

## بررسی تأثیر نمای دوپوسته بر بار سرمایش و گرمایش فضاهای اداری شهر یزد

مریم سیف شجاعی<sup>۱</sup>، لیلا موسوی<sup>۲</sup>

### چکیده

به حداقل رساندن استفاده از سوخت‌های فسیلی و جایگزینی انرژی‌های تجدیدناپذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار کربن دی‌اکسید داشته باشد. با توجه به پتانسیل ایران برای بهره‌گیری از انرژی‌های خورشیدی، برای کاهش انتشار کربن دی‌اکسید در بخش ساختمان، می‌توان از سیستم‌های غیرفعال خورشیدی بهره گرفت. پوسته بیرونی ساختمان تبادل انرژی بین محیط بیرون و داخل را تعیین می‌کند و بر مصرف انرژی حاکم است. از این رو در این پژوهش به ظرفیت به‌کارگیری از نمای دوپوسته در کاهش مصرف انرژی برای کاربری اداری اقلیم گرم و خشک (یزد) پرداخته شده است. همچنین تلاش می‌شود با تغییر هندسه و متریکال نمای دوپوسته مدلی بهینه از نمای دو پوسته برای فضاهای اداری شهر یزد ارائه شود که موجب کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان شود. برای این منظور از شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است. مدل ارائه شده ۶۸٪ نسبت به حالت بدون نمای دوپوسته مجموع بار سرمایش و گرمایش را کاهش می‌دهد. اگر از پنل‌های فتوولتائیک در جبهه جنوبی نمای دوپوسته (مطابق هندسه ارائه شده) به عنوان سایه‌انداز استفاده شود؛ مجموع بار سرمایشی و گرمایشی ۶۱٪ کاهش می‌یابد و ۲/۷۷ برابر بار گرمایش و سرمایش انرژی تولید می‌شود. پنل‌های فتوولتائیک با زاویه ۱۰-۱۵ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی بهترین عملکرد را دارند.

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۴/۰۱

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۷/۱۵

### کلمات کلیدی:

هندسه نمای دوپوسته،  
متریکال نمای دوپوسته،  
کاهش بار سرمایش و  
گرمایش،  
شبیه‌سازی دیزاین بیلدر،  
ساختمان اداری یزد

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه یزد [maryam.seyf.75@gmail.com](mailto:maryam.seyf.75@gmail.com)

۲. استادیار دانشکده هنر و معماری، دانشگاه یزد

## ۱. مقدمه

انتشار دی اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، به چالشی جهانی تبدیل شده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از سال ۲۰۱۰ به بعد منطقه خاورمیانه نیز با رشد ۲/۶٪ در سال رتبه دوم رشد گازهای گلخانه‌ای به خود اختصاص داده است. کاهش انتشار دی اکسید کربن با جلوگیری از گرمایش کره زمین تأثیر مثبتی بر محیط زیست خواهد داشت. برای این منظور، منابع انرژی‌های تجدیدپذیر باید جایگزین منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر شوند [۴-۱]. به ازای افزایش هر ۱٪ در پیشرفت انرژی‌های تجدیدپذیر، شدت انتشار کربن بین ۰/۰۲۸٪ تا ۰/۰۴۳٪ کاهش می‌یابد [۵]. در کشور ایران به علت وجود منابع نفت و گاز به استفاده از منابع تجدیدپذیر کمتر پرداخته شده است. در صورتی که سالانه بیش از ۲۸۰ روز، در بیش از ۹۰٪ از مساحت ایران آفتابی می‌باشد و ظرفیت بالایی جهت بهره‌مندی از انرژی خورشید دارد [۶].

با توجه به اینکه ۳۰ تا ۴۰٪ مصرف انرژی مربوط به ساختمان‌ها می‌باشد [۷]، صرفه جویی انرژی از طریق بهره‌وری انرژی در ساختمان اهمیت زیادی دارد [۸]. با بهره‌مندی از تکنیک‌های غیرفعال خورشیدی در ساختمان می‌توان مصرف انرژی را ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش داد [۹]. تکنیک‌های غیرفعال قرن هاست در کره زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد، که پاسخ اقتصادی منطقی متناسب با محیط را نشان می‌دهد. سیستم‌های غیرفعال خورشیدی به عوامل اقلیمی بسیار حساس هستند، لذا نیاز به درک و سبب از عوامل آب و هوایی توسط طراح دارند. اولویت اول این سیستم‌ها کاهش مصرف انرژی با استفاده از تهویه طبیعی و انرژی خورشیدی است. در حال حاضر سیستم‌های مختلف غیر فعال مانند نماهای دویو سته، گلخانه خورشیدی، دیوارهای خورشیدی و سبز، دیوارهای تهویه شونده، جرم حرارتی جدار، دیوار ترومپ در نمای ساختمان استفاده می‌شود. [۱۰-۱۳].

