

مقاله پژوهشی

بهینه سازی عملکرد حرارتی نمای دو پوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی در فصل تابستان در شهر تهران

فریال سادات سیادتی^{۱*}، ریما فیاض^۲، نیلوفر نیکقدم^۳

۱- دانشجو دکتری، معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۲- دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر تهران

۳- استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱)

چکیده

نمای دوپوسته یکی از انواع نماها در ساختمان‌های اداری است که بین طراحان محبوبیت دارد. پارامترهایی از جمله عمق حفره میانی، سطح مقطع درجه‌های تهویه برای نماهای با تهویه طبیعی^۱، جنس، موقعیت و زاویه سایه بان، جنس شیشه جداره‌های شفاف نما بر عملکرد حرارتی نمای دو پوسته تاثیر گذار است. نمای دوپوسته^۲ تیپ جعبه ای^۳ یکی از انواع این نماها است که با توجه به سادگی در عملکرد، نصب و بهره برداری، می تواند در ایران بیشتر مورد توجه قرار گیرد. مکانیزم عملکرد نمای دو پوسته با تهویه طبیعی وابسته به رفتار حرارتی و جریان هوا در حفره میانی است. برای آنالیز رفتار حرارتی نمای دوپوسته، دینامیک سیالات محاسباتی^۴ می تواند با هدف ارتقا و بهبود عملکرد آن استفاده شود. در این مقاله، با استفاده از نرم افزار فلونت^۵، بهینه سازی عملکرد حرارتی نمای دو پوسته با تغییر سطح مقطع درجه‌های تهویه، تغییر عرض حفره میانی و استفاده از شیشه معمولی و کم گسیل^۶ برای جداره‌های شفاف، در فصل تابستان، در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. راستی آزمایی^۷ روش شبیه سازی، با مقایسه اندازه گیری های آزمایشگاهی یک نمونه نمای دو پوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی، ثبت شده در دانشگاه سالفورد منچستر انگلستان با نتایج شبیه سازی همان نمونه در نرم افزار فلونت انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد، افزایش عرض حفره میانی می تواند منجر به بهبود عملکرد حرارتی نما شود. افزایش سطح مقطع درجه‌های تهویه ورودی و خروجی و به تبع آن افزایش نرخ حجمی جریان هوا^۸ در حفره میانی، لزوما منجر به ارتقا عملکرد حرارتی نما نمی شود و استفاده از شیشه کم گسیل در قیاس با شیشه های معمولی، مخصوصا برای جداره خارجی نمای دو پوسته باعث کاهش شار گرمایی عبوری^۹ از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به داخل فضای ساختمان به مقدار متوسط ۲۳/۱٪ می شود. در نهایت برای طراحی بهینه نمای دو پوسته توجه به تمامی متغیرهای اثر گذار در عملکرد نما و انجام آنالیزهای اقتصادی برای انتخاب از بین گزینه‌های با عملکرد حرارتی مناسب، الزامی است.

کلمات کلیدی: تهویه طبیعی، نمای دوپوسته، درجه تهویه، شیشه کم گسیل، شبیه سازی

۱- پرسش‌های پژوهش

هدف نهایی این مقاله پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- پارامترهای موثر در شبیه‌سازی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته تیپ جعبه‌ای با تهویه طبیعی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، با هدف انطباق حداکثری نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج واقعی چیست؟
- استفاده از نمای دوپوسته تیپ جعبه‌ای با تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک ایران می‌تواند منجر به کاهش شار گرمایی ورودی به فضای داخل ساختمان از طریق جداره‌های شفاف پوسته خارجی ساختمان در فصل تابستان گردد؟

۲- مقدمه

از مهمترین موضوعاتی که در چند دهه اخیر مورد توجه اکثر کشورهای صنعتی پیشرفته بوده است، جلوگیری از اتلاف انرژی به دلیل کاهش ذخایر انرژی جهان و محدود بودن ذخایر انرژی فسیلی و آلودگی‌های ناشی از آن است (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۲). با رشد شهرنشینی، افزایش سریع تعداد ساختمان‌ها و ارتقاء استانداردهای زندگی، بخش ساختمان همچنان بیشترین درصد مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین صرفه‌جویی انرژی در بخش ساختمان نقش کلیدی را در حل مشکل انرژی در جهان ایفا می‌کند (Barbosa et al., 2014). بدون تردید بخش اصلی مصرف انرژی در ساختمان مربوط به گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع است. پوسته خارجی^۱ ساختمان عامل بسیار مهمی است که کیفیت شرایط محیط داخل را، صرف نظر از شرایط ناپایدار خارجی تعیین می‌کند. در واقع تقاضای انرژی ساختمان ارتباط نزدیکی با کارایی پوسته خارجی آن دارد (حافظی و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین توسعه تکنیک‌های ساخت، به طوری که هر دو عامل آسایش حرارتی و مصرف انرژی پایین را تضمین کند بی‌اندازه مهم و ضروری است (پورشب و خداکرمی، ۱۳۹۵). از طرفی بیشترین تبادل بار حرارتی کل ساختمان مربوط به دیوارهای خارجی است لذا طراحی مناسب پوسته‌های خارجی با ملاحظات اقلیمی برای کاهش مصرف انرژی و تامین آسایش حرارتی ضرورت دارد (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳).

استفاده از جریان هوا در پوسته ساختمان، برای بهبود عملکرد گرمایی ساختمان، بسیار مورد توجه است. استفاده از لایه هوا و جریان آن، محبوبیت خود را به دلیل توانایی در کاهش جذب گرما در فصل گرم، کاهش هدر رفت گرما در فصول سرد و هم چنین تبدیل تابش خورشید به انرژی مورد استفاده در گرمایش و سرمایش غیر فعال فضای داخل به دست آورده است (Iyi et al., 2014).

در سال‌های اخیر، سیستم‌های جدید نمای ساختمان گسترش یافته‌اند تا علاوه بر جنبه‌های معمارانه و زیبایی‌شناسی، عایق بندی حرارتی، ایجاد سایه و آسایش حرارتی و بصری ساختمان را فراهم آورند. یکی از این سیستم‌های جدید، نماهای دو پوسته‌اند. نمای دو پوسته متشکل از دو لایه شیشه‌ای و یک لایه هوا بین آن‌ها است. برافروختگی در حفره میانی در ماه‌های گرم سال از چالش‌های استفاده از نمای دوپوسته در اقلیم گرم و خشک ایران است که تغییر اندازه دریاچه‌های تهویه و ابعاد عمق حفره میانی، منجر به کاهش برافروختگی جفره میانی می‌شود (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳). هوا در حفره میانی به سه روش طبیعی، مکانیکی و مرکب تهویه می‌شود. تهویه فضای حفره میانی^{۱۱} باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، در فصل زمستان و تابستان می‌گردد. در زمستان با تابش خورشید به حفره میانی، هوای داخل حفره گرم شده (اثر گلخانه‌ای) که منجر به افزایش بازده گرمایی نما و کاهش هزینه‌های گرمایشی کل ساختمان می‌شود. سایه‌بان‌ها برای کنترل تابش خورشید معمولاً در حفره میانی نمای دوپوسته نصب شده و باعث کاهش جذب انرژی از طریق تابش خورشید در تابستان می‌شود. در فصل زمستان و با بستن دریاچه‌های تهویه ورودی و خروجی هوا و محبوس شدن هوا و با در نظر گرفتن تابش خورشید به اجزای

نما و گرم شدن اجزاء نمای دو پوسته به صورت عایق حرارتی و جاذب گرمایی تابشی عمل می کند و در نتیجه استفاده از نمای دوپوسته منجر به کاهش مصرف انرژی گرمایشی در فصول سرد سال می گردد (Barbosa et al., 2014).

در این مقاله، عملکرد حرارتی نمای دوپوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی در شهر تهران و برای فصل تابستان مورد بررسی قرار گرفت. صحت سنجی روش مدل سازی نمای دو پوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی در نرم افزار فلوئنت انجام و در ادامه تاثیر استفاده از شیشه های کم گسیل در مقایسه با شیشه های متداول، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی، استفاده از سایه بان با زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و عرض های مختلف حفره میانی به مقادیر ۰،۳۰، ۰،۶۰ و ۰،۹۰ سانتیمتر در نمای دوپوسته جعبه ای با تهویه طبیعی و با هدف انطباق و ارتقای عملکرد این نوع نما در ظهر گرم ترین روز سال در شهر تهران برای نمای جنوبی ساختمان بررسی شد.

روش تحقیق بر مبنای مطالعات کتابخانه ای جهت بررسی سوابق و پیشینه، مدل سازی و شبیه سازی کامپیوتری و روش های تطبیقی برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی است. در بخش مطالعات کتابخانه ای به بررسی برخی از پژوهش های مرتبط با موضوع پژوهش پرداخته و در ادامه با انجام شبیه سازی نمای دوپوسته با نرم افزار Ansys Fluent-Ver 2019 R2 و بررسی نتایج سرعت جریان هوا، دما و انرژی گرمایی عبوری از سطوح شفاف، عملکرد حرارتی نمای دو پوسته تیپ جعبه ای ارزیابی شد. برای صحت سنجی روش شبیه سازی، از اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد.

۳- پیشینه پژوهش

در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، در بسیاری از موارد ساختمان سازی به صورت الگو برداری سطحی از ساختمان های کشورهای توسعه یافته صورت گرفته که از نتایج آن استفاده از نماهای شیشه ای بدون ایجاد تمهیدات کنترلی در برابر شرایط اقلیمی است (Barbosa et al., 2014؛ حسین پور ستوبادی و قنبران، ۱۳۹۱). در طول دهه گذشته، ایده تهویه غیر فعال بر اساس گرمایش خورشید، مورد توجه قرار گرفته است. در میان سیستم های پوسته ساختمان، نمای دو پوسته به عنوان سیستمی که امکان برقراری تهویه طبیعی را فراهم می کند معرفی شده است (پور شب و خدا کرمی، ۱۳۹۵؛ Gratia, & De Herde, 2007). یکی از چالش برانگیزترین پارامترهای طراحی این نوع نما، تاثیرات اقلیم در طراحی نماهای دوپوسته است. رفتار کلی نمای دوپوسته به دلیل چندین پدیده فیزیکی که به طور همزمان اتفاق می افتند (حرکت هوا و همرفت گرما، رسانایی، تابش امواج با طول موج کوتاه و بلند) بسیار پیچیده است. نماهای دوپوسته بایستی بر اساس شرایط اقلیمی مختلف، الگو یا تیپ مناسب هر اقلیم و مشخصات هندسی و ابعادی مناسب استفاده شوند، در غیر این صورت باعث کاهش مصرف انرژی نشده و نتیجه عکس خواهد داد. ایده نمای دوپوسته در واقع ترکیب روش های غیر فعال مانند تهویه طبیعی، استفاده از نور روز و جذب تابش خورشید با پوسته یک ساختمان است. عمده مطالعات و پروژه های انجام شده در زمینه نماهای دوپوسته با موضوع آسایش حرارتی و صرفه جویی انرژی، عموماً در اقلیم های سرد اروپایی و شمال آمریکا انجام گرفته است (Zhai et al., 2007; Zhang et al., 2007; Zhang & Yang, 2017 Bui et al., 2020).

