Journal of Safe City

Online ISSN: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

Research Paper

Analysis of the Impact of Double-Skin Facade Materials on Energy Consumption Optimization in the Design of Solar Residential Buildings in Cold Mountainous Climates

Roya Sadeghi Fereshteh

Assistant Professor Department of Architecture Faculty of Dr. Ali Eqbali Sustainable Development, University College of Omran_Toseeh, Hamedan, Iran

Received: 21 April 2025 Received in revised form:4 June 2025 Accepted: 5 August 2025 p.p:151 –168

https://doi.org/ 10.22034/ispdrc.2025.2058561.1180

ABSTRACT

This study examines the impact of double-skin facade materials on optimizing energy consumption in solar residential buildings in cold mountainous climates. These regions face challenges such as low temperatures and cold winds, making double-skin facades a sustainable solution to reduce energy use and improve thermal comfort. The research explores how material selection in double-skin facades can enhance energy efficiency and thermal performance in such environments. The methodology integrates energy simulation and empirical analysis, utilizing software like Energy Plus and Design Builder to model key variables. These include the properties of double-skin facade materials (type, thickness, structure, and thermal capabilities), building orientation, solar radiation, and climatic conditions. The study evaluates their effects on energy consumption and indoor thermal comfort. Findings reveal that optimized materials in double-skin facades significantly reduce energy use in cold climates. Materials with high thermal insulation and effective solar absorption minimize heat loss in winter and prevent overheating in summer. Proper building orientation and natural ventilation further improve thermal performance. This research underscores the importance of material selection in double-skin facades for achieving energy efficiency and thermal comfort in solar residential buildings in cold mountainous regions. It offers valuable insights for architects and designers aiming to create sustainable, energy-efficient structures in similar climates.

Keywords: Double-Ski Facade, Energy Consumption, Solar Residential Building Design, Cold Climate, Energy Simulation

Corresponding author (Email: r.sadeghi@atr.ac.ir)

نشریه علمی شهـــر ایمـــن
شاپا الکترونیکی: 556X-2676
Journal Homepage: www.ispdrc.ir

مقاله پژوهشی

تحلیل تأثیر مصالح دوپوسته نما بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌های مسکونی خورشیدی در اقلیم سرد کوهستانی

رویا صادقی فرشته[1] گروه‌معماری،دانشکده توسعه و آبادانی دکتراقبالی،موسسه آموزش‌عالی‌عمران‌و توسعه،همدان،ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ ص.ص ۱۶۸-۱۵۱

https://doi.org/ 10.22034/ispdrc.2025.2058561.1180

چکیده:

در سال‌های اخیر، سیستم‌های نمای دوپوسته به عنوان یکی از راهکارهای نوین و مؤثر در ارتقاء پایداری و بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها مورد توجه معماران و مهندسان قرار گرفته‌اند. نماهای دوپوسته با ایجاد یک لایه محافظ اضافی، علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی ایفا می‌کنند.هدف این پژوهش بررسی تأثیر مصالح دوپوسته نما بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌های مسکونی خورشیدی در اقلیم سرد کوهستانی است. با توجه به چالش‌های اقلیمی این مناطق، مانند دمای پایین و وزش بادهای سرد، استفاده از سیستم‌های نمای دوپوسته به عنوان راهکاری پایدار برای کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق به دنبال پاسخ به این سوال است که چگونه انتخاب مصالح مناسب در نماهای دوپوسته می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها در این اقلیم کمک کند. روش‌شناسی این پژوهش ترکیبی از شبیه‌سازی انرژی و تحلیل تجربی است. برای این منظور، از نرم‌افزارهای تخصصی شبیه‌سازی انرژی مانند EnergyPlus و DesignBuilder استفاده شده است. متغیرهای اصلی شامل ویژگی‌های مصالح دوپوسته (نوع، ضخامت، ساختار و قابلیت جذب و دفع گرما)، جهت‌گیری ساختمان، میزان تابش خورشیدی و شرایط اقلیمی است. این عوامل به منظور ارزیابی تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی داخلی ساختمان مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج اصلی این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مصالح بهینه در نماهای دوپوسته می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف انرژی را در ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد کوهستانی کاهش دهد. به‌ویژه، مصالحی با قابلیت عایق‌بندی حرارتی بالا و جذب مناسب انرژی خورشیدی، بیشترین تأثیر را در کاهش اتلاف انرژی در زمستان و جلوگیری از افزایش دمای داخلی در تابستان دارند.

واژگان کلیدی: نمای دوپوسته، مصرف انرژی، طراحی ساختمان مسکونی خورشیدی، اقلیم سرد، شبیه‌سازی انرژی

۱. نویسنده مسئول(Email: r.sadeghi@atr.ac.ir)

مقدمه

اقلیم سرد کوهستانی به دلیل دمای پایین در فصول سرد سال، نوسانات شدید دمایی و وزش بادهای سرد، از جمله چالش‌برانگیزترین مناطق برای طراحی ساختمان‌های مسکونی به شمار می‌آید. در این اقلیم، مصرف انرژی برای گرمایش بسیار بالاست و طراحی غیراصولی می‌تواند منجر به اتلاف قابل توجه انرژی شود. استفاده از راهکارهای پایدار در طراحی معماری، مانند بهره‌گیری از سیستم‌های نمای دوپوسته، می‌تواند نقشی اساسی در کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی در این مناطق ایفا کند.(Olgyay, 2015)