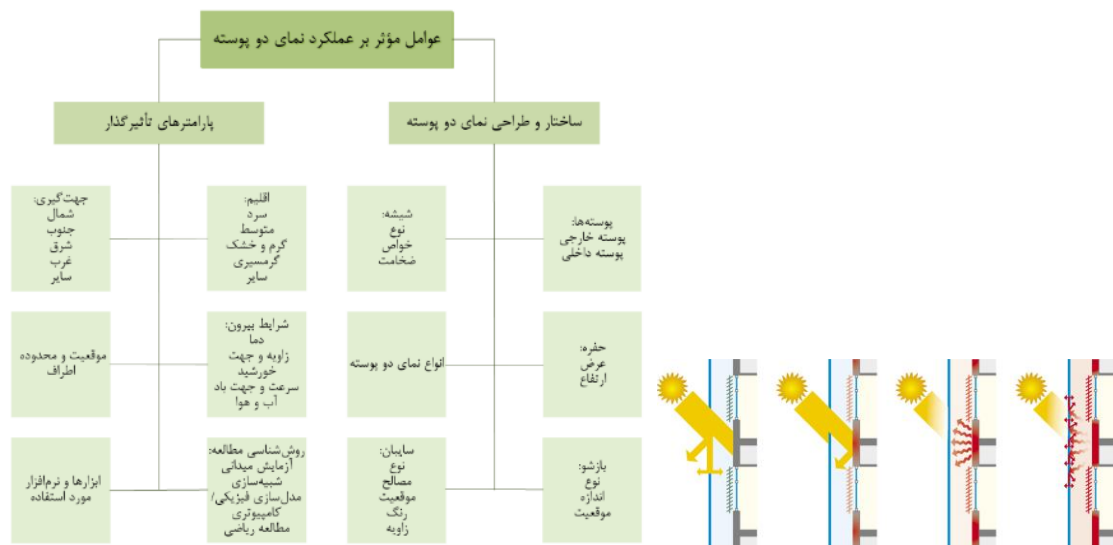
## ۲. مبانی نظری

پوسته بیرونی محافظ اولیه ساختمان در برابر شرایط نامساعد جوی است و بیشترین میزان اتلاف حرارت را دارد در نتیجه نرخ تبادل حرارت به محیط را تعیین می‌کند و می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی داشته باشد. همچنین به عنوان رابط حرارتی در تعیین دمای داخلی و میزان انرژی مورد نیاز برای حفظ آسایش حرارتی بسیار موثر می‌باشد. به حداقل رساندن انتقال حرارت از طریق پوسته ساختمان به طور موثر انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش ساختمان را کاهش می‌دهد. از طرفی نمای ساختمان بزرگترین قسمت پوشش ساختمان را تشکیل می‌دهد و انتظار می‌رود که آسایش حرارتی و صوتی را در داخل ساختمان فراهم کنند، بدون اینکه زیبایی شناسی ساختمان را به خطر بیندازند. نمای ساختمان تأثیر قابل توجهی بر هزینه‌های عملیاتی و در نتیجه هزینه‌های چرخه عمر ساختمان دارد. تصمیمات اتخاذ شده توسط طراحان و سازندگان در رابطه با سیستم نمای ساختمان می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر هزینه‌های عملیاتی و عملکرد ساختمان در طول چرخه عمر آن داشته باشد، از جمله: مصرف انرژی، انتشار کربن، هزینه‌های انرژی، راحتی صوتی و حفاظت در برابر آتش. اتخاذ تصمیمات صحیح در مورد سیستم نما علاوه بر جلوگیری از آلودگی محیط زیست، کمک قابل توجهی به اقتصاد ساختمان و بهره‌وری انرژی می‌کند [۱۱، ۱۴-۱۷] مدیریت صحیح پوسته ساختمان می‌تواند تقاضای انرژی ساختمان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۱۸]. از این رو طراحی دقیق پوشش ساختمان می‌تواند به طور قابل توجهی به دستیابی به اهداف گرمایش و سرمایش و بهبود بازده انرژی کمک کند. [۱۷].

عملکرد اصلی نما این است که به عنوان پوشش ساختمان عمل کند، سرما و آب را دور نگه می‌دارد و هوا و نور را وارد می‌کند [۱۹]. نما یکی از مهمترین عواملی است که در مصرف انرژی و پارامترهای آسایش (حرارتی، بصری و صوتی) هر ساختمان نقش دارد. نماهای پایدار باید سطوح بهینه آسایش را با استفاده از کمترین مقدار انرژی فراهم کنند. برای دستیابی به این عملکرد بالا، طراحان باید متغیرهای زیادی از جمله متغیرهای اقلیمی، رویکردهای طراحی مبتنی بر اقلیم، عملکرد حرارتی، نور روز، سایبان خورشیدی، تابش خیره کننده، انتقال رطوبت، مواد و تأثیرات محیطی آنها... را در نظر بگیرند [۲۰، ۲۱]. نماهای دو پوسته (DSF) به عنوان یک فناوری ساختمان غیرفعال

امیدوارکننده برای افزایش کارایی انرژی و بهبود آسایش حرارتی داخلی پیشنهاد می شوند [۲۲]. تقاضا برای صرفه‌جویی در انرژی، آسایش حرارتی و بصری برای پوشش ساختمان‌های جدید را می‌توان با نمای دو پوسته (DSF) برآورده کرد [۲۳]. نماهای دو پوسته (DSF) یک عنصر معماری جالب و مهم در ساختمان هستند زیرا از نظر بصری بسیار جذاب، و در عین حال می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به نماهای تک پوسته داشته باشند. DSF ها باید به درستی طراحی و اجرا شوند، در غیر این صورت ممکن است مزایای بالقوه آنها از بین برود. به همین دلیل، فرآیندهای فیزیکی که در یک DSF رخ می‌دهند باید به خوبی درک و پیش‌بینی شوند. با این حال، آنها بسیار پویا و در تعامل ثابت با یکدیگر هستند و به ویژگی‌های هندسی، ترموفیزیکی، نوری و آیرودینامیکی عناصر مختلف DSF بستگی دارند [۲۳، ۲۴]. نماهای دو پوسته در صورت طراحی مناسب می‌توانند آب و هوای داخل ساختمان را بهبود بخشند و مصرف انرژی را کاهش دهند [۱۹، ۲۵-۲۷]. هدف این نماها از یک سو افزایش آسایش داخلی و از سوی دیگر کاهش مصرف انرژی است [۲۸]. نماهای دو پوسته فرصت‌های قابل توجهی را برای کاهش مصرف انرژی و مدیریت منفعلانه شرایط آسایش ارائه می‌دهند و در عین حال سطوح وسیعی از شیشه را با سطح شفافیت بصری بالایی ممکن می‌سازند [۲۹]. این نماها شامل؛ نمای خارجی کاملاً شفاف، پوسته داخلی، و یک لایه هوا بین این دو می‌باشد [۳۰]. حفره میانی DSF برای جمع‌آوری یا تخلیه تابش خورشیدی جذب شده توسط نماها استفاده می‌شود، در نتیجه آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی را بهبود می‌بخشد و در عین حال انرژی برای گرمایش و سرمایش را حفظ می‌کند [۳۱]. حفره را می‌توان به طور فعال از طریق سیستم‌های مکانیکی و یا به طور طبیعی تهویه کرد. این حفره همچنین فرصت‌هایی را برای ترکیب سیستم‌های سایه‌انداز برای کاهش بهره‌برداری خورشیدی ورودی به ساختمان و همچنین مدیریت تابش خیره‌کننده و نفوذ نور روز ارائه می‌دهد لایه خارجی از بارندگی محافظت می‌کند و ورود نوبز خارجی را کاهش می‌دهد. لایه داخلی می‌تواند کاملاً بسته باشد تا عملکرد حرارتی را افزایش دهد یا برای فعال کردن تهویه غیرفعال به فضاهای داخلی باز باشد [۲۹].

عملکرد انرژی DSF عمدتاً به شرایط آب و هوایی بستگی دارد. همچنین، نوع، پیکربندی، خواص ترموفیزیکی مواد و استراتژی‌های کنترل (استفاده) تأثیر زیادی بر کارایی نما دارند [۳۲]. طراحی DSF شامل تصمیم‌گیری در مورد پارامترهای هندسی، انتخاب شیشه، استراتژی تهویه، سایه، روش‌های روز، زیبایی‌شناسی، بار باد، و انتظارات هزینه نگهداری و نظافت است. DSF بر چندین جنبه از مرحله طراحی یک ساختمان تأثیر دارد. به عنوان مثال، ویژگی‌های حرارتی، ویژگی‌های صوتی و نور روز در مرحله بهره‌برداری از ساختمان تحت تأثیر قرار می‌گیرند. علاوه بر این، از نظر ایمنی ساختمان، تعمیر و نگهداری انتشار آتش یا عایق حرارتی شیشه باید در نظر گرفته شود [۳۳].