به کارگیری نمای دوپوسته در اقلیم گرم و خشک، مستلزم مدل سازی دقیق عملکرد آن به خصوص در فصل گرم سال بوده به طوری که در فضای حفره میانی نمای دو پوسته برافروختگی^{۱۲} در فصل تابستان رخ ندهد. توجه به تعداد و ابعاد دریچه های تهویه، استفاده از پرده های کرکره ای، جهت گیری نما، نسبت دیوار به پنجره جدار داخلی، سرعت باد، رنگ، جنس و زاویه سایه بان از راهکارهای پیشگیری از برافروختگی حفره میانی نما دوپوسته هستند که در پژوهش های پیشین مورد بررسی قرار گرفته اند (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳).

نمای دو پوسته در اقلیم های متنوع در چند دهه اخیر توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش ها شامل عملکرد نمای دوپوسته، میزان مصرف انرژی ساختمان با استفاده از این نما و قابلیت استفاده از این نما در اقلیم های

متنوع را شامل می شود. در جدول ۱ برخی از اصلی ترین پارامتر های موثر در شبیه سازی نمای دوپوسته در برخی از پژوهش های پیشین با استفاده از نرم افزار فلوئنت، ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای انتخاب شده در شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه‌ای با تهویه طبیعی با استفاده از نرم افزار فلوئنت در پژوهش های پیشین

ردیف	مرجع	مدل آشفتگی سیال هوا	ابعاد مش بندی هندسه	مدل هندسی	مدل تابش
۱	Mona Azarbayjani 2010	RNG k-ε	مش بندی به ابعاد ۲ سانتیمتر	سه بعدی	(DO)
۲	Amairah, Ikrima Abd El-Karim Mohammad-2017	RNG k-ε SST k-ω	مش بندی به ابعاد ۵ تا ۲۰ میلیمتر	دو بعدی	(DO)
۳	Jordi Parra et al.-2015	RNG k-ε	مش بندی به ابعاد ۱۲/۵*۱۲/۵ میلیمتر	دو بعدی	P1
۴	Fei Xue, Xiaofeng Li-2015	Standard two-layer k-ε model	-	دو بعدی	S2S
۵	Teshome Edae Jiru a, Yong-X. Taob, Fariborz Haghighatc-2011	RNG k-ε	-	دو بعدی	S2S
۶	Y Ji, M J Cook, V I Hanby, D G Infield, D L Loveday and L Mei-2007	k-ω	حدود ۱۱۰ هزار مش در مدل دو بعدی	دو بعدی	Monte Carlo (MC)
۷	A. Guardo, M. Coussirat, E. Egusquiza, P. Alavedra, R. Castilla -2009	RNG k-ε	-	سه بعدی	P1
۸	هادیان پور و همکاران - ۱۳۹۳	K-ε standard	-	دو بعدی	-
۹	صالحی و همکاران - ۱۳۹۰	K-ε standard	-	سه بعدی	-
۱۰	پورشب و خداکرمی - ۱۳۹۵	k-ω SST	-	سه بعدی	-

صحت سنجی روش شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت و اطمینان از انطباق نتایج حاصل شده از شبیه سازی با نتایج واقعی، بسیار حائز اهمیت است. مطابق جدول ۱، در پژوهش های پیشین، برای شبیه سازی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته در نرم افزار فلوئنت، گزینه های مختلفی برای پارامتر های اصلی موثر در شبیه سازی انتخاب شده است. اطمینان از صحت روش شبیه سازی و کاهش حداکثری خطا، از اصلی ترین مراحل طراحی نمای دوپوسته با استفاده از نرم افزار فلوئنت است.

در مدل بهینه نمای دوپوسته در اقلیم گرم و خشک می توان از گرمای به دام افتاده در حفره میان شیشه های نمای برای تقویت نیروی شناوری در راستای قائم استفاده کرد. اثر دودکشی ایجاد شده در داخل حفره، قدرت کافی برای مکش هوا و تقویت جریان هوای طبیعی در سطح افق را دارد. در این میان طراحی صحیح سایه اندازها، تاثیر اساسی بر تقویت نرخ تهویه داخل حفره دارد. با طراحی بهینه نسبت عمق حفره میانی نمای دو پوسته به ارتفاع آن، می توان دما و انرژی گرمایی سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته را تا ۲۶٪ نسبت به نمای تک پوسته کاهش داد (Amairah, 2017؛ پورشب و خداکرمی، ۱۳۹۵). ضمناً هادیان پور و همکاران، نشان دادند استفاده از نمای دوپوسته در شهر یزد منجر به دمای ۱۸.۸ سانتیگراد در حفره میانی نما در فصل تابستان شد و مصرف انرژی سرمایشی برای اتاقکی به ابعاد طول و عرض ۳ متر و ارتفاع ۲.۴ متر و با حفره میانی نمای دوپوسته به عرض ۸۰ سانتیمتر، ۱۴.۴ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش یافت (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳).

۴- صحت سنجی و شبیه سازی

برای شبیه سازی جریان هوا در حفره میانی نما و اثرات تابشی خورشید بر نمای دو پوسته از نرم افزار دینامیک سیال محاسباتی فلوئنت، نسخه (2019-R2) استفاده شده است. برای تولید هندسه از زیر شاخه مدل هندسی^{۱۳}، برای مش بندی هندسه از زیر شاخه مش^{۱۴} و برای انجام شبیه سازی سیالاتی از زیر شاخه فلوئنت استفاده شده است. مش بندی به صورت خطی^{۱۵} از نوع

مثلث بندی^{۱۶} با الگوریتم تطابق تکه^{۱۷} انجام شده است. در نرم افزار فلونت، جریان هوا با استفاده از معادلات پایستگی جرم و تکانه محاسبه می شود. شناوری^{۱۸} حرارتی، مکانیزم اصلی جریان هوا در درون فضای نمای دو پوسته است. ویژگی های سیالاتی شبیه سازی، مطابق پارامتر های جدول ۲ در نظر گرفته شد. این پارامتر ها بر اساس نتایج حاصل شده از صحت سنجی روش شبیه سازی در این پژوهش و همچنین استفاده از نتایج مقاله پاسوت و دی کارلی (Pasut & De Carli, 2012)، انتخاب گردید.

جدول ۲- مشخصات فیزیک سیال هوا، ورودی به نرم افزار فلونت

مشخصه های اصلی لازم در شبیه سازی	موارد در نظر گرفته شده
هندسه مدل	سه بعدی با مقیاس ۵۰٪ در راستای محور عمود بر مقطع نمای دو پوسته
ابعاد مش بندی	مش بندی به ابعاد ۸ میلیمتر - پارامتر Y^+ نزدیک به ۱/۰
چگالی هوا	$\rho = 3.34697 - 0.01055708 T + 1.10772 * 10^{-5} * T^2$
مدل آشفتگی	RNG k-ε
مدل تابشی	DO
طرح متغیر ها	First-order scheme
متغیر فشار	Body-force weighted
الگوریتم	Simple
همگرایی متغیر ها به جز انرژی	10^{-3}
همگرایی برای متغیر انرژی	10^{-6}

T: دما بر حسب درجه کلونین، ρ: چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

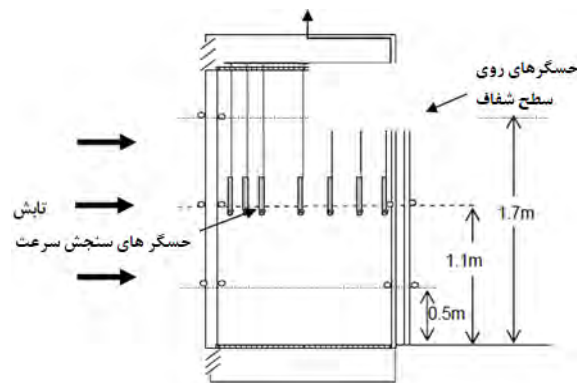
۴-۱- صحت سنجی روش شبیه سازی در نرم افزار

یکی از روش های صحت سنجی روش شبیه سازی با نرم افزار، مقایسه نتایج ثبت شده یک نمونه آزمایشگاهی انجام شده توسط دیگران با نتایج شبیه سازی همان نمونه آزمایشگاهی با نرم افزار است (Iyi et al., 2014). برای صحت سنجی روش شبیه سازی در نرم افزار فلونت، از آنالیز حساسیت استفاده گردید. با مقایسه نتایج ثبت شده آزمایشگاهی می و همکاران (۲۰۰۷) که بر روی یک نمونه نمای دو پوسته جعبه ای تجاری با تهویه طبیعی انجام شده با شبیه سازی همین نمونه در نرم افزار فلونت، صحت سنجی روش شبیه سازی در نرم افزار فلونت و بر اساس پارامتر های جدول ۲ بررسی شد. نتایج ثبت شده می و همکاران به دو دلیل زیر می تواند مورد مقایسه با نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلونت قرار گیرد:

۱- می و همکاران نمای دو پوسته جعبه ای با تهویه طبیعی را در شرایط آزمایشگاهی و به دور از وزش باد و یا بازتابش خورشید از ساختمان های مجاور، مورد بررسی قرار داده و نتایج دما و سرعت جریان هوا را در محل حسگرهای تعبیه شده در مقطع نمای دو پوسته ثبت نمودند.

۲- می و همکاران در شرایط مختلف زاویه سایه بان (۰ تا ۹۰ درجه) و شدت های تابش مختلف، نتایج دما و سرعت جریان هوا را ثبت نمودند که بدین ترتیب با شبیه سازی این حالات مختلف و مقایسه نتایج ثبت شده آزمایشگاهی با نتایج شبیه سازی، صحت سنجی پارامتر های استفاده شده در شبیه سازی با فلونت مطابق جدول ۲ انجام شد.

در تصویر ۱ نمای دو پوسته مدل آزمایشگاهی می و همکاران (۲۰۰۷) با نمایش محل قرار گیری حسگرهای اندازه گیری دما و سرعت جریان هوا ارائه شده است.



تصویر ۱: مقطع نمای دو پوسته آزمایشگاهی (۲۰۰۷) و محل تعبیه حسگرهای حرارتی و سرعت سنج (Mei et al, 2007).