یکی از مشکلات اساسی در ساختمان‌های مسکونی مناطق سرد کوهستانی، مصرف بالای انرژی به دلیل نیاز مداوم به گرمایش است. جداره‌های ساختمانی که بدون توجه به اصول معماری اقلیمی طراحی شده‌اند، باعث افزایش اتلاف انرژی و کاهش بازدهی سیستم‌های گرمایشی می‌شوند. در این میان، طراحی مناسب نما و استفاده از مصالح ساختمانی بهینه در جداره‌های خارجی ساختمان، می‌تواند به میزان قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد. سیستم نمای دوپوسته، به‌عنوان یک راهکار کارآمد در طراحی پایدار، این امکان را فراهم می‌آورد که تعادل بهتری میان جذب و اتلاف حرارت برقرار شود (Pérez-Lombard et al., 2008). با این حال، مطالعات جامعی درباره نوع مصالح به‌کاررفته در این سیستم و تأثیر آن بر کاهش مصرف انرژی در اقلیم‌های سرد کوهستانی وجود ندارد، که این موضوع اهمیت بررسی دقیق‌تر این مسئله را نشان می‌دهد.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مصالح به‌کاررفته در نماهای دوپوسته بر کاهش مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌های مسکونی خورشیدی در اقلیم سرد کوهستانی انجام می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر به دنبال ارائه راهکارهای علمی برای انتخاب بهترین نوع مصالح در جداره‌های دوپوسته است تا علاوه بر کاهش مصرف انرژی، شرایط آسایش حرارتی بهینه‌ای را برای ساکنان فراهم کند. سوالات کلیدی این پژوهش عبارتند از:

- چه راهبردهای طراحی غیرفعال جهت بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد کوهستانی وجود دارد؟
- چه مصالحی برای استفاده در نمای دوپوسته مناسب‌تر هستند تا اتلاف انرژی را در زمستان کاهش داده و در تابستان از افزایش بیش از حد دما جلوگیری کنند؟
- چگونه می‌توان جهت‌گیری و فرم ساختمان را بهینه‌سازی کرد تا از اثرات منفی بادهای سرد زمستانی کاسته شود و در تابستان جزایر حرارتی شهری کاهش یابند؟
- مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی متداول این مناطق چگونه است و چگونه می‌توان آن را با بهره‌گیری از نماهای دوپوسته بهینه کرد؟

روش‌شناسی

این پژوهش از روش تحقیق ترکیبی شامل شبیه‌سازی، مدل‌سازی و تحلیل تجربی استفاده می‌کند. برای تحلیل عملکرد نمای دوپوسته و تأثیر آن بر کاهش مصرف انرژی، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان بهره گرفته شد.

متغیرهای این پژوهش شامل ویژگی‌های مصالح دوپوسته نظیر مواد تشکیل‌دهنده، ضخامت، ساختار و قابلیت جذب و دفع گرما هستند. علاوه بر این، تأثیر عواملی نظیر جهت‌گیری ساختمان، میزان تابش خورشیدی و شرایط اقلیمی نیز بررسی خواهند شد.

برای بررسی دقیق عملکرد نمای دوپوسته، از نرم‌افزارهای تخصصی مانند **EnergyPlus** و **DesignBuilder** استفاده خواهد شد. این نرم‌افزارها قابلیت تحلیل و شبیه‌سازی دقیق میزان مصرف انرژی، بازدهی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، و شرایط آسایش حرارتی داخلی ساختمان را فراهم می‌کنند.

در این پژوهش، ارزیابی عملکرد نمای دوپوسته بر اساس معیارهایی نظیر:

- میزان مصرف انرژی ساختمان (قبل و بعد از اجرای نمای دوپوسته)
- کارایی حرارتی مصالح به‌کاررفته در نما
- تأثیر بر آسایش حرارتی ساکنان
- عملکرد کلی ساختمان در کاهش نیاز به گرمایش و سرمایش صورت خواهد گرفت.

مبانی نظری

مطالعات متعددی به بررسی راهکارهای طراحی پایدار و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی پرداخته‌اند Olgyay . (2015)در مطالعات خود بر اهمیت طراحی اقلیمی و استفاده از روش‌های غیرفعال در معماری تأکید کرده است-Pérez . Lombard et al. (2008)نیز در پژوهش خود نشان داده‌اند که نمای دوپوسته در بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی تأثیر بسزایی دارد. الیزابت کراتیا و همکاران در سال ۲۰۰۴ به اهمیت استفاده از نمای دو پوسته برای ساختمان هایی که در معرض وزش باد شدید و سر و صدا قرار دارند، تاکید کردند. در این مطالعه در ۸ نمونه با استفاده از نرم افزار TAS، شرایط و اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی، استفاده از نمای دو پوسته و عدم استفاده از این نما، مقایسه و بررسی شده است .نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده مناسب از نمای تهویه دو پوسته متناسب با شرایط اقلیم اهمیت زیادی دارد و حتی در بعضی شرایط این امکان وجود دارد که در مصرف انرژی کل سالیانه اثر منفی گذارد.

کیم و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی چالش‌ها و محدودیت‌های اجرای شبیه‌سازی نمای دوپوسته با استفاده از نرم‌افزار EnergyPlusپرداختند. تمرکز آن‌ها بر صحت‌سنجی انتقال حرارت و جرم در داخل محفظه نما بوده است. با انجام آزمایش‌های مختلف و مقایسه جریان هوای درون محفظه با داده‌های شبیه‌سازی‌شده، نتایج تجربی صحت مدل‌سازی EnergyPlus را تأیید کردند.

بلانکو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحقیق بر نماهای دو پوسته سوراخ‌دار فلزی که شامل فلز سوراخ شده، محفظه هوا و شیشه است، پرداختند. ایشان با بررسی پارامترهایی نظیر نرخ ایجاد سوراخ، جنس و رنگ فلز، نفوذ باد و اعتبار سنجی نتایج حاصل از نرم افزار متلب و انرژی پلاس با داده‌های تجربی یک ساله برای پیکربندی‌های متفاوت در اقلیم‌های مختلف و طول‌های متفاوت محفظه هوا، مقادیر بهینه پارامترها را برای مصرف انرژی گرمایشی، مصرف انرژی سرمایشی و مصرف انرژی نورانی به دست آوردند که باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی می‌شد.

شامری و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای دیگر، به بررسی تأثیر نمای دوپوسته بر روشنایی روز در مقایسه با استراتژی‌های تهویه طبیعی پرداختند. با استفاده از نرم‌افزارIES ، دوازده مدل شبیه‌سازی‌شده در اقلیم‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها دریافتند که استفاده از نمای تهویه دوپوسته در دیوار جنوبی، به‌ویژه در شرایط مختلف تابش خورشیدی، الزامات روشنایی روز را به‌طور کامل برآورده نمی‌کند.