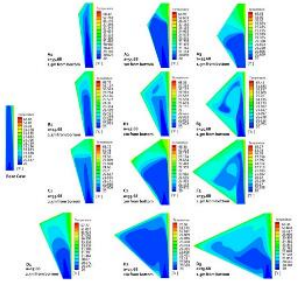
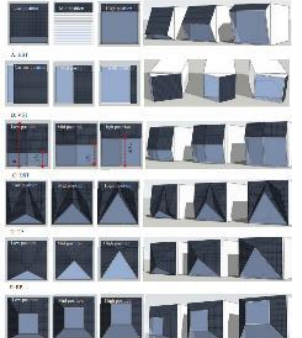
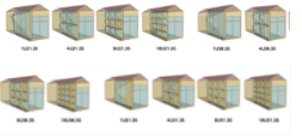
شکل ۱: اثر گلخانه‌ای در نمای دو پوسته و عوامل مؤثر بر عملکرد نمای دو پوسته [۲۷] و [۳۴]

یکی از ویژگی‌های عالی نمای دو پوسته، اثر گلخانه‌ای است (شکل-۱). عوامل مؤثر بر اثر گلخانه‌ای عبارتند از: سطح تابش خورشیدی، جهت‌گیری و استفاده از دستگاه‌های سایه‌انداز، نسبت دیوار به پنجره، نمای داخلی، سرعت باد، رنگ دستگاه‌های سایه‌انداز و نمای داخلی،

عمق حفره دو پوسته، نوع شیشه در نمای داخلی و باز شوها در دو پوسته [۳۴]. نسبت پنجره به دیوار، جهت گیری، و هندسه باز شدن از دیگر پارامترهای حیاتی طراحی هستند که به طور قابل توجهی بر عملکرد سیستم DSF تأثیر می‌گذارند [۳۵]. عوامل دیگری نیز بر عملکرد نمای دو پوسته تأثیر می‌گذارند که در نمودار ۱- خلاصه آورده شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مقالاتی که فرم نمای دو پوسته مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند آورده شده است.

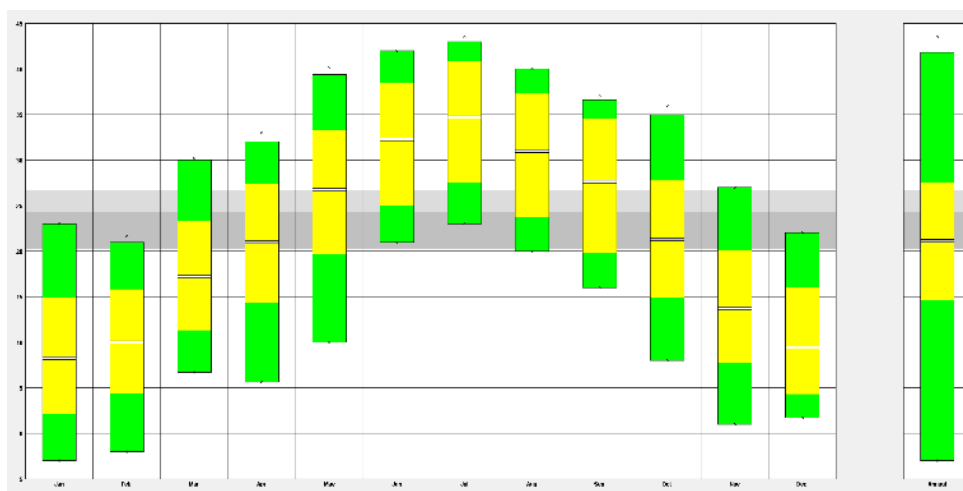
جدول ۱: مقالات صورت گرفته در رابطه با فرم نمای دوپوسته

مقاله	ابزار	مدل مورد بررسی	پارامترهای مورد بررسی	نتیجه	موقعیت
[۳۶]	انسپس فلوئنت		هفت زاویه شیب $\alpha$ ( $-10^\circ \leq \alpha \leq +10^\circ$ ) مطالعه شد. مطالعه بر روی هر دو انتقال حرارت و دینامیک جریان در حالت پایدار در یک نماینده کانال	زاویه شیب بر میدان‌های سرعت و فشار و جریان درون کانال تأثیر زیادی دارد. شیب $-10^\circ$ درجه اطمینان از بهترین مصالحه بین ملاحظات معماری و انتقال گرما و جرم که منجر به جریان تهویه مناسب در حفره با راندمان بالا برای پیش گرم کردن جریان تهویه می‌شود را تضمین می‌کند.	فرانسه
[۳۷]	انسپس فلوئنت		موارد تا شده در چهار نوع زاویه شیب ( $D=25.68$ )، $B=45.68$ ، $C=35.68$ و $A=55.68$ (درجه) در نظر گرفته شد.	بر اساس تأثیر زاویه شیب و موقعیت چین‌خوردگی بر توزیع دما و میدان‌های سرعت، دمای دیواره بیرونی (دیواره چین‌خورده) با افزایش عمق چین‌خوردگی و در عین حال کاهش زاویه شیب افزایش می‌یابد. برای همه موارد، دمای هوا در ناحیه مرکزی و سطوح تا شده در مقایسه با حالت پایه کمتر است. تغییر زاویه شیب از یک سطح عمودی، کارایی را افزایش می‌دهد. عمق چین باید در سطحی بلندتر از ارتفاع متوسط قرار گیرد تا همزمان افزایش دما و سرعت جریان بالاتری به دست آید.	تهران
[۳۸]			این مقاله بر روی یک فضای اداری منفرد و محیطی متمرکز است. این منطقه متمرکز در منطقه محیطی جهت جنوب، در بخش میانی یک ساختمان اداری دوازده طبقه با پلان طبقه ۴۲ متر در ۳۵ متر واقع شده است.	نتایج نشان می‌دهد که اگرچه انحراف از نمای تخت پایه به طور کلی منجر به افزایش بار گرمایشی می‌شود، این با کاهش بار خنک‌کننده و افزایش قابل توجه در پتانسیل تولید انرژی از سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه نما متعادل می‌شود. موقعیت چین و عمق حفره تأثیر بسزایی بر بار حرارتی و پتانسیل تولید انرژی دارد. تحت شرایط آب و هوایی مورد مطالعه (کالگری، آلبرتا، کانادا - ۵۲ درجه شمالی)، کل پتانسیل تولید برق سالانه، با پیکربندی‌های چندگانه می‌تواند تا ۸۰ درصد از نمای مسطح فراتر رود.	آلبرتا، کانادا
[۳۹]	انرژی پلاس		این مطالعه دو پیکربندی صفحه تاشو را انتخاب کرد که بر اساس یک هرم است. اولین پیکربندی، پیکربندی واحد هرم مثلثی (TP) است. پیکربندی دوم، پیکربندی واحد هرم مستطیلی (RP) است.	به طور کلی، بار گرمایشی برای تمام طرح‌های تا شده افزایش می‌یابد، در حالی که بار سرمایش کاهش می‌یابد. تولید برق، هم سطح کل و هم در واحد سطح BIPV، به طور قابل توجهی بالاتر از تولید نمای مسطح است. تولید سالانه به طور کلی با یک حفره بزرگتر به دلیل افزایش سطح PV افزایش می‌یابد. $U_{36.35}$ بالاترین بازده تولید سالانه PV را نشان می‌دهد. این عمدتاً به دلیل زاویه شیب این واحد است که زاویه شیب بهینه را دارد	دیجون، کره جنوبی