ابعاد نمونه و مشخصات تابشی و حرارتی نمای دو پوسته استفاده شده در آزمایش می و همکاران به شرح زیر است (Mei et al, 2007):

پوسته خارجی نمای دو پوسته شیشه شفاف تک جداره به ضخامت ۱۲ میلی‌متر با عرض ۱۴۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰۶ سانتیمتر داخل قاب آلومینیومی است. ورودی و خروجی هوا از شبکه ای به ابعاد ۲۴ سانتیمتر ارتفاع در ۱۴۵ سانتیمتر عرض تشکیل شده است. پوسته داخلی به ابعاد ۱۳۸ سانتیمتر عرض در ۲۰۰ سانتیمتر ارتفاع از شیشه دو جداره به ابعاد ۱۲۲ سانتیمتر عرض در ارتفاع ۱۸۵ سانتیمتر ارتفاع تشکیل شده است. سایه بان از نوع کرکره ای با جنس آلومینیوم است. ابعاد سایه بان کرکره ای ۱۴۵ سانتیمتر عرض در ۲۱۰ سانتیمتر ارتفاع و هر ردیف کرکره سایه بان به عرض ۸ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر و حالات زاویه ای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ درجه، آزمایش و اندازه گیری شده است. عرض حفره میانی ۵۵ سانتیمتر و محل قرار گیری سایه بان در یک سمت خارجی نمای دو پوسته به سمت لایه خارجی نما تعبیه شده است. دمای داخل و خارج نمای دو پوسته در هنگام شروع آزمایش ۲۰ درجه سانتیگراد و شدت تابش به صورت ثابت برابر ۷۱۵ وات بر متر مربع است.

در تصویر ۲، دمای سطح شیشه داخل نمای دو پوسته حاصل شده از نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف مقیاس مدل سه بعدی با نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران مقایسه شده که با بررسی نتایج مشخص است مقیاس واقعی و مقیاس ۵۰٪، نزدیکترین نتایج را به نتایج آزمایشگاهی دارند. در جداول ۳ الی ۵، دمای سطح شیشه داخل نمای دو پوسته و سرعت در حفره میانی و پارامتر Y^+ برای مدل‌های با مقیاس ۵۰٪ و با ابعاد مش ۷، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و زوایای سایه بان ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه شد. با بررسی جداول ۳ تا ۵، دقیق‌ترین نتایج دمای سطح شیشه داخل نمای دو پوسته و سرعت جریان هوا در حفره میانی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، مربوط به مش بندی به ابعاد ۸ میلی‌متر است. میانگین درصد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای متغیر دمای سطح شیشه داخل نما و با مش به ابعاد ۸ میلی‌متر در نمونه مقیاس ۵۰ درصد برابر ۳/۷٪ و میانگین درصد اختلاف متغیر سرعت جریان هوا در حفره برابر ۳/۹٪ بوده که با افزایش ابعاد مش بندی، دقت نتایج کمتر می شود. در حالت مش به ابعاد ۸ میلی‌متر، عدد Y پلاس نسبت به سایر موارد نزدیکتر به عدد یک است. به طور مشخص، اندازه مش کوچکتر از مقدار ۸ میلی‌متر که باعث کاهش پارامتر Y^+ از عدد یک شده، نه تنها باعث حصول نتایج دقیق‌تر نمی گردد بلکه زمان و حجم محاسبات کامپیوتری را در حدود ۵۰٪ افزایش داده است. مقادیر پارامتر R^2 برای مقایسه نتایج دمای سطح شیشه داخلی نما و سرعت جریان هوا در حفره میانی، حاصل شده از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای مدل سه بعدی با مقیاس ۵۰٪ و مش به ابعاد ۸ میلی‌متر، به ترتیب ۰/۷۵۷۳ و ۰/۹۲۳۶ حاصل گردید.

جدول ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای متغیر دمای سطح بیرونی شیشه داخلی نمای دو پوسته و با مش به ابعاد ۸ میلیمتر در نمونه سه بعدی با مقیاس ۵۰ درصد

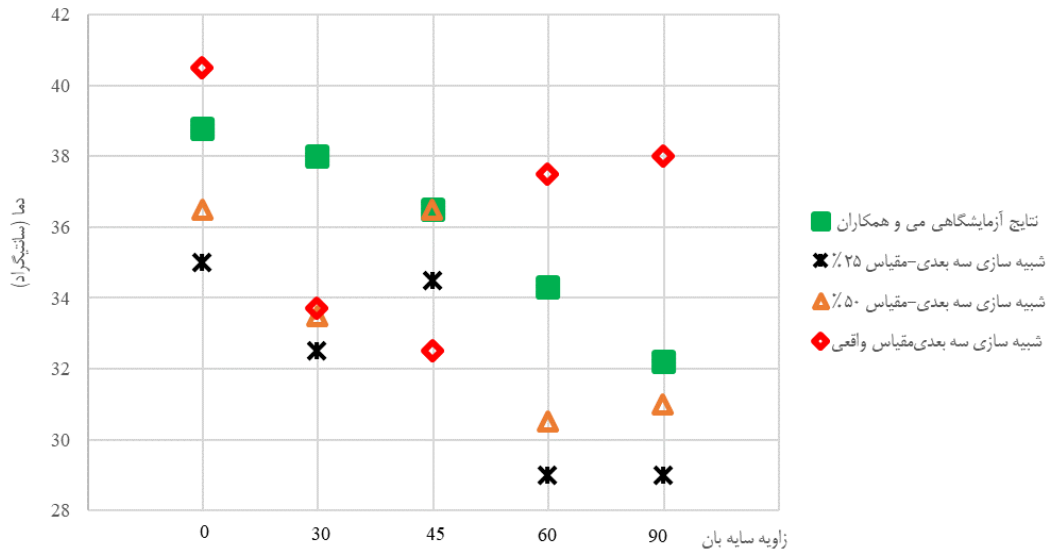
میانگین درصد اختلاف	زاویه سایه بان					زاویه سایه بان					ابعاد مش بر حسب میلیمتر
	۹۰	۶۰	۴۵	۳۰	۰	۹۰	۶۰	۴۵	۳۰	۰	
						۳۲/۲	۳۴/۳	۳۶/۵	۳۸	۳۸/۸	آزمایشگاهی
%۶/۲	%۰/۹	%۶/۷	%۱۷/۸	%۲/۶	%۳/۱	۳۲/۵	۳۲	۳۰	۳۷	۴۰	مقیاس ۵۰-مش ۷
%۳/۷	%۰/۶	%۶/۷	%۴/۱	%۳/۹	%۳/۴	۳۲	۳۲	۳۸	۳۶/۵	۳۷/۵	مقیاس ۵۰-مش ۸
%۶/۵	%۳/۷	%۱۱/۱	%۰	%۱۱/۸	%۵/۹	۳۱	۳۰/۵	۳۶/۵	۳۳/۵	۳۶/۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۰
%۱۱/۲	%۶/۸	%۱۴	%۹/۶	%۱۴/۵	%۱۱/۱	۳۰	۲۹/۵	۳۳	۳۴/۵	۳۴/۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۵
%۱۵	%۹/۹	%۱۸/۴	%۹/۶	%۱۸/۴	%۱۸/۸	۲۹	۲۸	۳۳	۳۱	۳۱/۵	مقیاس ۵۰-مش ۲۰

جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای متغیر سرعت جریان هوا در حفره میانی نمای دو پوسته و با مش به ابعاد ۸ میلیمتر در نمونه سه بعدی با مقیاس ۵۰ درصد

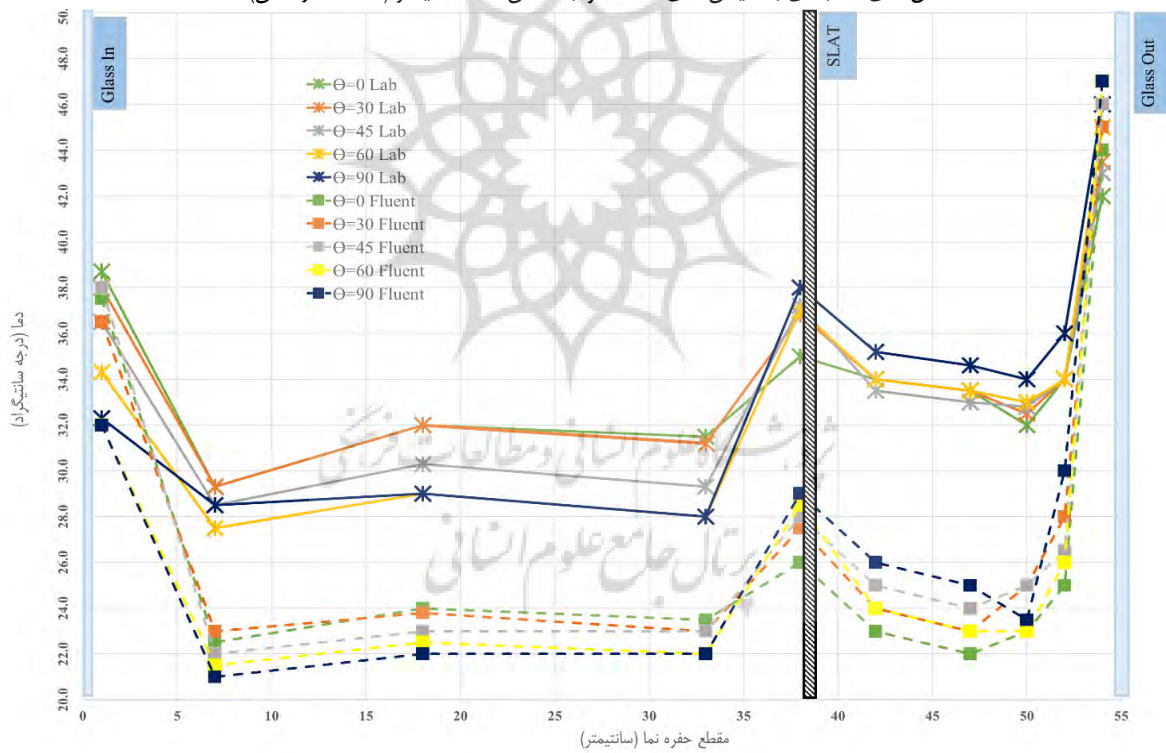
میانگین درصد اختلاف	زاویه سایه بان					زاویه سایه بان					ابعاد مش بر حسب میلیمتر
	۹۰	۶۰	۴۵	۳۰	۰	۹۰	۶۰	۴۵	۳۰	۰	
						۰/۱	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۲	آزمایشگاهی
%۱۴/۵	%۱۰/۰	%۲۱/۴	%۱۷/۶	%۱۰/۰	%۱۳/۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۵	مقیاس ۵۰-مش ۷
%۹/۳	%۱۰/۰	%۱۲/۴	%۰	%۱۵/۰	%۰	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۲۲	مقیاس ۵۰-مش ۸
%۲۲/۴	%۲۵/۰	%۳۵/۷	%۱۷/۶	%۲۰/۰	%۱۳/۶	۰/۰۷۵	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۲۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۰
%۱۴/۹	%۲۵/۰	%۱۷/۹	%۲/۹	%۱۵/۰	%۱۳/۶	۰/۰۷۵	۰/۱۱۵	۰/۱۷۵	۰/۲۳	۰/۲۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۵
%۲۰/۴	%۳۵/۰	%۲۸/۶	%۱۴/۷	%۱۲/۵	%۱۱/۴	۰/۰۶۵	۰/۱	۰/۱۹۵	۰/۲۲۵	۰/۲۴۵	مقیاس ۵۰-مش ۲۰

