل ۴. جریان هوا در حفره میانی به عمق ۹۰ سانتیمتر، زاویه سایه بان ۴۵ درجه و شیشه معمولی برای سه حالت مقطع دریچه ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۸ متر مربع  
 Figure 4. Airflow in the cavity to a depth of 90 cm, canopy angle of 45 degrees and ordinary glass for three cross sections 0.2, 0.4 and 0.8 m<sup>2</sup>

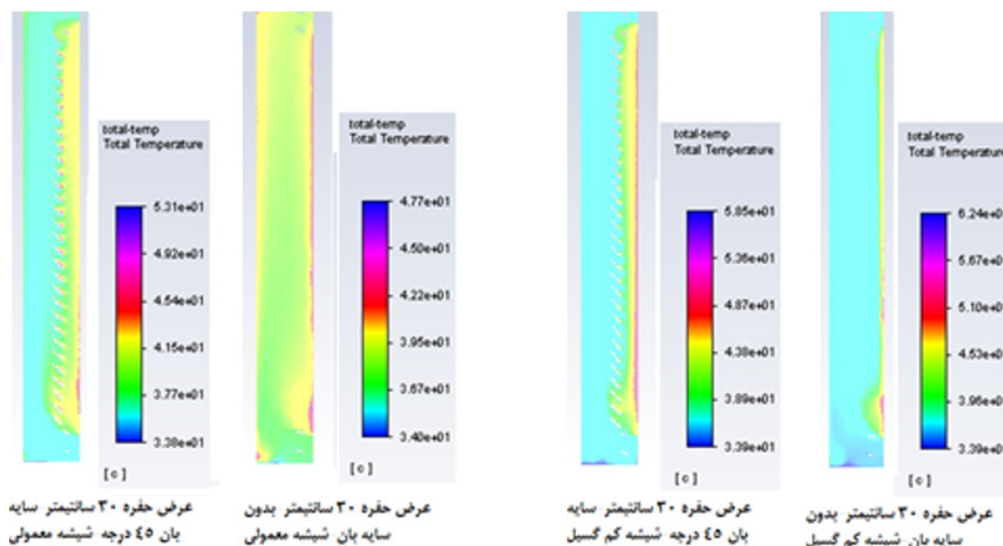
تا ۹۰ درجه در ۵ حالت مورد بررسی قرار گرفت. تغییر زاویه سایه بان از صفر تا ۶۰ درجه تغییر محسوسی در نتایج مربوط به دما و انرژی گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی ایجاد نمی کند. در زاویه ۹۰ درجه به سبب اینکه سایه بان به طور کامل بسته است، تهویه مناسبی بین سطح شیشه داخلی و سایه بان رخ نمی دهد (مخصوصاً برای عرض حفره ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر) که باعث افزایش دما و انرژی عبوری از سطح شیشه داخلی نسبت به سایر زوایای سایه بان می شود. دمای سطح شیشه داخلی نسبت به تغییر زاویه سایه بان حساسیت کمی دارد و منجر به تغییراتی در حدود ۱.۵٪ در دما می گردد لیکن شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نسبت به تغییر زاویه سایه بان حساسیت بیشتری مخصوصاً برای زاویه ۹۰ درجه نسبت به بقیه زوایا دارد و تغییراتی تا ۱۱.۹٪ در شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی را منجر می شود.

-جنس شیشه خارجی: در شکل ۵ تغییرات دما در حفره میانی نمای دو پوسته برای سطح مقطع دریچه به مقدار ۰.۲ متر مربع، با سایه بان زاویه ۴۵ درجه نشان داده شده است. میزان حساسیت تغییر جنس شیشه خارجی نما در کاهش دمای سطح شیشه داخلی نما دو پوسته، تا ۲.۲۴٪ در حالت بدون سایه بان و ۱.۰۲٪ در حالت استفاده از سایه بان ۴۵ درجه می باشد. میزان حساسیت این تغییر بر کاهش

دمای سطح شیشه داخلی تغییرات نامنظم دارد لیکن در بیشتر موارد کاهش و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی در غالب موارد افزایش می یابد. تغییر سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی، باعث افزایش متوسط شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی (برای زوایای مختلف سایه بان) تا حداکثر ۱۶.۳٪ می شود.