در ادامه به خلاصه‌ای از مقالات مروری در زمینه نمای دوپوسته اشاره شده است. سابیرینا و کنث در مقاله مروری در رابطه با تهویه طبیعی در نمای دو پوسته انجام داده‌اند که پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی و انرژی را بررسی می‌کند. طبق این پژوهش نما، ساختمان و سایت تأثیر قابل توجهی بر عملکرد نمای دوپوسته دارند [۴۰]. غفاریان حسینی و همکارانش در پژوهشی مزایا و چالش‌های نمای دوپوسته را مورد بررسی قرار داده‌اند و تحلیل جامعی از طراحی فعلی DSF ها، ویژگی ساخت و جنبه‌های فنی آن‌ها ارائه داده‌اند. طبق این پژوهش DSF ها تأثیرات مثبتی از جمله "کاهش مصرف انرژی"، "تهویه، جریان هوا و افزایش راحتی حرارتی"، "کنترل نور روز و تابش نور"، "عایق صدا، کاهش نویز و بهبود صوتی" و "افزایش کیفیت بصری و زیبایی" را دارند. نقطه ضعف کلیدی DSF ها هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری آن‌ها در مقایسه با نماهای تک شیشه‌ای است. از طرفی راهکارهایی برای مقابله با مشکلات گرمای بیش از حد DSF در فصول گرم باید در نظر گرفته شود [۲۲]. لانچینو و همکارانش به مرور ابزارهای شبیه‌سازی DSF ها انجام داده‌اند. در این پژوهش شکاف‌ها و محدودیت‌های فعلی ابزارهای شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است [۴۱]. در پژوهشی دیگر، تأثیر ویژگی‌های ساختمانی نمای دو پوسته بر انتقال حرارت و رفتار دینامیکی سیال مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این پژوهش سیستم سایه‌زنی تأثیرگذارترین عنصر ساختاری را در کنترل رفتار حرارتی DSF تهویه‌شده به‌طور طبیعی و مکانیکی نشان می‌دهد. شیشه دومین عنصر ساختاری تأثیرگذار است. مسیر جریان هوا، ابعاد حفره و اندازه و هندسه دهانه‌ها سایر عوامل مرتبط هستند و برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی DSF باید به دقت هماهنگ شوند [۲۴]. مطالعه دیگر قابلیت حیات نماهای دوپوسته در قرن ۲۱ مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به عنوان خلاصه‌ای از تحقیقات نمای دوپوسته می‌باشد و تأثیر عوامل مؤثر بر عملکرد حرارتی را مورد بررسی قرار می‌دهد [۴۲].

### ۳. روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا به بررسی ادبیات موضوع با استفاده از منابع موجود پرداخته شده است. شهر یزد در ۳۱° عرض و ۵۴° طول جغرافیایی واقع شده است. اقلیم شهر یزد با استفاده از داده‌های آب و هوایی (۲۰۰۷-۲۰۲۱) با استفاده از نرم افزار کلایمت کانسولنت ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. براساس شکل ۲ میانگین دمای شهر یزد در ماه‌های فروردین و آبان در محدوده آسایش قرار دارد. از فرودین تا آبان نیاز به بار سرمایش و از آبان تا فروردین نیاز به بار گرمایش دارد. لذا در این پژوهش سعی می‌شود با طراحی نمای دوپوسته مناسب، بار سرمایش و گرمایش کاهش یابد. برای این منظور از نرم افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار بار سرمایشی و گرمایشی برای مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و به کمک تحلیل نتایج مدل بهینه انتخاب شده است.



شکل ۲: میانگین دمای هر ماه شهر یزد

## ابزار شبیه‌سازی

ابزارهای شبیه‌سازی انرژی به طور فزاینده‌ای برای تحلیل عملکرد انرژی ساختمان‌ها و آسایش حرارتی ساکنان آنها استفاده می‌شوند. قابلیت اطمینان تبادل داده و رابط‌های ساده و کاربرپسند جنبه‌های اصلی استفاده عملی از این ابزارها هستند [۴۳]. نرم افزار دیزاین بیلدر ۴ دارای یک محیط مدل سازی کاربر پسند است و از برنامه شبیه سازی پویا انرژی پلاس ۵ که توسط D.J تهیه شده است استفاده می‌کند [۴۴]. با استفاده از دیزاین بیلدر، می‌توان مطالعات دقیق مربوط به توده‌های حرارتی و جریان‌های تهویه طبیعی را تحت کنترل برنامه‌های عملکرد پویا (انرژی پلاس) با توجه به شرایط هواشناسی خارجی انجام داد [۴۵]. این نرم افزار مصرف انرژی ساختمان (کیلووات ساعت در سال) شامل سرمایش، گرمایش، روشنایی و مصرف آب گرم خانگی را محاسبه می‌کند. این نرم افزار همچنین عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک و همچنین سطوح نور طبیعی را از طریق شبیه‌سازی نور روز محاسبه می‌کند. انرژی پلاس به عنوان یک ابزار معتبر برای خروجی گرفتن استفاده می‌شود که از استاندارد ANSI/ASHRAE 140-2011 و IEA پیروی می‌کند [۴۶]. در مطالعات مختلف تأیید و ثابت شده است که دیزاین بیلدر خطای بسیار کمی دارد علاوه بر این، دیزاین بیلدر توسط LEED تأیید شده است و این ابزار الزامات روش رتبه‌بندی عملکرد پایه ASHRAE 90.1 2007 و ۲۰۱۰ را برآورده می‌کند [۴۷]. در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای توسط یوسف عبا و همکاران به منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار دیزاین بیلدر در مدرسه‌ای در شهر بائوچی نیجیریه صورت گرفته است. در این مطالعه ابتدا از ۱۸ تا ۲۱ سپتامبر اندازه‌گیری میدانی صورت گرفته و سپس با نتایج شبیه‌سازی در دیزاین بیلدر مقایسه شده است. بر اساس این پژوهش مشخص شد که می‌توان از دیزاین بیلدر برای ارزیابی عملکرد حرارتی سقف و همچنین پیش‌بینی دمای هوای داخلی ساختمان استفاده کرد [۴۸]. در مطالعه‌ای در شهر پورتو برای ساختمان با نمای دوپوسته صورت گرفته است که پارامترهای عمق شکاف، مسیر جریان هوا و جهت‌گیری ساختمان را با استفاده از دیزاین بیلدر مورد بررسی قرار گرفته است [۴۹]. در مطالعه دیگری که در شهر توکیو (ژاپن) صورت گرفته است؛ از نرم‌افزار دیزاین بیلدر برای تعیین تأثیر نمای دوپوسته بر مصرف انرژی استفاده شده است [۵۰].