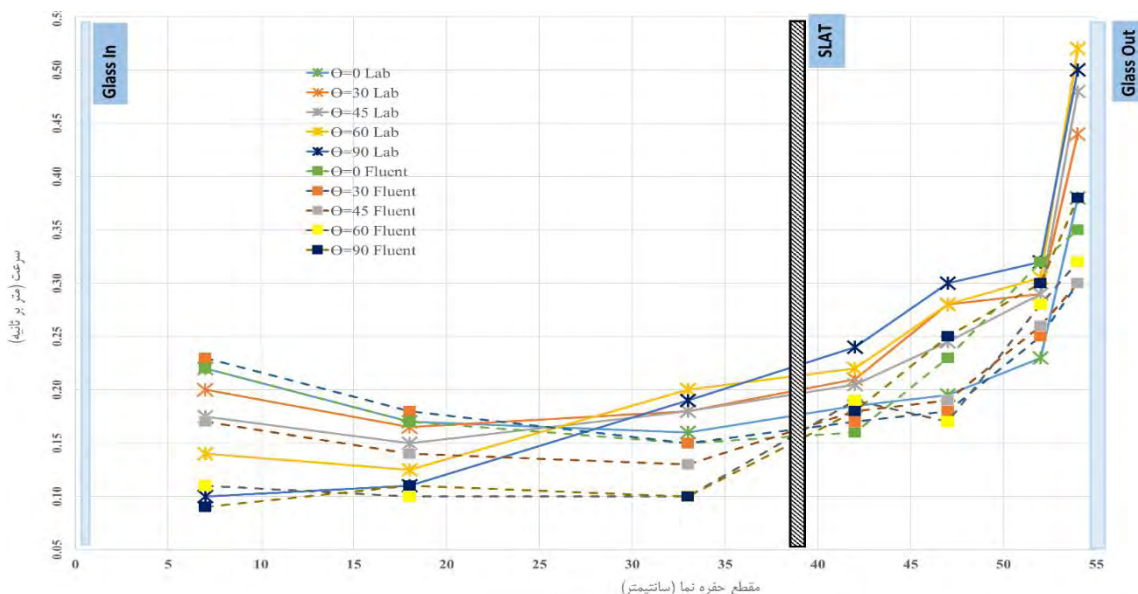
جدول ۵: پارامتر Y⁺ در شبکه مجاور شیشه داخلی نما در نمونه سه بعدی با مقیاس ۵۰ درصد

زاویه سایه بان					ابعاد مش بر حسب میلیمتر
۹۰	۶۰	۴۵	۳۰	۰	
۰/۲۵	۰/۴	۰/۴	۱	۱/۲۵	مقیاس ۵۰-مش ۷
۰/۶	۰/۶	۱	۰/۷۵	۱/۵	مقیاس ۵۰-مش ۸
۱/۲	۱/۲۵	۲	۱/۷۵	۱/۷۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۰
۳/۲۵	۳/۵	۴/۲۵	۴/۵	۴/۵	مقیاس ۵۰-مش ۱۵
۴	۴/۵	۶	۶/۵	۶/۵	مقیاس ۵۰-مش ۲۰



تصویر ۲: مقایسه دمای سطح خارجی شیشه داخلی نمای دو پوسته، ثبت شده از نتایج آزمایشگاهی می و همکاران و نتایج حاصل از شبیه سازی مدل های سه بعدی با مقیاس های مختلف و ابعاد مش ۱/۰ سانتیمتر (ماخذ: نگارندگان)





تصویر ۳: مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلونت (خط چین) برای مدل سه بعدی با مقیاس ۵۰٪ و اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان متنوع و اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران (خط پر)، بالا: دمای شیشه داخلی نما، پایین: سرعت جریان هوا در حفره (ماخذ: نگارندگان)

در تصویر ۳، مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی می و همکاران (خط پر) و نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلونت (خط چین) برای مدل سه بعدی با مقیاس ۵۰٪ و اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، برای پارامتر های دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته و سرعت جریان تهویه در حفره میانی نمای دو پوسته نشان داده شد.

۴-۲- شبیه سازی

هادیان پور و همکاران در سال ۱۳۹۳ در پژوهشی، عملکرد نمای دو پوسته را در اقلیم گرم و خشک (شهر یزد) در فصل تابستان بررسی نمودند. در آن پژوهش پارامتر های متغیر در شبیه سازی شامل تهویه یا عدم تهویه حفره میانی نما، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی و عمق فضای حفره میانی نما بودند و پژوهشگران با تغییر این متغیر ها، به بررسی عملکرد نمای دو پوسته، شامل دمای سطوح و سرعت جریان هوا در حفره میانی نما پرداختند. استفاده از نمای دو پوسته بدون تهویه در فصل تابستان، منجر به انباشتگی گرما در سطوح فوقانی نما و در نتیجه افزایش دمای سطوح در بالای مقطع نما شد. جریان هوای تشکیل شده در نمای بدون تهویه حالت آشفته داشته لیکن در نمای دو پوسته با امکان تهویه، جریان هوا آرام تر و منظم تر با حرکت از سمت دریچه ورودی (پایین مقطع) به سمت دریچه خروجی (بالای مقطع) و تغییرات دمایی با بازه محدودتر بین بالا و پایین مقطع نما شکل گرفت. افزایش سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی و همچنین عمق حفره میانی تا محدوده ای مشخص، منجر به بهبود عملکرد حرارتی نما و بیش از آن محدوده، منجر به افزایش دمای سطوح در نمای دو پوسته شد. همان طور که در مقاله هادیان پور و همکاران نیز اشاره شده، تاثیرات وجود و شرایط سایه بان در فضای بین دو پوسته نما، بررسی نشد (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳).

به دلیل تفاوت های اقلیمی شهر تهران و شهر یزد و همچنین بررسی پارامتر های موثر در عملکرد حرارتی نمای دو پوسته علاوه بر عمق حفره میانی و سطح مقطع دریچه های تهویه، در این پژوهش ۱۱۲ سناریوی شبیه سازی با تغییر پارامترهای مستقل موثر در عملکرد نمای دو پوسته 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:

- پارامترهای ثابت در سناریوهای شبیه سازی:

پوسته خارجی نمای دو پوسته شیشه شفاف تک جداره به ضخامت ۱۲ میلیمتر با عرض ۲۰۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵۰ سانتیمتر داخل قاب آلومینیومی است. پوسته داخلی به همان ابعاد پوسته خارجی و از شیشه تک جداره به ضخامت ۶ میلیمتر است. ابعاد سایه بان کرکره ای ۲۰۰ سانتیمتر عرض در ۲۱۰ سانتیمتر ارتفاع و هر ردیف کرکره سایه بان به عرض ۸ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر و از جنس آلومینیوم است. محل قرار گیری سایه بان در یک سوم سمت خارجی نمای دو پوسته به سمت لایه خارجی نما است. دمای اولیه هوای داخل نمای دو پوسته، سایه بان ها و شیشه داخلی و خارجی و فریم های شیشه ها مطابق آمار دمای ۱۰ ساله هواشناسی ایستگاه مهر آباد در روز اول مرداد ماه، بین ساعت ۱۱ تا ۱۵ که بیشترین تابش به نمای جنوبی صورت می گیرد، معادل ۳۸/۱۰ درجه سانتیگراد، شدت تابش مستقیم خورشید در روز اول مرداد ماه، بین ساعات مذکور با شدت ۸۵۵ وات بر متر مربع و تابش انعکاسی بر سطوح عمودی، ۱۴۶ وات بر متر مربع و با زاویه تابشی متوسط ۵۹/۱۰ درجه نسبت به خط افق به سطح شیشه خارجی نمای دو پوسته به عنوان ورودی در نرم افزار فلونت اعمال شده است.

در ظهر اول تیر، زاویه تابش خورشید به سطح شیشه ای نمای جنوبی، ۶۲/۲ درجه و شدت تابش ۸۶۲ وات بر متر مربع، در ظهر پانزدهم مرداد، زاویه تابش، ۵۵/۸ درجه و شدت تابش ۸۵۲ وات بر متر مربع، در ظهر پایان شهریور، زاویه تابش، ۳۹/۶ درجه و شدت تابش ۸۶۹ وات بر متر مربع است. دمای میانگین ده سال نشان می دهد، در ظهر اول تیر دمای متوسط در ساعات تابش خورشید به نمای جنوبی، ۳۵/۸ سانتیگراد، ظهر پانزدهم مرداد دمای متوسط در ساعات تابش خورشید به نمای جنوبی، ۳۶/۹ سانتیگراد و ظهر پایان شهریور دمای مورد اشاره ۲۸/۲ سانتیگراد بوده است. لذا در فصل تابستان و در محدوده ساعات ظهر که نمای جنوبی بیشترین تابش را دریافت می کند، پارامتر شدت تابش، تغییراتی کمتر از ۳٪ داشته و به نظر نمی رسد پارامترهای اثر گذاری در نتایج باشد. لیکن در فرایند طراحی نمای دو پوسته بایستی به دمای هوا و زاویه تابش خورشید توجه شود که از اول تیر تا پایان شهریور، محدوده تغییرات بیشتری دارد و پارامترهای اثر گذاری در طراحی نمای دو پوسته هستند.

- پارامترهای متغیر در سناریوهای شبیه سازی:

متغیرهای هندسی: شبیه سازی نمای دو پوسته برای عمق حفره میانی به مقدار ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ سانتیمتر مربع انجام گردید. بدین ترتیب تاثیر متغیرهای مستقل عمق حفره میانی در متغیرهای وابسته سرعت جریان هوا، دما و شار گرمایی عبوری از جداره های شیشه ای نمای دو پوسته قابل بررسی گردید. متغیر سایه بان: برای بررسی عملکرد نماهای دو پوسته 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، ۴۵ و ۹۰ درجه در یک سوم نزدیک به جداره خارجی نما و حالت بدون سایه بان، بررسی گردید.