وجود یا عدم وجود سایه بان: در حالت بدون سایه بان دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته ۳۹.۳ تا ۴۱.۰ درجه سانتیگراد و در حالت با سایه بان ۴۵ درجه دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته بین ۳۸.۶۵ تا ۳۹.۵ درجه سانتیگراد تغییر می کند. وجود و عدم وجود سایه بان در دمای سطح شیشه داخلی موثر است و می تواند منجر به تغییرات تا ۳.۷٪ گردد. ضمناً در حالت بدون سایه بان شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته ۷۸.۰ تا ۱۲۰.۰ وات بر متر مربع و در حالت با سایه بان ۴۵ درجه شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته بین ۴۳.۰ تا ۴۸.۲ وات بر متر مربع تغییر می کند. عدم وجود سایه بان منجر به افزایش شار عبوری گرمایی از سطح شیشه داخلی می گردد. وجود سایه بان می تواند منجر به کاهش شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی به میزان تا ۶۱.۰٪ گردد.

-زاویه سایه بان: در شبیه سازی های انجام شده زاویه سایه بان بین ۰



شکل ۵. توزیع دما در حفره میانی نمای دو پوسته برای سطح مقطع دریچه ۰.۲۰ متر مربع، عمق حفره ۳۰ سانتیمتر و شیشه خارجی معمولی و کم گسیل  
Figure 5. Temperature distribution in the cavity of the DSF for the cross-sectional area of 0.20 square meters, the depth of the cavity is 30 cm and ordinary and low-emission outer glass

جدول ۳. درصد تغییر متغیرهای سرعت جریان هوا، دما و شار گرمایی عبوری از شیشه داخلی نما (متغیرهای وابسته) با تغییر متغیرهای مستقل  
Table 3. Percentage change of airflow velocity, temperature and heat flux variables passing through the interior glass (dependent variables) by changing the independent variables

ردیف	متغیر مستقل	درصد تغییرات سرعت جریان هوا در حفره میانی	درصد تغییرات دمای سطح شیشه داخلی	درصد تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی
۱	تغییر عرض حفره میانی بدون سایه بان	کاهش تا ۴۴٪	کاهش تا ۳٫۴٪	کاهش تا ۳۲٫۸٪
۲	تغییر عرض حفره میانی با سایه بان	کاهش تا ۵۳٪	کاهش تا ۲٪	کاهش تا ۶٫۵٪
۳	استفاده یا عدم استفاده از سایه بان	افزایش تا ۲۴٪	کاهش تا ۳٫۷٪	کاهش تا ۶۱٪
۴	زاویه سایه بان از ۰ به ۹۰ درجه	کاهش تا ۱۸٪	کاهش تا ۱٫۵٪	کاهش تا ۱۱٫۹٪
۵	افزایش سطح مقطع دریچه های تهویه	افزایش تا ۱۱۵٪	تغییرات نامنظم کاهشی	افزایش تا ۱۶٫۳٪
۶	تغییر جنس شیشه خارجی از معمولی به کم گسیل (بدون سایه بان)	کاهش تا ۱۱٪	کاهش تا ۲٫۲۴٪	کاهش ۱۹٫۴۴٪ تا ۲۹٫۷۸٪
۷	تغییر جنس شیشه خارجی از معمولی به کم گسیل (با سایه بان)	کاهش تا ۱۴٪	کاهش تا ۱٫۰۲٪	کاهش ۱۷٫۷۱٪ تا ۲۴٫۴۴٪

شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی بسیار قابل توجه است. در حالت بدون سایه بان میزان کاهش شار عبوری گرمایی از سطح شیشه داخلی ۱۹٫۴۴٪ تا ۲۹٫۷۸٪ و در حالت با سایه بان ۴۵ درجه از ۱۷٫۷۱٪ تا ۲۴٫۴۴٪ است. با تغییر جنس شیشه خارجی نمای دو پوسته از معمولی به کم گسیل (شکل ۵)، توزیع دما در مقطع نمای دو پوسته متعادل و یکنواخت تر می شود و درصد بیشتری از انرژی گرمایی تابشی خورشید به وسیله شیشه کم گسیل جذب و یا به بیرون منعکس می گردد و درصد کمتری از انرژی گرمایی از شیشه خارجی