## مشخصات مدل مورد بررسی

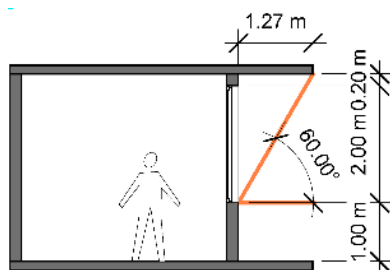
مدل پایه اتاقی با ابعاد  $۳,۲۵ \times ۳,۵$  و کاربری اداری در نظر گرفته شده است. که در جبهه جنوبی نمای دو پوسته قرار دارد که از سه وجه دیگر، سقف و کف در مجاورت فضای کنترل شده قرار دارد تا تنها تأثیر جدار در ارتباط با نمای دوپوسته لحاظ شود. مشخصات این جدار در جدول ۲ آورده شده است. در مبحث ۱۹ حداقل مقاومت حرارتی برای جدار در ارتباط با فضای کنترل نشده برای ساختمان بسیار کم انرژی  $۱/۶$  می‌باشد. ابعاد پنجره جدار اول  $۲,۲۵ \times ۲$  و نسبت پنجره به دیوار (WWR)  $۴۳\%$  می‌باشد. عمق حفره بر اساس سایه بان مورد نیاز طبق مبحث ۱۹ برای شهر یزد در نظر گرفته شده است (شکل ۳). برنامه زمانبندی برای کاربری اداری که ۵ روز در هفته فعالیت دارد، به طور دقیق از پیوست ۵ مبحث ۱۹ به نرم‌افزار وارد شده است. سیستم مکانیکی مکمل فن کویل می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی جدار در ارتباط با نمای دوپوسته

U-value (W/m <sup>2</sup> K)	مقاوت حرارتی (m <sup>2</sup> K/W)	ضخامت (cm)	لایه بندی جدار در ارتباط با نمای دوپوسته
۰/۵۶۰	۱/۷۸۷	۵	آجر نما (لایه بیرونی)
		۳۰	مصالح بنایی (لایه میانی)
		۲	اندود گچ (لایه داخلی)

<sup>4</sup> Design Builder

<sup>5</sup> Energy Plus



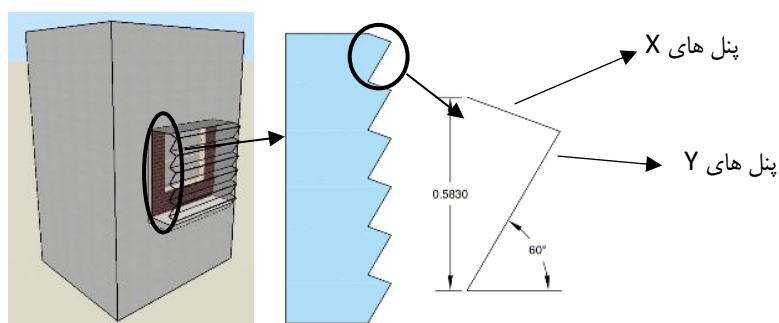
شکل ۳: عمق سایبان

#### ۴. بررسی و تحلیل نتایج

پس از مدلسازی دقیق اتاق بر اساس استانداردهای موجود، هفت هندسه مختلف برای نمای دوپوسته در نظر گرفته شده است. در تمامی مدل‌های بررسی شده این پژوهش، پنجره داخلی و جدار خارجی به طور کامل بسته در نظر گرفته شده است در جدول ۳ بار سرمایش و گرمایش برای هفت هندسه از نمای دو پوسته و حالتی که نمای دو پوسته وجود نداشته باشد محاسبه شده است. در این آنالیز، تمامی اجزای نمای دو پوسته به غیر سقف و کف از شیشه هستند. بر اساس نتایج جدول ۳ تمامی مدل‌های نمای دو پوسته از حالت بدون نمای دو پوسته عملکرد بهتری دارند. در مجموع بار گرمایش و سرمایش، بهترین عملکرد مربوط به هندسه هفتم می‌باشد. مطابق شکل ۴ زاویه شیب پنل، ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. (این زاویه مطابق پرتو خورشید در مبحث ۱۹ می‌باشد).

جدول ۳: مقایسه هندسه‌های مختلف نمای دو پوسته




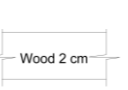
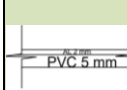
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱/۴۱	۱۱/۳۶	۱/۸۷	۰/۱۶	۱/۰۱	۰/۴۶	۰/۰۳	۰	بار گرمایش (گاز) kwh
۸۳۳/۶۹	۷۱۱/۴۳	۸۵۶/۵۰	۸۶۴/۳۱	۷۸۸/۸۸	۹۴۱/۴۳	۸۴۱/۷۴	۱۰۹۷/۲۹	بار سرمایش (برق) kwh



شکل ۴: هندسه نمای دو پوسته با عملکرد بهینه

در ادامه متریکال نمای دوپوسته برای مدل شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴ متریکال سطوح جانبی نمای دوپوسته بررسی شده است. سه حالت شفاف و کدر و با سایبان برای این سطوح در نظر گرفته شده است. اگر پنل های جانبی کدر باشند و نوری عبور نکند عملکرد سیستم نما بسیار بالا می رود. و در بین متریکال مورد بررسی پنل گچی و پنل آلومینیومی (ترمال بریک) عملکرد بهتری دارند. که با توجه به مقاومت بهتر آلومینیوم در برابر رطوبت در آنالیزهای بعدی از این متریکال در سطوح جانبی نمای دو پوسته استفاده شده است.

جدول ۴: متریکال سطوح جانبی نمای دوپوسته

کاملاً شیشه		سایبان (مطابق مبحث ۱۹) غرب: م.ع شرق ۶۰ افقی	کاملاً بسته					
دو جداره	ترموکرمیک	(مطابق مبحث ۱۹) غرب: م.ع شرق ۶۰ افقی						متریکال
۱۱/۳۶	۱۰/۹۶	۱۱/۹۱	۱۳/۵۱	۹/۶۵	۲۸/۰۹	۱۸/۰۸	۲۶/۱۵	بار گرمایش (گاز) kwh
۷۱۱/۴۳	۶۹۰/۰۳	۶۷۱/۳۳	۵۹۸/۴۵	۶۱۸/۱۳	۵۵۶/۰۳	۶۰۷/۳۳	۵۶۱/۸۸	بار سرمایش (برق) kwh