متغیر مشخصه اپتیکی شیشه: برای بررسی تاثیر مشخصه های اپتیکی سطوح شفاف نمای دو پوسته بر عملکرد حرارتی آن، شبیه سازی ها برای چهار حالت زیر انجام گردید:

- ۱- شیشه داخلی و خارجی از نوع معمولی
 - ۲- شیشه داخلی از نوع معمولی و سطح داخلی شیشه خارجی از نوع کم گسیل
 - ۳- شیشه داخلی و خارجی از نوع کم گسیل
 - ۴- شیشه داخلی از نوع کم گسیل و سطح داخلی شیشه خارجی از نوع معمولی
- در جدول ۶ مشخصات مصالح به کار رفته در شبیه سازی های نمای دو پوسته ارائه شده است.

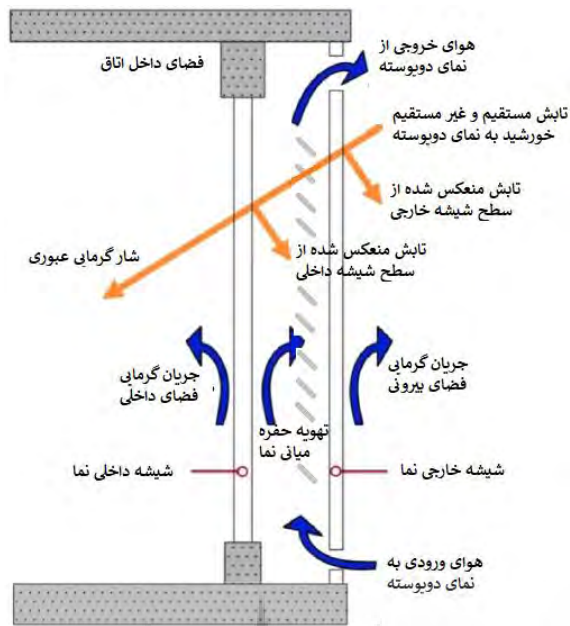
جدول ۶: مشخصات مصالح

مشخصات مصالح	شیشه معمولی	شیشه کم گسیل	سایه بان آلومینیومی
چگالی	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۷۱۹
گرمای ویژه ^{۲۰} (kg/m ³)	۸۴۰	۸۴۰	۸۷۱
رسانایی گرمایی ^{۲۱} (J/kg.k)	۱/۷	۱/۷	۲۰۲/۴
ضریب جذب ^{۲۲} (w/m.k)	۳۰	۳۰	-
ضریب شکست ^{۲۳} (1/m)	۱/۵	۱/۵	۱/۴۴
ضریب گسیل ^{۲۴}	۰/۸۴	۰/۲۴	۰/۷
ضریب گذر خورشیدی ^{۲۵}	۰/۸۴	۰/۴۲	-
ضریب انعکاس خورشیدی ^{۲۶}	۰/۰۷۵	۰/۲۵	-
ضریب جذب خورشیدی ^{۲۷}	۰/۰۸۵	۰/۳۳	-
ضریب گذر نور مرئی ^{۲۸}	۰/۹	۰/۷۹	-
ضریب انعکاس نور مرئی ^{۲۹}	۰/۰۸	۰/۰۹	-
ضریب جذب نور مرئی ^{۳۰}	۰/۰۲	۰/۱۲	-

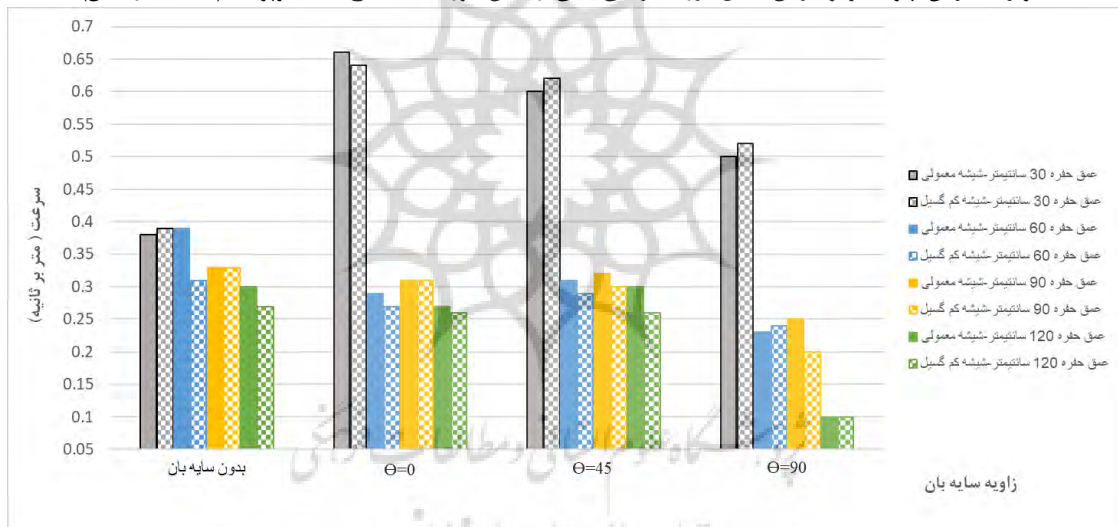
۵- یافته ها و بحث

در تصویر ۴، جریان تهویه هوا و جریان انتقال انرژی گرمایی ناشی از تابش خورشید به سطح نمای دوپوسته به فضای داخلی اتاق نشان داده شده است. در تصویر ۵، مقایسه سرعت هوا در حفره میانی برای حالات مختلف سایه بان، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل و عمق های مختلف حفره میانی و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع ارائه شده است. به عنوان نتیجه کلی، سرعت جریان تهویه در حفره میانی با افزایش عمق حفره میانی کاهش می یابد. عمده ترین دلیل آن ثابت ماندن سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی هوا با اعمال تغییر در عرض حفره میانی است. نتایج سرعت هوا در حفره میانی نسبت به جنس شیشه خارجی معمولی یا کم گسیل و همچنین زاویه سایه بان تغییر محسوسی ندارد؛ لیکن وجود سایه بان در حفره میانی در صورتی که سطح مقطع دریچه های تهویه امکان تامین هوای لازم را داشته باشد باعث افزایش سرعت هوا در حفره میانی می شود. اصلی ترین دلیل افزایش سرعت هوا در حفره میانی، تقسیم فضای حفره میانی به دو بخش با اضافه شدن سایه بان نسبت به حالت بدون سایه بان و کاهش سطح مقطع عبور جریان هوا داخل حفره میانی است.

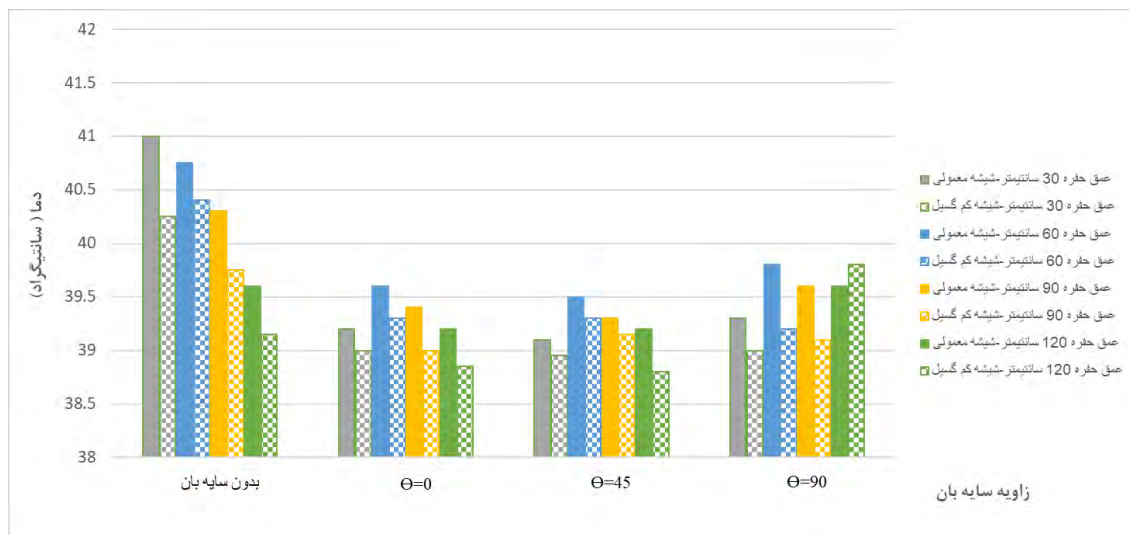
در تصویر ۶، دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته با تغییر عمق حفره میانی قابل مقایسه است. بیشترین دما برای سطح شیشه داخلی برای حالت بدون سایه بان است و دمای سطح شیشه داخلی در حالت بدون سایه بان با افزایش عمق حفره میانی کاهش می یابد. بازه تغییرات دمای سطح شیشه داخلی، با تغییر شیشه خارجی از نوع معمولی به کم گسیل از ۱/۹ درجه به ۱/۳ درجه کاهش یافته لیکن در مجموع تغییرات دمای سطح شیشه داخلی نسبت به تغییر نوع شیشه خارجی از نوع معمولی به کم گسیل و تغییر زاویه سایه بان حساسیت کمی دارد. وجود یا عدم وجود سایه بان تاثیر قابل ملاحظه ای در دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته دارد. کمترین دمای حاصل شده به مقدار ۳۸/۸ سانتیگراد و در حالت عرض حفره میانی ۱۲۰ سانتیمتر، زاویه سایه بان ۴۵ درجه و شیشه خارجی کم گسیل رخ می دهد که با توجه به اینکه دمای اولیه شیشه معادل ۳۸/۱ درجه بوده، افزایش ۰/۷ درجه سانتیگراد را نشان داده است.



تصویر ۴: جریان تهویه هوا و جریان انتقال انرژی گرمایی ناشی از تابش خورشید به سطح نمای دوپوسته (ماخذ: نگارندگان)



تصویر ۵: مقایسه سرعت هوا در حفره میانی برای حالات مختلف سایه بان، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل و عمق های مختلف حفره میانی، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع (ماخذ: نگارندگان)



تصویر ۶: مقایسه دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته برای حالات مختلف سایه بان، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل و عمق های مختلف حفره میانی، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع (ماخذ: نگارندگان)

در تصویر ۷، شار گرمایی عبوری ناشی از تابش خورشید (با طول موج کوتاه در اثر تابش مستقیم و طول موج بلند در اثر جریان همرفتی) از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به داخل ساختمان برای حالات مختلف سایه بان، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل، عمق های مختلف حفره میانی و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع قابل مقایسه است. بیشترین شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی برای حالت بدون سایه بان است و انرژی گرمایی سطح شیشه داخلی در حالت بدون سایه بان با افزایش عمق حفره میانی کاهش می یابد. شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی در حالت شیشه خارجی کم گسیل نسبت به نتایج شیشه خارجی معمولی حدود ۱۷٪ برای عمق حفره ۳۰ سانتیمتر و کاهش حدود ۱۹٪ برای عمق حفره ۱۲۰ سانتیمتر را نشان می دهد.