که کاهش آنها منجر به بهبود عملکرد حرارتی نمای دوپوسته در فصل تابستان می شود. دما در سطح شیشه داخلی نما نسبت به دمای حدود ۳۸ درجه سانتیگراد هوا در ظهر گرم ترین روز تابستان تهران، حداکثر ۳ درجه در حالت نمای دو پوسته بدون سایه بان و حداقل ۰.۶۵ درجه سانتیگراد در حالت استفاده از سایه بان با زاویه ۴۵ درجه بیشتر است. با تغییر متغیرهای مستقل بررسی شده، دمای سطح شیشه داخلی، حداکثر ۳.۷٪ تغییر می کند. متغیرهای استفاده یا عدم استفاده از سایه بان، عرض حفره میانی و جنس شیشه خارجی نمای دوپوسته به ترتیب بیشترین تاثیر را در دمای سطح شیشه داخلی نمای دوپوسته را دارند. با توجه به اهمیت دما، شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی و سرعت جریان هوا در حفره میانی، در جدول ۴، نتایج دما و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی مربوط به ۴۰ شبیه سازی از ۱۴۴ شبیه سازی انجام شده نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی،

نما به فضای داخل حفره میانی نمای دو پوسته وارد می شود. با توجه به اینکه جریان تهویه هوا متمایل به سمت شیشه خارجی نما است لذا انتقال همرفتی گرما به داخل محدوده نمای دو پوسته شکل نمی گیرد و بنابراین اگرچه دمای سطح شیشه کم گسیل خارجی نسبت به شیشه معمولی بالاتر می رود اما این افزایش دما به محدوده فضای داخلی نمای دو پوسته و شیشه داخلی نما تسری پیدا نمی کند. -آنالیز حساسیت: در روند آنالیز حساسیت، با تغییر یک متغیر مستقل، میزان تاثیرات این تغییر بر روی متغیرهای وابسته بررسی می گردد. اگر میزان تغییرات در متغیر وابسته زیاد باشد به معنای حساسیت متغیرهای وابسته به متغیر مستقل تغییر یافته است. در جدول ۳، میزان حساسیت (میزان تاثیر) تغییر متغیرهای مستقل مورد بررسی ارائه شده است. دما و شار عبوری گرمایی از سطح شیشه داخلی نمای دوپوسته به داخل ساختمان، مهمترین پارامترهای ورود گرما هستند

جدول ۴. دما، شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی و سرعت جریان هوا برای نمای دوپوسته  
Table 4. Temperature, heat flux passing through the inner glass surface and air flow velocity for a DSF

عمق حفره میانی (cm)	سطح مقطع دریاچه (m <sup>2</sup> )	سرعت جریان هوا (C) دما		سرعت جریان هوا (C) دما		سرعت جریان هوا (C) دما		سرعت جریان هوا (C) دما		ردیف				
		شار گرمایی (w/m <sup>2</sup> )	سرعت (m/s)	شار گرمایی (w/m <sup>2</sup> )	سرعت (m/s)	شار گرمایی (w/m <sup>2</sup> )	سرعت (m/s)	شار گرمایی (w/m <sup>2</sup> )	سرعت (m/s)					
		سایه بان با زاویه ۴۵ درجه				بدون سایه بان								
		شیشه خارجی معمولی				شیشه خارجی معمولی کم گسیل								
۱	۳۰	۰.۲۰	۴۰.۲۵	۸۵.۵	۰.۳۹	۴۱	۱۱۶	۰.۳۸	۳۸.۹۵	۳۳	۰.۶۲	۳۹.۱	۴۳	۰.۶۰
۲	۳۰	۰.۴۰	۴۰	۹۰	۰.۶۳	۴۰.۵	۱۲۰	۰.۶۳	۳۸.۷	۳۷.۶	۰.۸۷	۳۸.۸۵	۴۶.۸	۰.۹۲
۳	۶۰	۰.۲۰	۴۰.۴	۸۰.۵	۰.۳۱	۴۰.۷۵	۱۱۲	۰.۳۹	۳۹.۳	۳۵.۳۹	۰.۲۹	۳۹.۵	۴۴.۳	۰.۳۱
۴	۶۰	۰.۴۰	۳۹.۳	۸۴	۰.۴۸	۴۰.۲	۱۱۵	۰.۵۹	۳۸.۷۵	۳۸.۱	۰.۴۵	۳۸.۹	۴۶.۳	۰.۵۵
۵	۶۰	۰.۲۰	۳۹.۷۵	۵۶.۵	۰.۳۳	۴۰.۳	۷۸	۰.۳۳	۳۹.۱۵	۳۶.۱	۰.۳۰	۳۹.۳	۴۵.۸	۰.۳۲
۶	۹۰	۰.۴۰	۳۹.۴	۶۳	۰.۴۷	۳۹.۷	۸۰.۵	۰.۵۰	۳۸.۷۵	۳۶.۷	۰.۴۸	۳۸.۹	۴۶.۲	۰.۴۰
۷	۹۰	۰.۸۰	۳۹.۲۵	۷۲.۵	۰.۸۱	۳۹.۵	۹۰	۰.۷۰	۳۸.۵	۳۷.۵	۰.۸۴	۳۸.۶۵	۴۷.۴	۰.۷۴
۸	۱۲۰	۰.۲۰	۳۹.۱۵	۵۵.۴	۰.۲۷	۳۹.۶	۷۸.۹	۰.۳۰	۳۸.۸	۳۲.۶	۰.۲۶	۳۹.۲	۴۲.۷	۰.۳۰
۹	۱۲۰	۰.۴۰	۴۰.۸	۶۲	۰.۳۹	۳۹.۵	۸۱.۷	۰.۳۰	۳۸.۹	۳۴	۰.۳۹	۳۸.۸	۴۵	۰.۳۹
۱۰	۱۲۰	۰.۸۰	۳۹.۱	۷۱.۵	۰.۷۱	۳۹.۳	۹۰	۰.۷۰	۳۸.۶۵	۳۸.۲	۰.۶۸	۳۸.۸	۴۸.۲	۰.۵۷