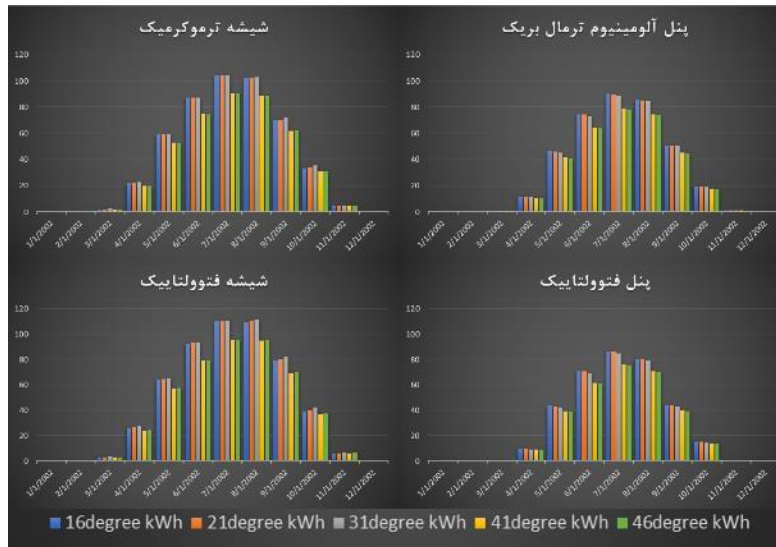
جدول ۵ متریکال پنل های Y (۶۰ در جبهه جنوب) مورد بررسی قرار گرفته است که براساس نتایج شیشه های ترموکرمیک و بعد از آن شیشه سه جداره کم گسیل مناسب هستند. در ادامه روند پژوهش متریکال پنل های Y شیشه ترموکرمیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۵: متریکال پنل شیشه ای ۶۰ جبهه جنوبی نمای دوپوسته

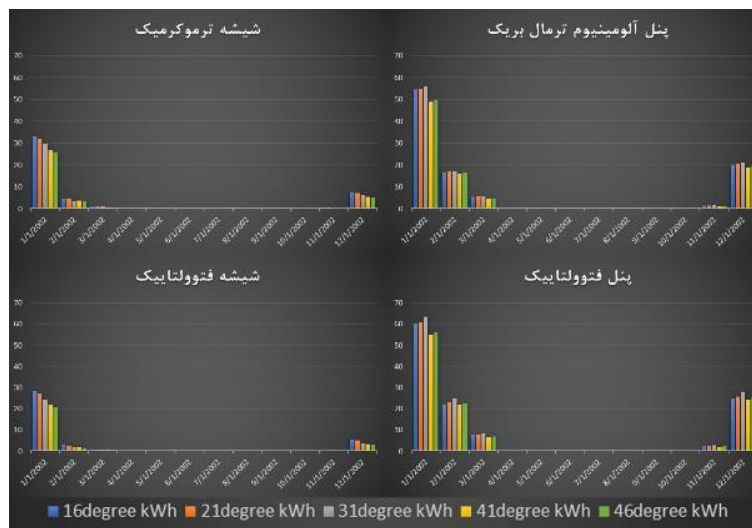
پنل شیشه ای با زاویه ۶۰					
تک جداره LOE	دو جداره معمولی	دو جداره LOE	سه جداره LOE	ترموکرمیک	نوع شیشه
۲۴/۳۳	۲۶/۱۵	۳۲/۳۷	۳۵/۱۸	۳۸/۱۳	بار گرمایش (گاز) kwh
۵۶۴/۷۶	۵۶۱/۸۸	۵۴۴/۷۹	۵۳۷/۴۰	۵۲۰	بار سرمایش (برق) kwh

در نهایت متریکال و زاویه پنل های X مشخص شده در شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیزهای صورت گرفته برای چهار متریکال (شیشه ترموکرمیک، پنل آلومینیوم ترمال بریک، شیشه فتوولتاییک و پنل فتوولتاییک) در ۵ زاویه (۱۶°، ۲۱°، ۳۱°، ۴۱°، ۴۶°) است که نتایج به شرح زیر می باشد.





شکل ۵: مقایسه بار سرمایشی در زوایا و متریال مختلف به صورت ماهانه برای پنل X



شکل ۶: مقایسه بار گرمایشی در زوایا و متریال مختلف به صورت ماهانه برای پنل X

جدول ۶: مقایسه بار سرمایشی سالانه برای متریال و زوایای مختلف برای پنل X

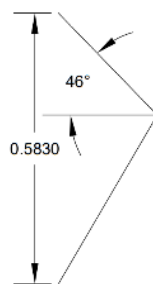
پنل فتولتاییک	شیشه فتولتاییک	پنل آلومینیوم	شیشه ترموکرمیک	
۳۵۰/۶۳	۵۲۸/۵۲	۳۷۸/۵۱	۴۸۲/۴۷۹	۱۶ درجه
۳۸۴/۴۱	۵۳۳/۱۲۹	۳۷۶/۸۹	۴۸۴/۶۴۲	۲۱ درجه
۳۴۱/۵۹	۵۴۱/۵۷	۳۷۲/۳۵	۴۸۹/۵۵۲	۳۱ درجه
۳۰۹/۵۳	۴۶۴/۶۹	۳۳۲/۵۳	۴۲۳/۹۲۴	۴۱ درجه
۳۰۶/۴۵	۴۶۷/۸۵	۳۲۹/۷۸	۴۲۴/۶۸۳	۴۶ درجه

جدول ۷: مقایسه بار گرمایشی سالانه برای مترپال و زوایای مختلف برای پنل X

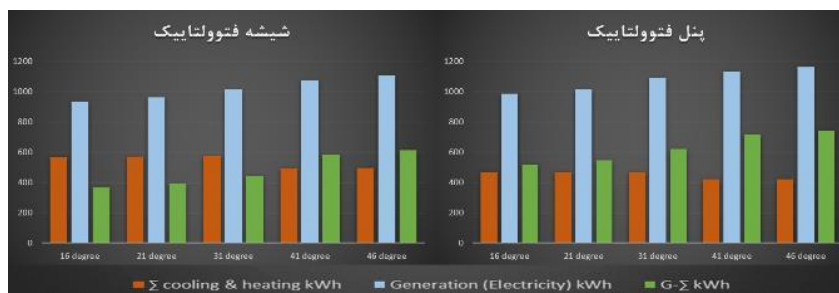
پنل فتوولتاییک	شیشه فتوولتاییک	پنل آلومینیوم	شیشه ترموکرمیک	
۱۱۶/۷۶	۳۷/۴۱	۹۷/۷۸	۴۶/۰۵	۱۶ درجه
۱۱۹/۳۰	۳۵/۰۶	۹۸/۸۲	۴۴/۲۳	۲۱ درجه
۱۲۶/۶۶	۳۰/۰۰	۱۰۱/۴۸	۳۹/۸۳	۳۱ درجه
۱۰۹/۳۱	۲۷/۰۰	۸۹/۰۹	۳۶/۰۱	۴۱ درجه
۱۱۲/۶۶	۲۵/۲۰	۹۱/۲۱	۳۴/۷۱	۴۶ درجه

از بررسی اشکال ۵ و ۶ و همچنین جدول‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که در بین ۵ زاویه بررسی شده، زاویه ۴۶° پنل برای تمامی مترپال‌ها و چه از نظر بار گرمایشی و چه از نظر بار سرمایشی عملکرد بهتری نسبت به سایر زوایا دارد (شکل ۶). از لحاظ مترپال، اگر پنل‌ها سایه‌انداز باشند در کاهش بار سرمایش عملکرد بهتری دارند اما بار گرمایشی بیشتری نسبت به پنل‌های شفاف دارند. بنابراین در فصل تابستان پنل‌های شیشه‌ای و در سایر فصل‌ها پنل‌های سایه‌انداز مناسب هستند.