گویا و همکاران (۲۰۱۳) با اشاره به تمرکز تحقیقات پیشین بر کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی، پژوهشی را بر روی بهینه‌سازی هم‌زمان مصرف انرژی برای تأمین نور کافی و دمای مناسب انجام دادند. این مطالعه که در اقلیم گرم اقیانوسی انجام شد، نشان داد که استفاده از نمای دوپوسته در چهار جهت اصلی و سه مدل متفاوت از ساختمان اداری، بر کاهش مصرف انرژی تأثیر بسزایی دارد. نتایج نشان داد که میزان شفافیت شیشه باید حدود ۳۵ درصد و نسبت مساحت شیشه بیرونی به کل نما ۴۵ درصد باشد. بیشترین کاهش مصرف انرژی در دیوار شمالی و کمترین میزان کاهش در دیوار جنوبی مشاهده شد.

این مطالعات نشان می‌دهند که نمای دوپوسته می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، مطالعات اندکی به بررسی عملکرد مصالح مورد استفاده در نماهای دوپوسته در اقلیم سرد کوهستانی پرداخته‌اند. نمای دوپوسته[2] به عنوان یک راهکار نوین در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها شناخته شده است که با ایجاد یک فضای میانی بین دو جداره، امکان تهویه طبیعی و کنترل انتقال حرارت را فراهم می‌کند. این سیستم به ویژه در اقلیم‌های سرد کوهستانی می‌تواند با کاهش اتلاف حرارت و بهبود آسایش حرارتی، مصرف انرژی گرمایشی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.(Aksamija, 2018)

کریدورهای افقی در نمای دوپوسته نقش مهمی در تنظیم جریان هوا و کنترل تابش خورشید ایفا می‌کنند. این کریدورها با ایجاد مسیرهای تهویه طبیعی در فضای میانی، در تابستان با دفع حرارت اضافی و در زمستان با حفظ گرما، به کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان کمک می‌کنند .(Rahimi et al., 2022) همچنین، استفاده از سایه‌اندازهای دینامیک در این کریدورها، امکان کنترل میزان نور و حرارت ورودی را فراهم می‌آورد که منجر به بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌شود (Daneshjoo et al., 2022).

مطالعات شبیه‌سازی و تجربی نشان داده‌اند که نمای دوپوسته با کریدورهای افقی می‌تواند مصرف انرژی ساختمان‌های بلندمرتبه را به طور قابل توجهی کاهش دهد؛ به طوری که کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در برخی موارد تا بیش از ۱۵ درصد گزارش شده است .(Aksamija, 2018; Daneshjoo et al., 2022) همچنین، عمق و عرض فضای میانی و نحوه تهویه آن از عوامل کلیدی در عملکرد حرارتی نما هستند که باید بر اساس شرایط اقلیمی بهینه شوند.(Aksamija, 2018)

در نهایت، ترکیب طراحی بهینه کریدورهای افقی، مصالح با عملکرد حرارتی بالا و سیستم‌های سایه‌انداز پویا، نمای دوپوسته را به یکی از مؤثرترین راهکارهای معماری پایدار در ساختمان‌های خورشیدی در اقلیم سرد کوهستانی تبدیل کرده است (Rahimi et al., 2022).

پژوهش حاضر تلاش دارد تا این خلأ تحقیقاتی را پر کرده و راهکارهای مناسبی برای استفاده از مصالح بهینه در طراحی ساختمان‌های مسکونی خورشیدی ارائه دهد. با این حال، تفاوت در شرایط اقلیمی و نوع مصالح به‌کاررفته، از عوامل کلیدی در میزان تأثیرگذاری این سیستم به شمار می‌آید. پژوهش حاضر تلاش دارد تا با بررسی عمیق‌تر ویژگی‌های این سیستم در اقلیم سرد کوهستانی، راهکارهای بهینه‌ای برای طراحی ساختمان‌های مسکونی ارائه دهد.

نماهای دوپوسته یکی از راهکارهای مؤثر در طراحی ساختمان‌های پایدار محسوب می‌شوند که با کاهش مصرف انرژی، افزایش آسایش حرارتی و بهبود عملکرد اقلیمی ساختمان همراه هستند. این نوع نماها معمولاً شامل دو لایه مجزا از مصالح لعاب‌دار هستند که فضای بین آن‌ها می‌تواند از ۲۰۰ میلی‌متر تا بیش از دو متر متغیر باشد.(Lou.w, 2012) سیستم نمای دوپوسته علاوه بر زیبایی بصری، قابلیت کاهش مصرف انرژی تا ۳۰ درصد را دارد و به عنوان یک راهکار پایدار برای تهویه طبیعی و کاهش وابستگی به نور خورشید عمل می‌کند. همچنین، این سیستم باعث کاهش آلودگی صوتی و افزایش مقاومت در برابر بادهای شدید در قسمت‌های بالایی ساختمان می‌شود. از این رو، نمای دوپوسته می‌تواند جایگزین مناسبی برای نماهای شیشه‌ای معمولی باشد.(Pérez-Lombard et al., 2008) فضای خالی

[2] *Double-Skin Façade - DSF*

میان دو لایه نما، نقش مهمی در کنترل تبادل حرارتی دارد. این فضا بسته به جهت‌گیری ساختمان می‌تواند در روزهای سرد با جذب گرمای خورشید گرم شده و در شب با ایجاد تهویه طبیعی، هوای تازه را تأمین کند. در فصل تابستان، جریان هوای داخل این شکاف، گرمای ذخیره‌شده را خارج کرده و باعث کاهش دمای فضای داخلی می‌شود، در نتیجه از افزایش گرمایی بیش از حد جلوگیری کرده و آسایش حرارتی را فراهم می‌کند. هرچه هوای داخل این شکاف گرم‌تر شود، اثر مکش قوی‌تر شده و هوای خنک با سرعت بیشتری وارد فضای داخلی نما می‌شود.(Lou.w, 2012)