موثر است. در این مقاله ابتدا با استفاده از نرم افزار فلونت و سپس با انجام آنالیز حساسیت میزان تأثیر تغییر در ویژگی های ساختاری (متغیرهای مستقل) بر عملکرد حرارتی (متغیرهای وابسته) نمای دوپوسته بررسی شد. ۱۴۴ سناریوی شبیه سازی با تغییر عمق حفره میانی به مقدار ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰.۲، ۰.۴، ۰.۸ و ۰.۸ متر مربع و سایه بان با زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در یک سوم نزدیک به جداره خارجی نما و حالت بدون سایه بان و جنس شیشه خارجی از نوع معمولی و کم گسیل بررسی شد. متغیرهای استفاده یا عدم استفاده از سایه بان، عرض حفره میانی و جنس شیشه خارجی نمای دوپوسته به ترتیب بیشترین تأثیر را در دمای سطح شیشه داخلی نمای دوپوسته را دارند. تغییر متغیرهای مستقل استفاده یا عدم استفاده از سایه بان، عرض حفره میانی، جنس شیشه خارجی و سطح مقطع دریچه های نمای دوپوسته، به ترتیب بیشترین تأثیر را در متغیر شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته می گذارد. متغیرهای مستقل سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی، تغییرات در عمق حفره میانی و وجود یا عدم وجود سایه بان به ترتیب بیشترین را بر سرعت جریان هوا در حفره میانی دارند.

## پی‌نوشت‌ها

1. Double skin façade
2. Cavity
3. Box Window
4. Corridor
5. Shaft-Box
6. Multi-Storey
7. Naturally
8. Hybrid
9. Outdoor air curtain
10. Indoor air curtain
11. Supply air
12. Exhaust air
13. Thermal buffer
14. Mass
15. Momentum
16. Heat energy
17. Aerodynamic

برای سطح مقطع دریچه ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۸ متر مربع، در حالات با و بدون سایه بان، جنس های مختلف شیشه خارجی و عمق های متغیر حفره میانی ارائه شد.

شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته جعبه ای بین ۳۲.۲ تا ۱۲۰ وات بر مترمربع تغییر می کند. تغییر متغیرهای مستقل استفاده یا عدم استفاده از سایه بان، عرض حفره میانی، جنس شیشه خارجی و سطح مقطع دریچه های نمای دو پوسته، به ترتیب بیشترین تأثیر را در متغیر شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته می گذارد. در مورد پارامتر سرعت جریان هوا پیچیدگی های بیشتری وجود دارد. متغیرهای مستقل سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی، تغییرات در عمق حفره میانی و وجود یا عدم وجود سایه بان به ترتیب بیشترین را بر سرعت جریان هوا در حفره میانی دارند. هرچند به طور بدیهی به نظر می رسد افزایش سرعت جریان (افزایش دبی جرمی) هوای عبوری از حفره میانی در فصل تابستان، که پدیده برافروختگی بروز می کند، می تواند باعث تخلیه گرما از داخل حفره و عملکرد بهتر نمای دوپوسته شود، اما نتایج جدول ۳ و ۴ نشان می دهد افزایش سرعت جریان هوا در حفره میانی به تنهایی تضمین کننده عملکرد حرارتی بهتر نمای دوپوسته با تهویه طبیعی در فصل تابستان در اقلیم گرم نیست. سطوح داخل نمای دوپوسته از جمله سطح سایه بان و سطح داخلی شیشه خارجی نمای دوپوسته، با دریافت تابش مستقیم از خورشید گرم می شوند و اگر جریان هوای شکل گرفته در حفره میانی به سمت شیشه داخلی نما متمایل شود و یا جریان هوا به درستی تخلیه گرمای تولید شده در حفره میانی را به سمت دریچه خروجی هوا انجام ندهد، عملکرد حرارتی نمای دوپوسته مناسب نخواهد بود.

## نتیجه گیری

عملکرد نمای دو پوسته با تهویه طبیعی مبتنی بر رفتار حرارتی و جریان هوا در حفره میانی می باشد. ویژگی های ساختاری نمای دوپوسته با تهویه طبیعی که بر رفتار حرارتی و دینامیک سیالاتی آن موثر هستند (متغیرهای مستقل) شامل، ویژگی های هندسی (ابعاد حفره میانی، مسیر جریان هوا، سطح بازشوها، موقعیت سایه بان) و ویژگی های مصالح (ویژگی های گرمایی سطوح شفاف و سایه بان) می باشد. متغیرهای وابسته که عملکرد حرارتی نمای دوپوسته بر اساس آنها قابل سنجش می باشد شامل دما و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی و سرعت جریان تهویه در حفره میانی نما می باشد. دینامیک سیالات محاسباتی جهت ارتقای عملکرد حرارتی این نماها

- Energy Sources, Part B: Economics. *Planning, and Policy*. 16 (5), 387-405.
3. Barbosa, S., & Ip, K. (2014). Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1019–1029.
4. Cherif, Y., Sassine, E., Lassue, S., & Zalewski, L. (2020). Experimental and numerical natural convection in an asymmetrically heated double vertical façade. *International Journal of Thermal Sciences*, 152, 106288.
5. Cho, K., & Cho, D. (2018). Solar heat gain coefficient analysis of a slim-type double skin window system: using an experimental and a simulation method. *Energies*, 11 (1), 115.
6. Choi, H., An, Y., Kang, K., Yoon, S., & Kim, T. (2019). Cooling energy performance and thermal characteristics of a naturally ventilated slim double-skin window. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114113.
7. Colombo, E., Zwahlen, M., Frey, M., & Loux, J. (2017). Design of a glazed double-façade by means of coupled CFD and building performance simulation. *Energy Procedia*, 122, 355–360.
8. El Ahmar, S., Battista, F., & Fioravanti, A. (2019). Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Façade for hot climates: EnergyPlus vs OpenFOAM. *Building Simulation*, 12 (5), 781–795.
9. Hachem-Vermette, C. (2020). *Selected High-Performance Building Envelopes BT - Solar Buildings and Neighborhoods: Design Considerations for High Energy Performance*. Springer, Cham, 67–100.
10. Hassanli, S., Kwok, K.C.S., & Zhao, M (2018). Performance assessment of a special Double Skin Façade system for wind energy harvesting/ and a case study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 292–304.
11. Hens, Hugo S.L. (2017). *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*.
12. Hensen, J.L.M., & Lamberts, R. (2012). Building
18. Constructional features
19. Naturally ventilated double skin façade
20. Geometric features
21. Material properties
22. Conduction
23. Radiation
24. Convection
25. Radiation heat
26. Computational fluid dynamics
27. Overheating
28. Stack effect
29. Solar heat gain coefficient
30. Heat flux
31. Experimental study
32. Navier-Stokes equations
33. Finite element
34. Code
35. Software
36. Ansys FLUENT
37. Tas Engineering
38. COMSOL
39. Phoenix
40. Transmittance heat energy
41. Linear
42. Tetrahedrons
43. Patch Conforming
- ۴۴- پارامتری برای کنترل و تصدیق جریان سیال به صورت جریان آرام که در اولین شبکه کنار دیواره ها کنترل می شود.