تصویر ۷: مقایسه شار گرمایی عبوری ناشی از تابش خورشید از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته برای حالات مختلف سایه بان، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل و عمق های مختلف حفره میانی، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع (ماخذ: نگارندگان)

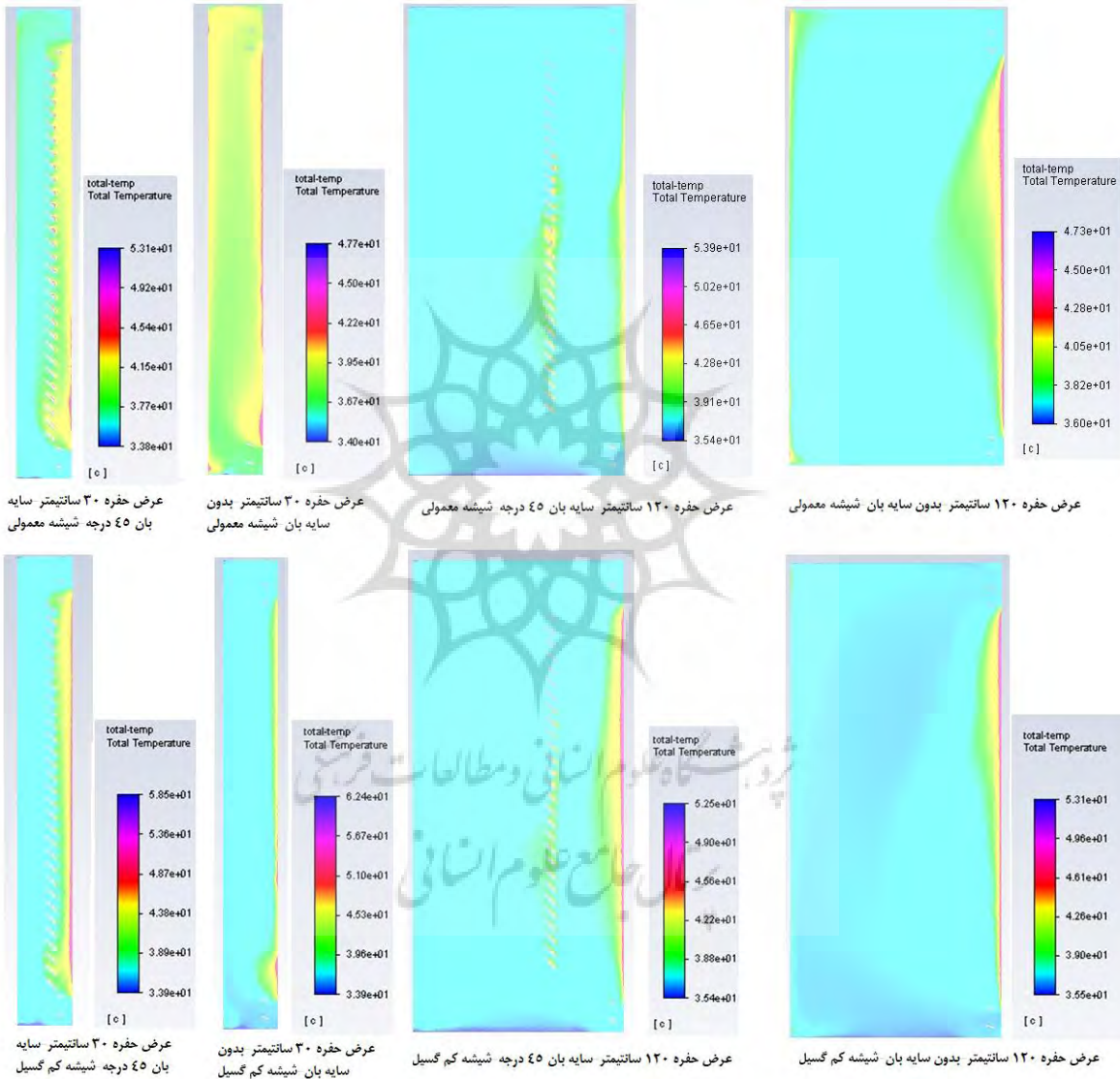
در جدول ۷، دما و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخل نمای دو پوسته در حالات بدون سایه بان و سایه بان با زاویه ۴۵ درجه و جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل، عرض حفره میانی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح دریچه تهویه ۰/۲۰، ۰/۴۰ و ۰/۸۰ متر مربع ارائه شده است. با بررسی نتایج، بهترین عملکرد نمای دو پوسته مربوط به نما با عرض حفره میانی ۱۲۰ سانتیمتر و سطح مقطع دریچه های تهویه ۰/۲۰ متر مربع و شیشه خارجی کم گسیل در حالت با سایه بان ۴۵ درجه با شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به فضای داخل ساختمان به مقدار ۳۲/۶ وات بر متر مربع و در حالت بدون سایه بان به مقدار ۵۵/۴ وات بر متر مربع است. دمای سطح شیشه داخلی نما در حالت با سایه بان ۴۵ درجه به مقدار ۳۸/۸ سانتیگراد و در حالت بدون سایه بان به مقدار ۳۹/۱۵ سانتیگراد است. جنس شیشه خارجی نما از نوع کم گسیل منجر به کاهش دمای سطح شیشه داخلی بین ۰/۳۸٪ تا ۲/۲۴٪ نسبت به شیشه معمولی و کاهش شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به فضای داخل ساختمان بین ۱۹/۴۴٪ تا ۲۹/۸٪ در حالات مختلف عمق حفره میانی و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی شده است. میانگین کاهش شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به فضای داخل ساختمان و به بیان دیگر ارتقا عملکرد حرارتی نمای دو پوسته با تغییر جنس شیشه خارجی نما از معمولی به کم گسیل به مقدار ۲۳/۱٪ است.

جدول ۷: مقایسه دما و شار گرمایی عبوری ناشی از تابش خورشید از سطح شیشه داخل نمای دو پوسته در حالات بدون سایه بان و سایه بان با زاویه ۴۵ درجه، جنس شیشه خارجی معمولی و کم گسیل، عرض حفره میانی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح دریچه تهویه ۰/۲۰، ۰/۴۰ و ۰/۸۰ متر

مربع

ردیف	عمق حفره میانی (cm)	سطح دریچه تهویه ورودی و خروجی (cm ²)	وضعیت سایه بان	شیشه خارجی کم گسیل		شیشه خارجی معمولی	
				دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته (سانتیگراد)	شار عبوری گرمایی از سطح شیشه داخلی (وات بر متر مربع)	دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته (سانتیگراد)	شار عبوری گرمایی از سطح شیشه داخلی (وات بر متر مربع)
بدون سایه بان	۱	۲۰	بدون سایه بان	۴۰/۲۵	۸۵/۵	۴۱	۱۱۶
	۲	۴۰		۴۰	۹۰	۴۰/۵	۱۲۰
	۳	۲۰		۴۰/۴	۸۰/۵	۴۰/۷۵	۱۱۲
	۴	۴۰		۳۹/۳	۸۴	۴۰/۲	۱۱۵
	۵	۲۰		۳۹/۷۵	۵۶/۵	۴۰/۳	۷۸
	۶	۴۰		۳۹/۴	۶۳	۳۹/۷	۸۰/۵
	۷	۸۰		۳۹/۲۵	۷۲/۵	۳۹/۵	۹۰
	۸	۲۰		۳۹/۱۵	۵۵/۴	۳۹/۶	۷۸/۹
	۹	۴۰		۴۰/۸	۶۲	۳۹/۵	۸۱/۷
	۱۰	۸۰		۳۹/۱	۷۱/۵	۳۹/۳	۹۰
سایه بان ۴۵ درجه	۱۱	۲۰	سایه بان ۴۵ درجه	۳۸/۹۵	۳۳	۳۹/۱	۴۳
	۱۲	۴۰		۳۸/۷	۳۷/۶	۳۸/۸۵	۴۶/۸
	۱۳	۲۰		۳۹/۳	۳۵/۴	۳۹/۵	۴۴/۳
	۱۴	۴۰		۳۸/۷۵	۳۸/۱	۳۸/۹	۴۶/۳

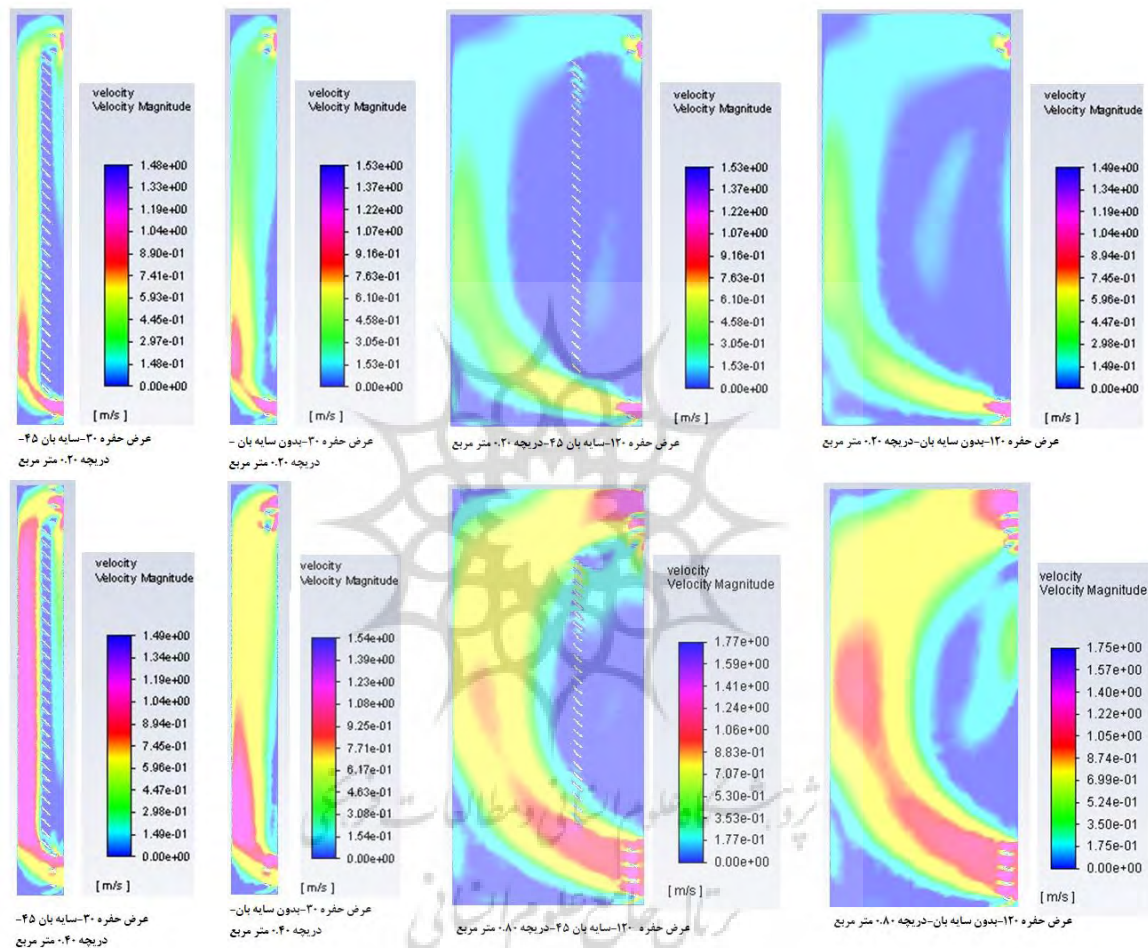
۲۱/۲٪	۰/۳۸٪	۴۵/۸	۳۹/۳	۳۶/۱	۳۹/۱۵		۲۰		۱۵
۲۰/۶٪	۰/۳۹٪	۴۶/۲	۳۸/۹	۳۶/۷	۳۸/۷۵		۴۰	۹۰	۱۶
۲۰/۹٪	۰/۳۹٪	۴۷/۴	۳۸/۶۵	۳۷/۵	۳۸/۵		۸۰		۱۷
۲۳/۷٪	۱/۰۲٪	۴۲/۷	۳۹/۲	۳۲/۶	۳۸/۸		۲۰		۱۸
%۲۴/۴	%۰/۲۶	۴۵	۳۸/۸	۳۴	۳۸/۹		۴۰	۱۲۰	۱۹
%۲۰/۷۵	%۰/۳۹	۴۸/۲	۳۸/۸	۳۸/۲	۳۸/۶۵		۸۰		۲۰