پوسته‌های خارجی ساختمان از نظراجزاء تشکیل دهنده به دو بخش شفاف و غیرشفاف (کدر) تقسیم می‌شوند.نماهای غیر شفاف عمدتاً از لایه های جامد موادی مانند مصالح بنایی، بتن، سنگ و غیره ساخته شده است. نماهای شیشه‌ای عمدتاً از مواد شفاف یا نیمه شفاف ساخته می‌شوند. جدول۱ ، یک نمای کلی از طبقه بندی ساختمان‌ها براساس عملکرد کلیدی آن ارائه می‌دهد. (Hallawa et al,2017)

جدول۱- طبقه بندی ساختمان ها براساس عملکرد کلیدی

اصلی بندی دسته	دسته بندی فرعی	عملکرد حرارتی	ضعف/محدودیت
نمای سنگی	سنگ مرمر	ارزش عایق کم	خطر ایمنی در زمان آتش سوزی
	آجر	۱.با جرم حرارتی بالا و بهبود عماکرد حرارتی با عدم همبستگی بالاتر	خطر ایمنی در زمان آتش سوزی
نمای فلزی	آلومینیوم	۱.عملکرد حرارتی به طور عمده بر روی طراحی واحد نصب بستگی دارد	مقاومت محدود برای تغییر شکل
	استیل	۱.به طور معمول عملکرد عایق را محدود میکند. ۲.کاهش پل های حرارتی می‌تواند کارایی بیشتر انرژی را به دست آورد	مقاومت محدود برای تغییر شکل
نمای شیشه ای	شیشه تک	۱.نسبت فریم بالاتر می تواند باعث عملکرد حرارتی پایینتر شود. ۲.عملکرد حرارتی ضعیف	۱.آلودگی نوری ۲.هزینه های تمیز کردن بالا ۳.خطر انفجار
	شیشه دوجداره	۱.ساختار سیستم شیشه دو جداره عملکرد بهتر حرارتی را نسبت به سایر دیوارهای شیشه ای ارائه می دهند	۱.آلودگی نوری ۲.هزینه های تمیز کردن بالا ۳. خطر انفجار
نما با پوشش گیاهی		۱. ظرفیت بالا برای جلوگیری از تابش مستقیم خورشید، که نشان دهنده کاهش سطوح خارجی دیوار و دمای داخلی است	آپوپتوز گیاهی توسط مدیریت غیرمعمول یا اشتباهات تسهیلات
نمای خورشیدی	نمای نیمه شفاف و مات	۱.می تواند نیاز به فراهم نمودن سوخت فسیلی را کاهش دهد یا از بین ببرد. ۲.سهم بیشتری از مساحت سطح ساختمان برای تولید انرژی ۳.بهبود محیط داخلی برای ساکنان	۱.هزینه های ساخت و ساز بیشتر ۲.راندمان تبدیل کم
نما با مصالح تغییر فاز		۱.حفظ دمای داخلی در محدوده آسایش ۲. کاهش حداکثر بارهای سرمایش/ گرمایش و هزینه های عملیاتی	قدرت نارسا
نمای ساختمان کینتیک (جنبشی)		۱.کاهش نور بیش از حد به دلیل کنترل نفوذ مستقیم خورشید ۲. پاسخ به تغییرات میکرو هواشناسی به طور خودکار	۱. هزینه های ساخت و ساز بالاتر ۲.هزینه های نگهداری بیشتر

رفتار حرارتی نماهای دوپوسته به عنوان یکی از موضوعات مهم در حوزه معماری پایدار و بهینه‌سازی مصرف انرژی، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مطالعات متعددی در این زمینه از طریق شبیه‌سازیهای رایانه‌ای و همچنین پژوهش‌های میدانی انجام شده است. به عنوان مثال، Kalyanova et al. ، Jensen et al. (2008) ، Spinnler et al. (2006) (2008) ، Kinnane and ،Joe et al. (2014) ، Rezaee et al. (2011) ، Alibaba and Ozdeniz (2011) Prendergast (2014) ، Flores Larsen et al. (2015) ، Kragh (2001) ، Hashemi et al. (۲۰۱۰) و Altan et al. (۲۰۱۵) از جمله پژوهشگرانی هستند که به بررسی رفتار حرارتی نماهای دوپوسته پرداخته‌اند. این مطالعات عمدتاً در اقلیم‌های مختلف، به ویژه در دسته‌بندیهای B و C کوپن (شامل مناطق گرم و خشک، سرد و خشک، گرم و معتدل، و سرد و معتدل) انجام شده است.

در این تحقیقات، پارامترهای مختلفی از جمله پیکربندی نما، جنس شیشه، نوع سایبانها، استفاده از تهویه طبیعی، عمق فضای حائل و ابعاد بازشوهای تهویه مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر این عوامل بر تغییرات دمای فضاهای داخلی و حائل، و همچنین میزان مصرف انرژی ساختمان، از جمله موضوعات اصلی این پژوهش‌ها بوده است. به عنوان مثال، Jensen et al. (۲۰۰۸) و Kalyanova et al. (۲۰۰۸) تأثیر تهویه طبیعی و عمق فضای حائل را بر کاهش مصرف انرژی در نماهای دوپوسته بررسی کرده‌اند.

در ایران نیز تحقیقات محدودی در این زمینه انجام شده است. به عنوان نمونه، قنبران و حسین‌پور (۱۳۹۲)، با شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف نمای دوپوسته بر روی یک ساختمان اداری در تهران، نشان دادند که استفاده از این نوع نما می‌تواند منجر به کاهش ۱۶ تا ۲۰ درصدی مصرف انرژی شود. همچنین، سراج، دانش و دیگران (۱۳۹۳)، تأثیر تعداد لایه‌های شیشه بر مصرف انرژی را ارزیابی کرده و به این نتیجه رسیدند که افزایش لایه‌های شیشه می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند. در مطالعه دیگری، معرفت، عظیمی و دیگران (۱۳۸۹)، تأثیر استفاده از نمای دوپوسته به جای نمای شیشه‌ای مرسوم در ساختمان‌های بلندمرتبه را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین کاهش مصرف سالانه انرژی در ساختمان‌هایی با نمای دوپوسته رو به جنوب اتفاق می‌افتد.