بر اساس نمودار ۵- فتوولتاییک‌ها در زاویه ۴۶° بیشترین کارایی را دارند. در این نمودار اختلاف بین انرژی تولید شده و مجموع بار گرمایشی و سرمایشی مورد بررسی قرار گرفته که پنل‌های فتوولتاییک با زاویه ۴۶° بهترین عملکرد را دارد.

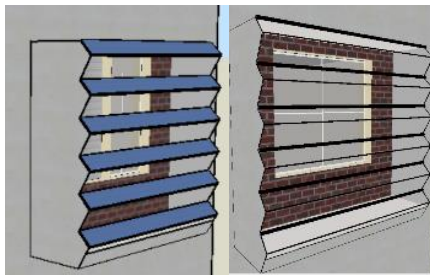


شکل ۶: زاویه بهینه پنل‌های X



شکل ۷: میزان انرژی مصرفی و تولید شده با استفاده از پنل و یا شیشه فتوولتاییک در زوایای مختلف

حال اگر پنل‌های X با زاویه ۴۶° و شیشه‌های دوجداره معمولی با سایه‌انداز بیرونی باشند به گونه‌ای که در ماه‌های گرم سال سایه‌اندازی صورت گیرد و در زمستان سایه‌بان جمع شود، (شکل ۸) بار سرمایشی سالانه برابر با ۳۲۱/۹ و بار گرمایشی سالانه ۲۷/۶۹ می‌باشد. آنالیز ماهانه در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۸: سایه بان جمع شو (به صورت ریلی) برای پنل های X



شکل ۹: بار سرمایش و گرمایش در صورت استفاده از سایبان های جمع شو در جبهه جنوب

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

باتوجه به آنالیزهای صورت گرفته به کارگیری نمای دوپو سته با سایه اندازی منا سب در اقلیم گرم و خشک مانند یزد، می تواند در کاهش مصرف انرژی مفید باشد.

هند سه نمای دوپو سته می تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در این پژوهش با انتخاب هند سه منا سب ۳۴٪ نسبت به حالت بدون نمای دوپو سته مصرف انرژی کاهش یافته است. و مجدداً با اصلاح هند سه و تغییر زاویه در پنل ها ۱۷/۶٪ مصرف انرژی کاهش یافته است.

انتخاب متریا ل از نظر شفاف یا کدر بودن می تواند تأثیر قابل توجهی در بار سرمایشی و گرمایشی داشته باشد. در این پژوهش با تغییر متریا ل سطوح جانبی از شفاف به کدر ۱۸/۶٪ مصرف انرژی نسبت به حالت شفاف کاهش یافته است.

اگر پنل های جبهه جنوبی که با زاویه ۶۰° هستند از شیشه های ترموکرمیک با شند ۴٪ نسبت به شیشه دوجداره معمولی مصرف انرژی کاهش می یابد. و اگر برای پنل های ۴۶° جبهه جنوبی سایبان جمع شو طراحی شود که در زمستان مانع عبور نور خورشید نشود و در سایر ماه ها سایه اندازی ایجاد کند ۳۷٪ نسبت به بدون سایه بان بار مصرفی کاهش می یابد.

بهترین زاویه پنل های فتوولتاییک ۱۰-۱۵ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی می باشد.

در این پژوهش اگر پنل فتوولتاییک با زاویه ۴۶° (۱۵° بیشتر از عرض جغرافیایی) و ۴۸٪ از سطح کف در جبهه جنوبی نمای دوپوسته قرار گیرد (به عنوان سایه انداز)، ۲/۷۷ برابر بار سرمایش و گرمایش انرژی برق تولید می شود. بار سرمایش ۷۲٪ کاهش می یابد اما بار گرمایش افزایش می یابد و مجموع بار سرمایشی و گرمایشی ۶۱٪ کاهش می یابد.

استفاده از پنل فتوولتاییک به عنوان سایه انداز در جبهه جنوبی نمای دوپوسته اگرچه بار سرمایش را کاهش می دهد اما باعث افزایش بار گرمایشی در زمستان می شود. اما در مجموع مصرف انرژی را کاهش می دهند و انرژی تولید شده بار مصرفی را جبران می کند.

1. Hong, J., et al., *Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China*. Journal of cleaner production, 2015. **103**: p. 249-259.
2. Lamb, W.F., et al., *A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018*. 2021. **16**(7): p. 073005.
3. Razmjoo, A., et al., *A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area*. 2021. **164**: p. 46-57.
4. Sebestyén, V.J.R. and S.E. Reviews, *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants*. 2021. **151**: p. 111626.
5. Zheng, H., M. Song, and Z.J.E. Shen, *The evolution of renewable energy and its impact on carbon reduction in China*. 2021. **237**: p. 121639.
6. Alamdari, P., et al., *Solar energy potentials in Iran: A review*. 2013. **21**: p. 778-788.
7. Li, X., et al., *Energetic and economic evaluation of hybrid solar energy systems in a residential net-zero energy building*. 2019. **254**: p. 113709.
8. Chel, A. and G. Kaushik, *Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building*. Alexandria Engineering Journal, 2018. **57**(2): p. 655-669.
9. Sharma, A., A. Shukla, and L. Aye, *Low Carbon Energy Supply: Trends, Technology, Management*. 2018: Springer.
10. Benoudjafer, I., I.J.J.o.F. Benoudjafer, and A. Sciences, *Innovation façade for an energy performance and thermal comfort of building in hot and dry climate*. 2020. **12**(3): p. 1350-1365.
11. Sadineni, S.B., et al., *Passive building energy savings: A review of building envelope components*. 2011. **15**(8): p. 3617-3631.
12. Chen, C., et al., *Theoretical and experimental study on selection of physical dimensions of passive solar greenhouses for enhanced energy performance*. 2019. **191**: p. 46-56.
13. Dabaieh, M. and A.J.S.E. Elbably, *Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates*. 2015. **122**: p. 820-833.
14. Bostancioglu, E., N.P.J.A.E. Onder, and D. Management, *Applying analytic hierarchy process to the evaluation of double skin façades*. 2019. **15**(1): p. 66-82.
15. Madadi, A., et al., *Dual-purpose model of energy consumption-construction cost to evaluate the construction methods of the outer shell of residential buildings: A real case study*. 2021. **14**(1): p. 35-50.
16. Kheiri, F.J.R. and S.E. Reviews, *A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design*. 2018. **92**: p. 897-920.
17. Sozer, H.J.B. and environment, *Improving energy efficiency through the design of the building envelope*. 2010. **45**(12): p. 2581-2593.
18. Radwan, G.A. and N.J.P.E.S. Osama, *Biomimicry, an approach, for energy effecient building skin design*. 2016. **34**: p. 178-189.
19. Hendriksen, O.J., et al., *Double Skin Façades—Fashion or a step towards sustainable buildings*. 2000. **2000**.
20. Aksamija, A. *High-performance building envelopes: design methods for energy-efficient facades*. in *Proceedings of the BEST4 Conference, Kansas City, MO, USA*. 2015.
21. Bostancioglu, E.J.A.E. and D. Management, *Double skin façade assessment by fuzzy AHP and comparison with AHP*. 2021. **17**(1-2): p. 110-130.
22. Ghaffarianhoseini, A., et al., *Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs)*. 2016. **60**: p. 1052-1065.
23. Pasut, W. and M.J.A.T.E. De Carli, *Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin façade*. 2012. **37**: p. 267-274.
24. Jankovic, A., F.J.B. Goia, and Environment, *Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behaviour*. 2021. **196**: p. 107796.
25. Poirazis, H., *Double skin façades for office buildings*. 2004, Report EBD.
26. Ahmed, M.M., et al., *Double skin façade: the state of art on building energy efficiency*. 2016. **4**(1): p. 84-89.
27. Al-awag, E. and I. Wahab. *Perspectives in double-skin façade (DSF) advantages and disadvantages*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. IOP Publishing.
28. Safer, N., M. Woloszyn, and J.J.J.S.E. Roux, *Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind*. 2005. **79**(2): p. 193-203.