## فهرست مراجع

1. Ahmed, Mostafa M.S., Abel-Rahman, Ali K., Ali, Ahmed Hamza H., & Suzuki, M. (2016). Double skin façade: the state of art on building energy efficiency. *Journal of Clean Energy Technology*, 4 (1), 84–89.
2. Aldawoud, A., Salameh, T., & Kim, Y. K. (2020). Double skin façade: energy performance in the United Arab Emirates.

- Performance Simulation for Design and operation.
13. Hong, X., Leung, M.K.H., & He, W. (2019). Effective use of Venetian blind in Trombe wall for solar space conditioning control. *Applied Energy*, 250, 452–460.
  14. Hou, K., Li, S., & Wang, H. (2020). Simulation and experimental verification of energy saving effect of passive preheating natural ventilation double skin façade. *Energy Exploration & Exploitation*, 39(1), 464-487.
  15. Ikrima Amaireh, A.E.K.M. (2017). *Numerical Investigation into a Double Skin Façade System Integrated with Shading Devices, with Reference to the City of Amman*. University of Nottingham, Jordan.
  16. Iyi, D., Hasan, R., Penlington, R., & Underwood, C. (2014). Double Skin Façade: Modelling Technique and Influence of Venetian Blinds on the Airflow and Heat Transfer. *Applied Thermal Engineering*, 71 (1), 219-229.
  17. Jankovic, A., & Goia, F. (2021). Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behavior. *Building and Environment*, 196, 107796.
  18. Kim, D.D. (2020). Computational fluid dynamics assessment for the thermal performance of double-skin façades in office buildings under hot climatic condition. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(1).
  19. Li, Y., Darkwa, J., Kokogiannakis, G., & Su, W. (2019). Phase change material blind system for double skin façade integration: system development and thermal performance evaluation. *Applied Energy*, 252.
  20. Mei, L., Loveday, D.L., Infield, D.G., Hanby, V., Cook, M., Li, Y., Holmes, M., & Bates, J. (2007). The influence of blinds on temperatures and air flows within ventilated double-skin façades. *Proceedings of clima, WellBeing Indoors*.
  21. Oh, M.H., Lee, K.H., & Yoon, J.H. (2012). Automated control strategies of inside slat-type blind considering visual comfort and building energy performance. *Energy and Buildings*. 55, 728–737.
  22. Parra, J., Guardo, A., Egusquiza, E., & Alavedra, P. (2015). Thermal performance of ventilated double skin façades with Venetian blinds. *Energies*, 8 (6), 4882–4898.
  23. Pasut, W., & Di Carli, M. (2012). Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin façade. *Applied Thermal Engineering*, 37, 267-274.
  24. Pourshab, N., Tehrani, M.D., Toghraie, D., & Rostami, S. (2020). Application of double glazed façades with horizontal and vertical louvers to increase natural air flow in office buildings. *Energy*, 200, 117486.
  25. Sanchez, E., Rolando, A., Sant, R., & Ayuso, L. (2016). Influence of natural ventilation due to buoyancy and heat transfer in the energy efficiency of a double skin façade building. *Energy for Sustainable Development*. 33, 139–148.
  26. Shameri, M.A., Alghoul, M.A., Sopian, K., Zain, M.F.M., & Elayeb, O. (2011). Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (3), 1468–1475.
  27. Sharma, M. K., Preet, S., Mathur, J., Chowdhury, A., & Mathur, S. (2021). Thermal performance analysis of naturally ventilated and perforated sheet based double skin facade system for hot summer conditions. *International Journal of Ventilation*.
  28. Tao, Y., Zhang, H., Zhang, L., Zhang, G., Tu, J., & Shi, L. (2021). Ventilation performance of a naturally ventilated double-skin façade in buildings. *Renewable Energy*, 167, 184-198.
  29. Tao, Y., Fang, X., Setunge, S., Tu, J., Liu, J., & Shi, L. (2021). Naturally ventilated double-skin façade with adjustable louvers. *Solar Energy*, 225, 33–43.
  30. Tao, Y., Fang, X., Chew, M. Y. L., Zhang, L., Tu, J., & Shi, L. (2021). Predicting airflow in naturally ventilated double-skin facades: theoretical analysis and modelling. *Renewable Energy*, 179, 1940-1954.
  31. Tkachenko, S., Timchenko, V., Yeoh, G., & Reizes, J. (2019). Effects of radiation on turbulent natural convection in channel flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 77, 122–133.