این مطالعات به طور کلی نشان می‌دهند که نماهای دوپوسته می‌توانند به عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها، به ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک و معتدل، مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه‌سازی طراحی این نماها و تأثیر آن‌ها بر رفتار حرارتی ساختمان در اقلیم‌های مختلف همچنان احساس می‌شود.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

رابرت ک. یین که کتاب مستقلی با نام "تحقیق موردی" (۱۹۸۹) نوشته است، در تعریف مطالعه موردی میگوید :مطالعه موردی، یک کاوش تجربی است، که از منابع و شواهد چندگانه برای بررسی یک پدیده موجود در زمینه واقعیاش در شرایطی که مرز بین پدیده و زمینه آن بهوضوح روشن نیست، استفاده می‌کند(ک .یین، ۱۳۷۶ ،ص ۲۰)، به‌منظور ارزیابی دقیق تأثیر نمای دوپوسته بر مصرف انرژی، مطالعه موردی بر روی ساختمان‌های مسکونی در شهر **همدان** انجام خواهد شد. ساختمان‌های منتخب از نظر جهت‌گیری، نوع مصالح، و سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی مقایسه خواهند شد.

داده‌های ارائه شده در این پژوهش شامل مشخصات مصالح به کار رفته در پوسته ساختمانی و پارامترهای شبیه‌سازی در نرم‌افزار DesignBuilder می‌باشد. دیوارهای خارجی ساختمان از چندین لایه مختلف تشکیل شده‌اند که شامل اجرنما، عایق پلی‌اورتان، بلوک سیمانی و نازک‌کاری‌های داخلی است. ضریب هدایت حرارتی هر لایه و ضخامت آن‌ها به طور دقیق در جداول

آورده شده است که به عنوان ورودی‌های اصلی در مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، جنس و ضخامت لایه‌های سقف و دیوارهای داخلی جداکننده نیز مشخص شده است که هر کدام تأثیر مستقیمی بر انتقال حرارت و رفتار حرارتی کل ساختمان دارند.

در بخش نرم‌افزاری، پارامترهای مختلفی مانند شرایط اقلیمی شهر همدان، نوع و ارتفاع در و پنجره‌ها، سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، روش‌های روشنایی و زون‌بندی فضاها تعریف شده‌اند. انواع پنجره‌ها شامل معمولی، دوجداره، دوجداره شفتی و یکپارچه با ضریب انتقال حرارت مشخص شبیه‌سازی شده‌اند. شاخص آسایش حرارتی PMV به عنوان معیار اصلی برای ارزیابی شرایط حرارتی داخلی به کار گرفته شده که ترکیبی از عوامل دما، رطوبت، فعالیت انسان و سطح پوشش لباس را در نظر می‌گیرد. داده‌ها همچنین شامل میزان روشنایی، ظرفیت سیستم روشنایی، ساعت‌های روشن و خاموشی و تنظیمات سیستم HVAC است که همگی در تحلیل دقیق مصرف انرژی و آسایش حرارتی نقش دارند.

شبیه‌سازی سه‌بعدی ساختمان و تقسیم‌بندی آن به زون‌های حرارتی مختلف (با توجه به کاربری و پلان داخلی) نیز در نرم‌افزار انجام شده است. این تقسیم‌بندی امکان تحلیل دقیق‌تر شرایط داخلی هر بخش ساختمان و بهبود قابلیت‌های شبیه‌سازی را فراهم ساخته است. در نهایت، مقادیر ورودی مربوط به انتقال حرارت، مصرف انرژی، شفافیت پنجره‌ها و مشخصات اقلیمی به عنوان پایه‌های اصلی داده‌ای برای تحلیل عملکرد نماهای دوپوسته در اقلیم سرد مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در ادامه فرآیند مدلسازی، ابتدا اقلیم و موقعیت جغرافیایی با انتخاب گزینه[۳] و تعیین شهر همدان در نرم‌افزار[۴]مشخص شد. ساختمان مدل شده بر اساس پلان و ارتفاعات موجود در نقشه‌ها ترسیم گردید و فضاهای داخلی به زون‌های حرارتی مختلف، نظیر فضاهای مسکونی، سرویس‌های بهداشتی، راهروها و راه‌پله‌ها، تقسیم‌بندی شد. جهت‌گیری ساختمان نسبت به شمال جغرافیایی تعیین شده و تنظیمات مرتبط با ارتفاع و نوع ساختمان در بخش آن[۵] قابل تغییر بود. علاوه بر این، در منوی مربوط[۶]، امکان تعریف و ویرایش مصالح و لایه‌های دیوارها و سقف‌های داخلی و خارجی فراهم شده بود که با انتخاب مصالحی مانند بلوک سیمانی و سنگ نما برای دیوارهای خارجی و تیرچه بلوک برای سقف، پارامترهای حرارتی سازه مورد نظر به دقت وارد مدل گردید. همچنین درها و پنجره‌های دوجداره با ضرایب انتقال حرارت مشخص در تمامی طبقات لحاظ شدند.