تصویر ۸: شماتیک توزیع دما در حفره میانی نمای دو پوسته (ماخذ: نگارندگان)

در تصویر ۸، شماتیک توزیع دما در حفره میانی نمای دو پوسته برای سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰ متر مربع و عرض حفره ۳۰ و ۱۲۰ سانتیمتر، در حالت بدون سایه بان و سایه بان با زاویه ۴۵ درجه و شیشه خارجی نما کم گسیل و معمولی نشان داده شده است. با تغییر جنس شیشه خارجی نمای دو پوسته از معمولی (ردیف بالا در تصویر ۸) به کم گسیل (ردیف پایین در تصویر ۸)، توزیع دما در مقطع نمای دو پوسته متعادل و یکنواخت تر و درصد بیشتری از انرژی گرمایی تابشی

خورشید به وسیله شیشه خارجی کم گسیل جذب و یا به بیرون منعکس شده است. شیشه کم گسیل درصد بیشتری از انرژی تابشی خورشید را به گرما تبدیل کرده و در نتیجه درصد کمتری از طول موج های محدوده مادون قرمز به نمای حفره میانی نمای دو پوسته وارد شده است. با توجه به اینکه انتقال دما به سه صورت تابش، رسانش و همرفتی است و هوا رسانایی کمی دارد و همچنین جریان تهویه هوا متمایل به سمت شیشه داخلی نما است (تصویر ۹)، لذا انتقال همرفتی گرما به داخل محدوده نمای دو پوسته نیز شکل نمی گیرد و بنابراین اگرچه دمای سطح شیشه کم گسیل خارجی نسبت به شیشه معمولی بالاتر است اما این افزایش دما به محدوده فضای داخلی نمای دو پوسته و شیشه داخلی نما تسری پیدا نکرده است.



تصویر ۹: شماتیک جریان هوا در حفره میانی نمای دو پوسته (ماخذ: نگارندگان)

در تصویر ۹، شماتیک جریان هوا در حفره میانی نمای دو پوسته با شیشه معمولی و عرض حفره ۳۰ و ۱۲۰ سانتیمتر در حالت بدون سایه بان و سایه بان با زاویه ۴۵ درجه و سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی ۰/۲۰، ۰/۴۰ و ۰/۸۰ متر مربع نشان داده شده است. جریان تهویه ای هوا از ورودی به سمت شیشه داخلی نمای دو پوسته متمایل شده و با جذب بخشی از گرمای شیشه داخل نما و گرم شدن و کاهش چگالی، به سمت بالای مقطع حرکت کرده و به سمت خروجی متمایل می شود. همانطور که در جدول ۷ و مطالعات پیشین (هادیان پور و همکاران، ۱۳۹۳)، مشخص شد افزایش سطح مقطع دریچه های تهویه (افزایش سرعت جریان هوا)، الزاما باعث ارتقای عملکرد حرارتی نمای دو پوسته در کاهش شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نشده و حتی با افزایش زیاد سطح دریچه های تهویه و شکل گیری جریان همرفت در نزدیکی شیشه خارجی،

امکان انتقال انرژی گرمایی از شیشه خارجی به صورت همرفت به شیشه داخلی نما فراهم شده است. ارتقای عملکرد حرارتی نمای دو پوسته در فصل تابستان در شهر تهران با استفاده از شیشه کم گسیل در جدار خارجی نما در جدول ۷ مشخص گردید لیکن در جدول ۸ سایر سناریوهای چینش شیشه های معمولی و کم گسیل، برای متغیر های وابسته دما و شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی به فضای داخلی ساختمان ارائه شده است.

جدول ۸: مقایسه دما و شار گرمایی عبوری ناشی از تابش خورشید از سطح شیشه داخل نمای دو پوسته در حالات بدون سایه بان و سایه بان با زاویه ۴۵ درجه و جنس شیشه معمولی و کم گسیل، عرض حفره میانی ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتیمتر و سطح دریچه تهویه ۰/۲۰ متر مربع

ردیف	عمق حفره میانی (cm)	سطح دریچه تهویه (cm ²)	وضعیت سایه بان	دمای سطح شیشه داخلی		شار عبوری گرمایی		دمای سطح شیشه داخلی		شار عبوری گرمایی			
				وات بر متر مربع	سانتیگراد	وات بر متر مربع	سانتیگراد	وات بر متر مربع	سانتیگراد	وات بر متر مربع	سانتیگراد		
۲۰	بدون سایه بان	۲۰		۱	۳۰	۴۱	۱۱۶	۴۳/۵	۱۰۷	۴۳/۵	داخلی کم گسیل	خارجی کم گسیل	
				۲	۶۰	۴۰/۷۵	۱۱۲	۴۳/۲	۱۰۲	۴۳/۲	داخلی معمولی	خارجی معمولی	
				۳	۹۰	۴۰/۳	۷۸	۴۱/۳	۷۲	۴۱/۳	داخلی کم گسیل	خارجی معمولی	
				۴	۱۲۰	۳۹/۶	۷۸/۹	۴۰/۲	۷۴/۹	۴۰/۲	داخلی معمولی	خارجی معمولی	
	سایه بان ۴۵ درجه	۲۰			۵	۳۰	۳۹/۱	۴۳	۳۹/۳	۴۱	۳۹/۳	داخلی کم گسیل	خارجی کم گسیل
					۶	۶۰	۳۹/۵	۴۴/۳	۳۹/۸	۴۰/۳	۳۹/۸	داخلی معمولی	خارجی معمولی
					۷	۹۰	۳۹/۳	۴۵/۸	۳۹/۶	۴۱/۸	۳۹/۶	داخلی کم گسیل	خارجی معمولی
					۸	۱۲۰	۳۹/۲	۴۲/۷	۳۹/۴	۴۰/۲	۳۹/۴	داخلی معمولی	خارجی معمولی

با توجه به نتایج جدول ۸، استفاده از شیشه کم گسیل در جدار داخلی نما، در حالی که جدار خارجی نما از نوع معمولی است، منجر به افزایش دمای سطح شیشه داخلی کم گسیل نسبت به شیشه داخلی معمولی تا ۲/۸٪ و کاهش حداکثر ۹٪ برای متغیر شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی به فضای داخل ساختمان شد. استفاده از شیشه کم گسیل در جدار داخلی نما، در حالی که جدار خارجی نما از نوع کم گسیل است، منجر به افزایش دمای سطح شیشه داخلی کم گسیل نسبت به شیشه داخلی معمولی تا ۴٪ و کاهش حداکثر ۱۲/۳٪ برای متغیر شار گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی به فضای داخل ساختمان شد. استفاده از شیشه کم گسیل در هر دو جداره داخلی و خارجی نمای دو پوسته نسبت به سایر سناریوهای جنس شیشه، منجر به کمترین نتایج برای متغیر شار گرمایی عبوری از شیشه داخلی نما به داخل فضای ساختمان شد.

افزایش عرض حفره میانی، استفاده از شیشه های کم گسیل به جای شیشه معمولی، تغییر سطح مقطع دریچه ها، در نهایت منجر به افزایش هزینه های اولیه شده و لذا انجام آنالیز هزینه و بررسی میزان کاهش مصرف انرژی ساختمان جهت تعیین مقرون به صرفه ترین سناریو لازم است. به عنوان مثال مطابق جدول ۸، علی رغم اینکه استفاده از شیشه کم گسیل برای هر دو جداره نما، منجر به کمترین نتایج برای متغیر شار گرمایی عبوری از شیشه داخلی نما به داخل ساختمان شده، لیکن عملکرد نمای دوپوسته با شیشه جدار خارجی کم گسیل و شیشه داخلی معمولی و کم گسیل اختلاف کمی داشته و برای تصمیم گیری

در استفاده از شیشه کم گسیل یا معمولی برای جدار داخلی نمای دوپوسته، آنالیز هزینه راهنمای مناسبی برای تصمیم گیری نهایی است.