29. Hollingsbee, T., J. Kooymans, and T. McDonnell. *Designing the right double skin façade*. in *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*. 2009.
30. Hashemi, N., et al., *Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate*. 2010. **42**(10): p. 1823-1832.
31. Zhou, J., Y.J.R. Chen, and S.E. Reviews, *A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China*. 2010. **14**(4): p. 1321-1328.
32. Anđelković, A.S., et al., *Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin façade*. 2015. **86**: p. 766-781.
33. Shameri, M., et al., *Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving*. 2011. **15**(3): p. 1468-1475.
34. Gratia, E., A.J.E. De Herde, and buildings, *Greenhouse effect in double-skin facade*. 2007. **39**(2): p. 199-211.
35. Preet, S., J. Mathur, and S.J.S.E. Mathur, *Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behavior: A comprehensive review*. 2022. **236**: p. 249-279.
36. Kimouche, N., et al., *Effect of inclination angle of the adiabatic wall in asymmetrically heated channel on natural convection: Application to double-skin façade design*. 2017. **12**: p. 171-177.
37. Ahmadi, J., M. Mahdavejad, and S.J.I.J.o.S.E. Asadi, *Folded double-skin façade (DSF): in-depth evaluation of fold influence on the thermal and flow performance in naturally ventilated channels*. 2022. **41**(4): p. 382-411.
38. Hachem, C., M.J.E. Elsayed, and Buildings, *Patterns of façade system design for enhanced energy performance of multistory buildings*. 2016. **130**: p. 366-377.
39. Tien, T.N., et al., *Comparative investigation of double-skin façade (DSF) systems design for enhanced energy performance of commercial building*.
40. Barbosa, S., K.J.R. Ip, and S.E. Reviews, *Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review*. 2014. **40**: p. 1019-1029.
41. Catto Lucchino, E., et al. *Modelling of double skin facades in whole-building energy simulation tools: A review of current practices and possibilities for future developments*. in *Building Simulation*. 2019. Springer.
42. Pelletier, K., et al., *The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration*. 2022: p. 109870.
43. Maile, T., M. Fischer, and V.J.C.f.I.F.E.W.P. Bazjanac, *Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective*. 2007. **107**: p. 1-49.
44. Ran, J., M.J.S.c. Tang, and society, *Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions*. 2018. **38**: p. 466-475.
45. Laurini, E., et al., *Passive ventilation for indoor comfort: A comparison of results from monitoring and simulation for a historical building in a temperate climate*. 2018. **10**(5): p. 1565.
46. Italos, C., et al., *Energy Renovation of an existing building in Limassol, Cyprus, with double skin façade and building integration of active solar energy systems: Energy performance and Life Cycle Analysis*.
47. Al-Sakkaf, A., et al., *Studying Energy Performance and Thermal Comfort Conditions in Heritage Buildings: A Case Study of Murabba Palace*. 2021. **13**(21): p. 12250.
48. Abba, H.Y., et al., *VALIDATION OF DESIGNBUILDER SIMULATION ACCURACY USING FIELD MEASURED DATA OF INDOOR AIR TEMPERATURE IN A CLASSROOM BUILDING*. 2022. **7**(27): p. 171-178.
49. Alberto, A., N.M. Ramos, and R.M.J.J.o.B.E. Almeida, *Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries*. 2017. **12**: p. 87-98.
50. Srisamranrungruang, T., K.J.E. Hiyama, and Buildings, *Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF)*. 2020. **210**: p. 109765.

## Investigating the effect of double skin facade on the cooling and heating load of office spaces in Yazd city

**Maryam Seyf Shojaei**

Department of Architecture, School of Arts & Architecture, Yazd University, Yazd, Iran  
maryam.seyf.75@gmail.com  
(Corresponding Author)

**Leila Moosavi**

Department of Architecture, School of Arts & Architecture, Yazd University, Yazd, Iran  
leilamoosavi@yahoo.com

---

### Abstract:

Minimizing the use of fossil fuels and replacing them with non-renewable energies can play an essential role in reducing carbon dioxide emissions. Considering Iran's potential for using solar energy, passive solar systems can be used to reduce carbon dioxide emissions in the building sector. The outer skin of the building determines the energy exchange between the outside and inside environments and governs energy consumption. Therefore, in this research, the potential of using a double-skin facade to reduce energy consumption for office use in a hot and dry climate (Yazd) has been discussed. Also, by changing the geometry and material of the double-skin facade, an optimal model of the double-skin facade for the office spaces of Yazd City will be presented, which will reduce the cooling and heating loads of the building. For this purpose, simulation has been used in the Design Builder software. The presented model reduces the total load of cooling and heating by 68% compared to the case without a double skin-facade. If photovoltaic panels are used on the south front of the double-skin facade (according to the geometry provided) as shading, the total cooling and heating load is reduced by 61%, and 2.77 times the heating and cooling load energy is produced. Photovoltaic panels work best at an angle 10–15 degrees higher than latitude.

### Keywords:

Double-skin facade geometry,  
Double-skin facade material,  
Reducing cooling and heating loads,  
Design Builder simulation,  
Yazd office building