پارامترهای مرتبط با ابعاد و درصد بازشوها در قسمت مرتبط[۷] تنظیم شد؛ به گونه‌ای که ابعاد پنجره‌ها و درها بر اساس استانداردهای طراحی با ارتفاع ۲ متر و عرض ۱.۱۰ متر تعریف شدند. ظرفیت روشنایی معادل ۵۰۰۰۰ وات بر متر مربع با شار نوری ۱۰۰ لوکس و ضریب درخشندگی ۰.۴۲۰ انتخاب و برنامه‌ریزی ساعات روشن و خاموشی برای محیط داخلی انجام گرفت. انتخاب سیستم‌های سرمایش و گرمایش نیز از منو[۸] صورت پذیرفت تا شرایط زیستی و حرارتی داخلی با دقت شبیه‌سازی شود. شاخص PMV[۹]به عنوان معیار ارزیابی آسایش حرارتی انسان تعیین گردید که با در نظر گرفتن پارامترهای زیست‌محیطی، فعالیت و لباس نمونه‌ای بزرگ از انسان‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

با توجه به محدودیت‌های شاخص PMV در کاربردهای بیرونی و اقلیم‌های گرم، این پژوهش استفاده از این شاخص را تنها برای ارزیابی شرایط داخلی ساختمان مورد تأکید قرار داده است و دمای آسایش مطلوب میان ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد در

---

۳ *location*

۴ *DesignBuilder*

۵ *Drawing option*

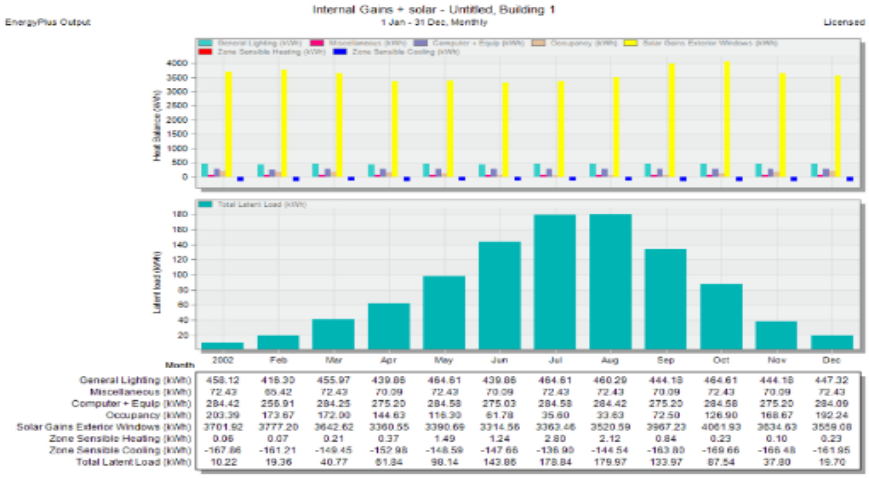
۶ *construction*

۷ *opening*

۸ *HVAC*

۹ *Predicted Mean Vote*

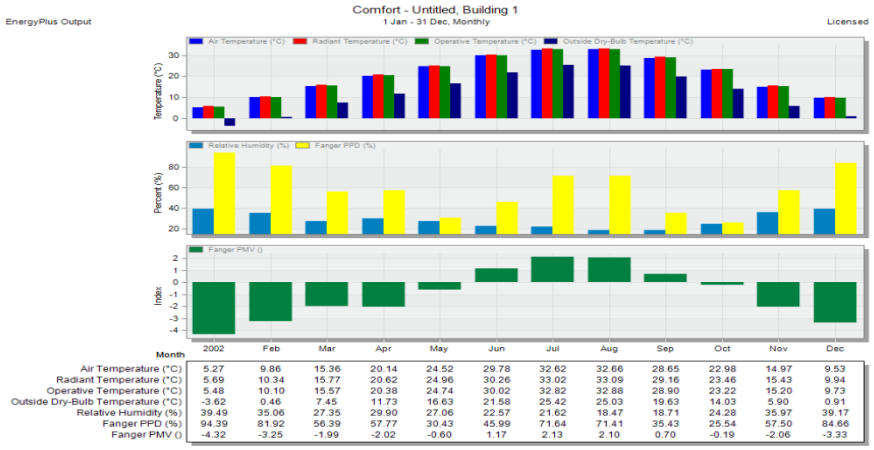
نظر گرفته شده است. در این مطالعه، چهار الگوی پنجره مختلف شامل پنجره معمولی تک‌جداره، پنجره دوجداره با لایه‌های ۴ و ۶ میلی‌متری، پنجره دوجداره شفتی[۱۰] و پنجره یکپارچه در قالب نماهای دوپوسته مورد بررسی قرار گرفتند. عملکرد این پنجره‌ها براساس شاخص PMV و میزان تبادل حرارتی تحلیل شده است که با استفاده از نرم‌افزار، امکان مقایسه دقیق و کمی شرایط آسایش حرارتی و رفتار حرارتی نماها فراهم گردیده است.



تصویر۲- نمودار آسایش حرارتی دوجداره معمولی

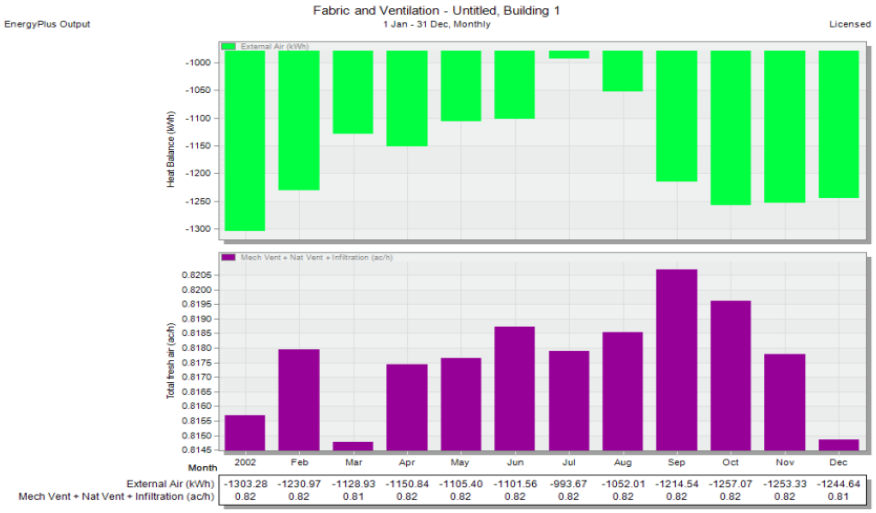
پنجره دوجداره معمولی

شاخص PMVدر این الگو در بازه 4.32-تا ۲.۱۳ قرار دارد که نشان می‌دهد در فصول سرد، ساختمان در وضعیت بسیار سرد قرار دارد. بیشترین رضایتمندی حرارتی در ماه‌های مهر و اردیبهشت مشاهده شد که شاخص PMVبین 0.19-تا ۰.۶۰- نوسان داشته است. در ماه دی، که کمترین میزان تابش خورشید دریافت شده است، شاخص PMVبه 4.32-رسیده و نشان‌دهنده سرمای شدید در ساختمان است.