32. Zhang, T., & Yang, H. (2019). Flow and heat transfer characteristics of natural convection in vertical air channels of double-skin solar façades. *Applied Energy*, 242, 107–120.

33. Zomorodian, Z.S., & Tahsildoost, M. (2018). Energy and carbon analysis of double skin façades in the hot and dry climate. *Journal of Cleaner Production*, 197, 85-96.



© 2023 by author(s); Published by Science and Research Branch Islamic Azad University, This work for open access publication is under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Sensitivity Analysis of Constructional Specifications on Thermal Performance of Naturally Ventilated Box Window Double Skin Facade in Hot Arid Climate of Iran (Case Study: Tehran City)

*Faryal Sadat Siadati*, Ph.D. Candidate, Department of Art and Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Rima Fayaz* \*, Associate Professor, Department of Architecture and Energy, Faculty of Architecture and Urbanism, University of Art, Tehran, Iran.

*Nilofar Nikghadam*, Associate Professor, Department of Art and Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

The function of the double-skin facade with natural ventilation is based on the thermal performance and airflow of the cavity. Structural features of a naturally ventilated double-skin façade that affect its thermal performance and fluid dynamics include geometric features such as cavity dimensions, airflow path, air inlet, and outlet areas, shading devices material and their location in the cavity, and material properties that are optical and thermal characteristics of transparent skin. In this research, Fluent Software was used to simulate the computational fluid dynamics, and by sensitivity analysis, the effect of changes in structural properties on thermal performance was evaluated. For this aim, 144 simulation scenarios with cavity depths of 30, 60, 90, and 120 cm, inlet and outlet cross-sections of 0.2, 0.4, and 0.8 m<sup>2</sup>, louver shadings with 0, 30, 45, 60, and 90 degree angles located at one third distance close to the exterior wall of the façade, the model without shading, exterior glass with regular and low emission layer were investigated, and the following results were obtained:

- Cavity Depth: It was observed that as the depth increases, the velocity of airflow in the cavity decreases. Changing the width of the hole changes the surface temperature of the inner glass up to a maximum of 0.80 ° C (up to 2%). As the depth of the cavity increases, the heat flux transmitted through the inner glass surface decreases in most cases (up to 6.5%).
- Cross-section: As the cross-section increases, the air velocity in the cavity increases the temperature of the inner glass surface changes irregularly but, in most cases, decreases. In addition, the heat flux passing through the inner glass surface often increases (up to a maximum of 16.3%).
- Shading: In the case without shading, the air velocity in the cavity is 0.30 to 0.70 m/s, and in the case with 45 degrees of shading, the air velocity in the cavity is between 0.30 and 0.92 m/s. In the case without shading, the temperature of the inner glass surface changes from 39.3 to 41.0 ° C, and in the case with 45 degrees, changes are between 38.65 to 39.5 ° C. In the case without shading, the heat flux transmitted through the inner glass surface changes from 78.0 to 120.0 W/m<sup>2</sup>, and in the case with 45 degrees shading, differences between 43.0 to 48.2 W/m<sup>2</sup>. The sensitivity of the heat flux transmitted through the inner glass surface to the presence or absence of shading can lead to a reduction of the heat flux transmittance through the inner glass surface by up to 61.0%.
- Exterior glass type of DSF: In the case without shading, the reduction rate of heat flux from the inner glass surface is 19.44% to 29.78%, and in the case with 45-degree shading is from 17.71% to 24.44%. By changing the exterior glass's material (low emission or regular), the heat flux transmitted through the inner glass surface changes by 32.2 and 120 W/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Natural ventilation, Box window double skin façade, Simulation, Hot and dry climate, Computational Fluid Dynamics, Sensitivity analysis.

\* Corresponding Author Email: [fayaz@art.ac.ir](mailto:fayaz@art.ac.ir)