۶- نتیجه گیری

مکانیزم عملکرد نمای دو پوسته با تهویه طبیعی بر اساس رفتار حرارتی و جریان هوا در حفره میانی است. دینامیک سیالات محاسباتی جهت ارتقا و بهبود طراحی و آنالیز عملکرد این نماها موثر است. نرم افزار فلوئنت از پر استفاده ترین نرم افزارها جهت شبیه سازی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی است که در این پژوهش از آن استفاده شد. در شبیه سازی ویژگی های هندسی و مشخصه های سیالاتی، متغیرها و پارامترهای زیادی وجود دارد که انتخاب درست آنها باعث افزایش دقت نتایج شبیه سازی شده و لذا لزوم صحت سنجی روش شبیه سازی بسیار حائز اهمیت است که در این پژوهش برای نمای دوپوسته تیپ جعبه ای با تهویه طبیعی منجر به نتایج زیر گردید:

- ۱- سیال هوا به صورت سیالی تراکم ناپذیر و چگالی سیال هوا به صورت تابعی از درجه حرارت تعریف شود.
- ۲- مدل آشفتگی سیالاتی $k-\epsilon$ RNG و مدل تابشی DO، مناسب ترین گزینه ها هستند.
- ۳- حل متغیرها بر اساس گزینه First-order scheme، متغیر فشار بر اساس گزینه Body-force weighted، الگوریتم حل مساله Simple و همگرایی متغیر انرژی تا مقدار 10^{-3} و همگرایی برای سایر متغیرها تا مقدار 10^{-6} مناسب است.
- ۴- پارامتر تعیین کننده در انتخاب ابعاد مش بندی که منجر به حصول نتایج نزدیک به واقعیت شود و در عین حال حجم محاسبات را بدون دلیل افزایش ندهد، پارامتر Y پلاس در اولین شبکه نزدیک دیواره ها بوده به طوری که مقدار آن در حدود عدد یک باشد.

در این پژوهش مشخص شد استفاده از شیشه کم گسیل برای جداره خارجی نمای دو پوسته باعث کاهش شار انرژی گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته به داخل فضای ساختمان به مقدار متوسط $23/1\%$ نسبت به شیشه معمولی می شود. افزایش سرعت جریان تهویه با افزایش سطح مقطع دریچه ها که منجر به افزایش نرخ حجمی جریان هوا در حفره میانی نمای دو پوسته می شود، الزاما باعث ارتقای عملکرد حرارتی نما در کاهش شار انرژی گرمایی عبوری از سطح شیشه داخلی نما به فضای داخل ساختمان نشده و در نهایت برای طراحی بهینه نمای دو پوسته توجه به تمامی متغیرهای اثر گذار در عملکرد نما و انجام آنالیز هزینه الزامی است. در بخش شبیه سازی و از بین ۱۱۲ سناریوی شبیه سازی شده نمای دو پوسته، بهترین عملکرد برای نمای دو پوسته با عرض حفره ۱۲۰ سانتیمتر، سطح مقطع دریچه های ورودی و خروجی به مقدار $0/20$ متر مربع و شیشه داخلی و خارجی از نوع کم گسیل و با زاویه ۴۵ درجه سایه بان برای فصل تابستان شهر تهران حاصل گردید. در خاتمه و با مقایسه نتایج پژوهش هادیان پور و همکاران در اقلیم گرم و خشک شهر یزد و پژوهش اخیر، هر چند به سبب شرایط مختلف اقلیمی دو شهر تهران و یزد، مشخصات و ابعاد هندسی متفاوت نماهای دو پوسته شبیه سازی شده در این دو پژوهش، نتایج به صورت کمی قابل مقایسه نیستند لیکن مقایسه کیفی نتایج این دو پژوهش نشان دهنده کارایی حرارتی مناسب نماهای دوپوسته برای اقلیم گرم و خشک ایران در فصل تابستان در صورت طراحی مناسب و توجه به متغیرهای مستقل موثر در عملکرد حرارتی نمای دوپوسته است.

پی نوشتها

- 1.natural ventilation
- 2.Double skin façade
- 3.Box type

- 4.computaional fluid dynamics
- 5.Ansys Fluent Software
- 6.Low-e
- 7.verification
- 8.Volumetric flow rate
- 9.Transmittance heat flux
- 10.envelope
- 11.cavity
12. Overheating
13. Work Bench-Design Modeler
- 14.Mesh
15. Linear
16. Tetrahedrons
17. Patch Conforming
- 18.Bouyancy
19. Y^+ پارامتری برای کنترل و تصدیق جریان سیال به صورت جریان آرام که در اولین شبکه کنار دیواره ها کنترل می شود:
20. Specific heat
21. Thermal conductivity
22. Absorption coefficient
23. Refractive index
24. Emissivity
25. Solar Transmittance
26. Solar Reflectance
27. Solar Absorptivity
28. Visible Transmittance
29. Visible Reflectance
30. Visible Absorptivity



منابع:

- پور شب، نسرین، خدا کرمی، جمال، (۱۳۹۵)، ارائه الگوی بهینه نماهای دوپوسته شیشه ای جهت افزایش جریان هوای طبیعی در ساختمان های اداری اقلیم گرم و خشک، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه ایلام
- حافظی، م.ر، زمردیان، ز، تحصیلدوست، م، «فرایند دستیابی به نمای دو پوسته دارای بهره وری مناسب انرژی، نمونه موردی یک ساختمان اداری در تهران»، مجله مطالعات معماری ایران، ۱۳۹۵
- حسین پور ستوبادی، قنبران، حمید، (۱۳۹۱)، بررسی عوامل موثر بر بهبود رفتار حرارتی نماهای دوپوسته در اقلیم شهر تهران و طراحی یک ساختمان اداری با نمای دوپوسته، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.
- صالحی، محمد، نصر اللهی، نازنین، مامی زاده، جعفر، (۱۳۹۰)، ارائه الگو معماری و پیشنهاد پوسته های هم ساز با اقلیم با رویکرد تامین آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه ایلام
- هادیان پور، محمد، نصراللهی، فرشاد، خداکرمی، جمال، رضایی حریری، محمدتقی، (۱۳۹۲)، بررسی عملکرد حرارتی پوسته های دو جداره ساختمان جهت کاهش گرمایش بیش از حد در این پوسته ها، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه ایلام
- هادیان پور، م، مهدوی نژاد، م، بمانیان، م، حق شناس، م، (۱۳۹۳)، ظرفیت سنجی به کارگیری پوسته های دو جداره در طراحی معماری اقلیم گرم و خشک ایران به منظور کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی شهر یزد)، نشریه هنرهای زیبا
- Albertoa A., Ramosa M.M., Almeidaa R M.S.F. (2017). Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries, Journal of Building Engineering 12 (2017) 87–98.

- Amaireh I. (2017). Numerical investigation into a double skin façade system integrated with shading devices, with reference to the city of Amman, PhD thesis, University of Nottingham
- Azarbayjani M., (2010). BEYOND ARROWS: ENERGY PERFORMANCE OF A NEW, NATURALLY VENTILATED DOUBLE-SKIN FACADE CONFIGURATION FOR A HIGH-RISE OFFICE BUILDING IN CHICAGO, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign
- Barbosa S. and Ip K., (2014), Double skin façade for naturally ventilated office buildings in Brazil. World Sustainable Building.
- Bui D-K., Nguyen T. N., Ghazlan A., Ngo N. T. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach, Applied Energy, Volume 265, 114797, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>.
- Gratia E., De Herde A. (2007). Greenhouse effect in double-skin façade, Energy and Buildings 39, 199e211.
- Guardo A., Coussirat M., Egusquiza E., Alavedra P., Castilla R. (2009). A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Facades in Mediterranean climates, Energy and Buildings 41, 534–542.
- Ji Y., Cook M. J., Hanby V. I., Infield D. G., Loveday D. L., Mei L., (2007). CFD MODELLING OF DOUBLE-SKIN FAÇADES WITH VENETIAN BLINDS, Proceedings: Building Simulation.
- Iyi D., Hasan R., Penlington R., Underwood C., Double Skin Façade: Modelling Technique and Influence of Venetian Blinds on the Airflow and Heat Transfer, Applied Thermal Engineering (2014), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.024.
- Jirua T., Taob X., Haghighat F., (2011). Airflow and heat transfer in double skin facades, Energy and Buildings 43, 2760–2766.
- 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, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.024.
- 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, ([http:// usir.salford.ac.uk/15870/1/Clima_2007_B02E1606.pdf](http://usir.salford.ac.uk/15870/1/Clima_2007_B02E1606.pdf)).
- Parra J., Guardo A., Egusquiza E., Alavedra P., (2015). Thermal Performance of Ventilated Double Skin Façades with Venetian Blinds, Energies, 8, 4882-4898; doi:10.3390/en8064882.
- 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, 267e274.
- Xue F., Li Xiaofeng (2015). A fast assessment method for thermal performance of naturally ventilated double-skin facades during cooling season. Solar Energy 114, 303–313
- Zhai Z., Zhang Z., Zhang W., Chen Q. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: part 1- summary of prevalent turbulence models, HVAC&R Research 13 (6), 853e870.
- Zhang Z., Zhang W., Zhai Z., Chen Q. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: part 2- comparison with experimental data from literature, HVAC&R Research 13 (6), 871e886.
- Zhang T., Yang H. (2019). Flow and heat transfer characteristics of natural convection in vertical air channels of double-skin solar façades, Applied Enrgy, Volume 242, Pages 107-120, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.072>.

Original Research Article

Optimization of thermal performance of double skin façade box window type with natural ventilation in summer in Tehran

Faryal Sadat Siadati^{1*}, Rima Fayaz², Niloofar Nikghadam³

1- Department of Art and Architecture, South Teharn Branch, Islamic Azad University.

2-Department of Architectural Technology, Tehran University of Art.

3- Department of Art and Architecture, South Teharn Branch, Islamic Azad University.

Abstract:

Design of the façade in accordance with climatic conditions is crucial to improve its ventilation function and to increase energy savings. Double skin façade (DSF) is a popular type of façade in office buildings among designers. The naturally ventilated double skin façade (NVDSF) is notable in terms of its energy performance mechanism. The NVDSF functional mechanism is based on thermal performance and airflow in the cavity. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to improve the function of these façades. In this paper, the geometric features of NVDSF are examined to achieve the best flow simulation strategy to promote accuracy and fewer errors in results and obtain the optimal time for computer simulation calculations using FLUENT software and sensitivity analysis. Laboratory measurements of a NVDSF sample were used to verify the simulation results. The findings revealed that the results of the three-dimensional model are more accurate compared to the two-dimensional one, especially for predicting the temperature values of glass surfaces. Also, the Y^+ parameter is the determinant parameter in choosing the mesh dimensions so that its value is about 1 for the first grid close to the walls. Determining the optimal scale of the three-dimensional model can reduce computation and design time. On the other hand, the cross section shape and the area of air inlets of NVDSF are effective parameters on façade's thermal performance. The results showed that increasing the width of the cavity can improve the thermal performance of the facade. Increasing the cross section of the inlet and outlet ventilation, and thus increasing the air flow in the cavity, does not necessarily lead to improving the thermal performance of the façade. Using low emission glass compared to ordinary glass, especially for the outer wall of the double skin façade, reduces the heat flux passing through the inner glass surface of double skin facade into the building space by an average of 23.1%. Finally, for the optimal design of double skin facade, it is necessary to pay attention to all the variables affecting the facade performance and perform economic analysis to choose from the options with suitable thermal performance.

Key Words: Natural ventilation, Double skin facade, Air inlet and outlet, Low-e glass, CFD simulation