شکل۳- نمودار بارهای حرارتی دوجداره معمولی

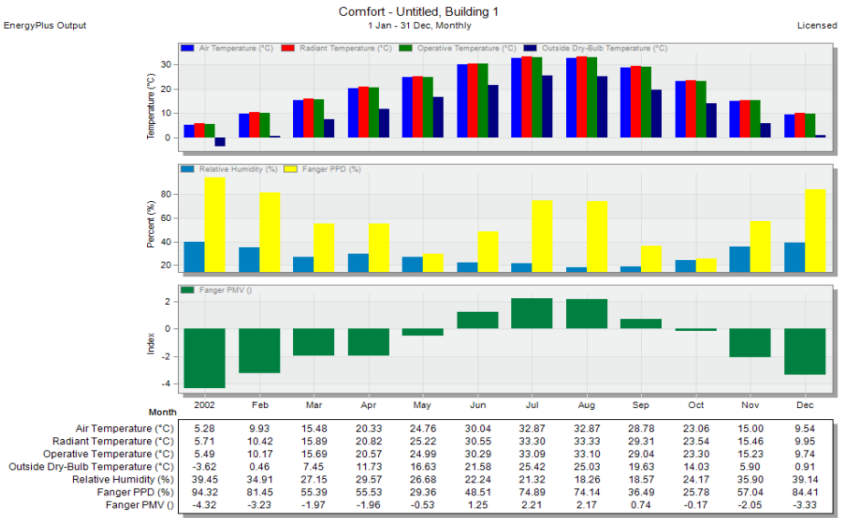
[۱۰] *vertical shaft*



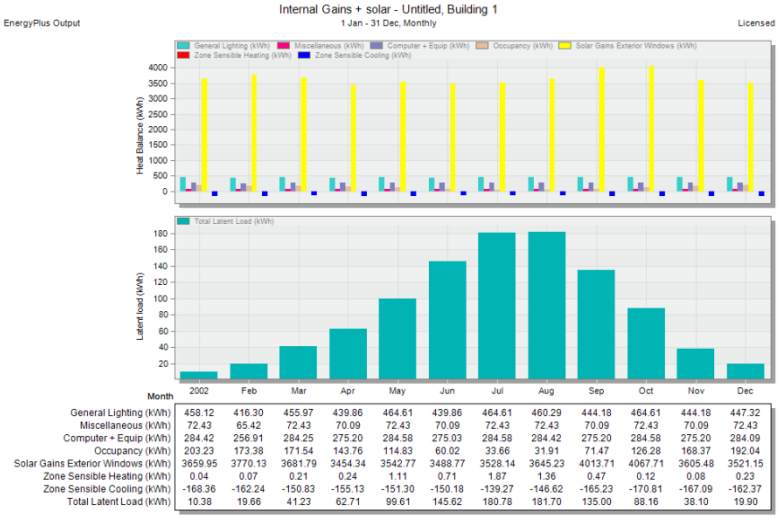
شکل۴- نمودار تهویه دوجداره معمولی

پنجره دوجداره ۴ و ۶ میلی‌متری

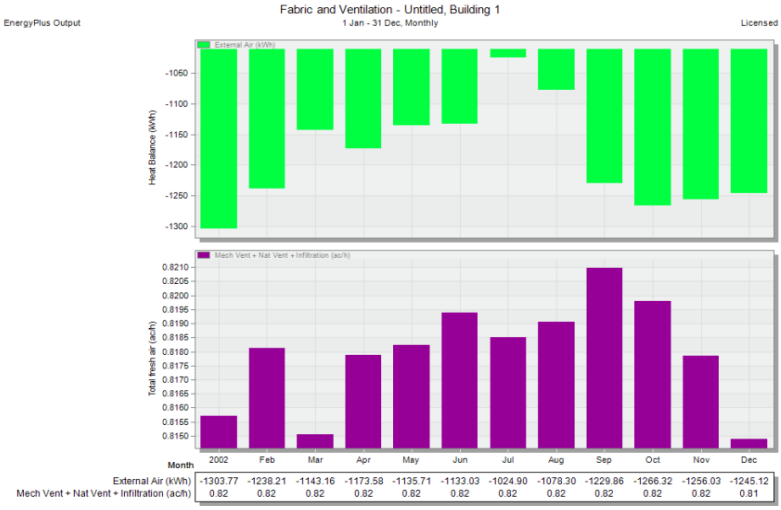
نتایج نشان داد که استفاده از این پنجره‌ها تأثیر مثبتی بر بهبود آسایش حرارتی داشته و شاخص **PMV**بین **4.32-تا ۲.۱۷** قرار گرفته است. این بازه نشان می‌دهد که در مقایسه با پنجره دوجداره معمولی، این نوع پنجره عملکرد بهتری داشته است. همچنین، میزان تبادل حرارتی در **ماه دی** برابر با **1303.77-کیلووات ساعت** بوده که نسبت به حالت دوجداره معمولی کاهش یافته است.



شکل۵- نمودار آسایش حرارتی پنجره دوجداره ۴و۶



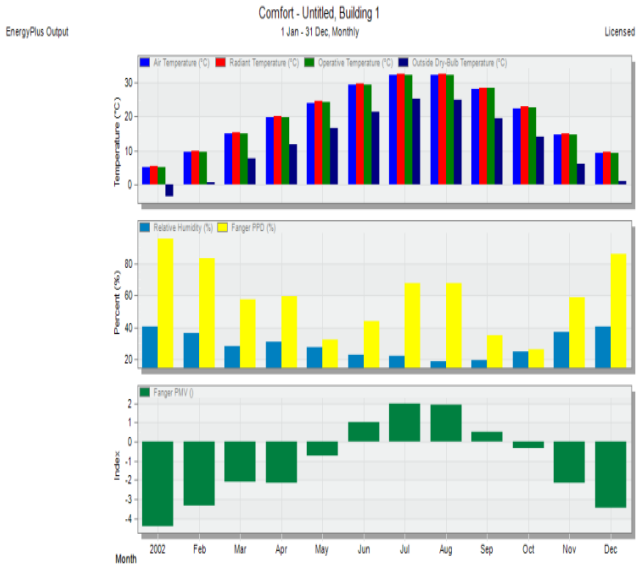
شکل۶- مودار بارهای حرارتی پنجره دوجداره۴و۶



شکل۷- نمودار تهویه پنجره دوجداره۴و۶

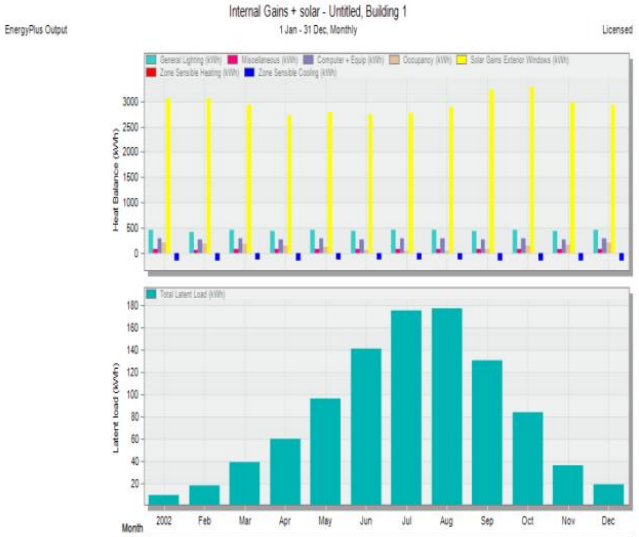
پنجره شفت عمودی

در این حالت، شاخص **PMV**در بازه **4.40-تا ۱.۹۸** قرار گرفته که نشان‌دهنده وضعیت سرمای شدیدتر نسبت به سایر مدل‌ها در فصول سرد است. همچنین، میزان تبادل حرارتی در **دی ماه** برابر **1246.56-کیلووات ساعت** بوده که نسبت به سایر مدل‌ها افزایش یافته است.



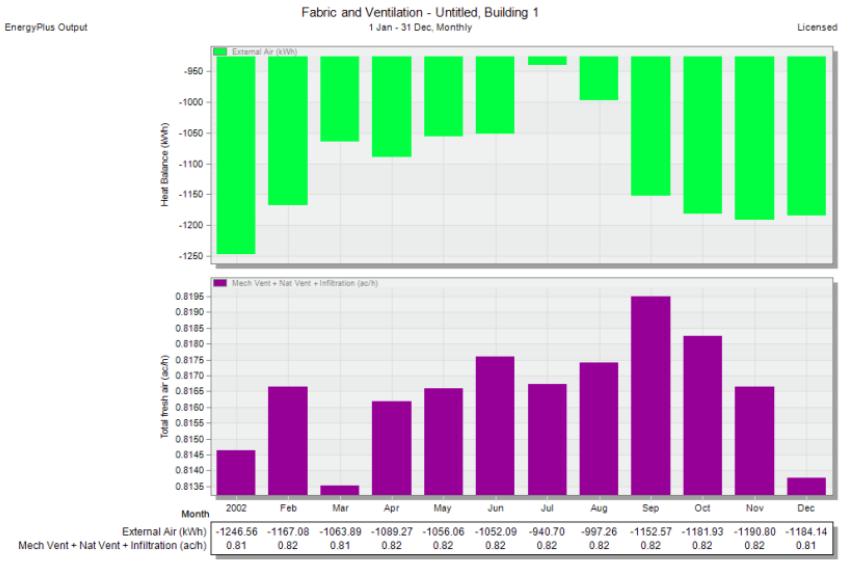
	2002	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Air Temperature (°C)	4.90	9.39	14.93	19.71	24.18	29.42	32.25	32.27	28.20	22.46	14.53	9.12
Radiant Temperature (°C)	5.30	9.85	15.30	20.15	24.59	29.87	32.61	32.67	28.68	22.90	14.97	9.51
Operative Temperature (°C)	5.10	9.62	15.11	19.93	24.39	29.65	32.43	32.47	28.44	22.68	14.75	9.32
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-3.62	0.46	7.45	11.73	16.63	21.58	25.42	25.03	19.63	14.03	5.90	0.91
Relative Humidity (%)	40.48	36.13	28.10	30.68	27.57	23.02	22.04	18.84	19.18	25.01	36.94	40.19
Fanger PPD (%)	95.23	83.01	57.65	59.44	32.04	44.06	67.30	67.47	34.98	26.43	58.98	85.73
Fanger PMV ()	-4.40	-3.35	-2.10	-2.17	-0.74	1.02	1.98	1.95	0.54	-0.32	-2.16	-3.42

شکل۸- نمودار آسایش حرارتی پنجره شفتی عمودی



	2002	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
General Lighting (kWh)	458.12	416.30	455.97	439.86	464.61	439.86	464.61	460.29	444.18	464.61	444.18	447.32
Miscellaneous (kWh)	72.43	65.42	72.43	70.09	72.43	70.09	72.43	72.43	70.09	72.43	70.09	72.43
Computer + Equip (kWh)	284.42	256.91	284.25	275.20	284.58	275.03	284.58	284.42	275.20	284.58	275.20	284.09
Occupancy (kWh)	203.86	174.77	173.46	146.34	118.41	64.65	38.94	36.87	76.05	130.51	170.32	193.38
Solar Gains Exterior Windows (kWh)	3057.76	3070.22	2942.66	2735.19	2797.62	2743.10	2764.58	2892.70	3232.96	3298.10	2973.23	2937.23
Zone Sensible Heating (kWh)	0.03	0.07	0.10	0.21	1.07	0.87	2.10	1.50	0.56	0.16	0.06	0.15
Zone Sensible Cooling (kWh)	-160.45	-152.83	-140.54	-144.95	-142.11	-141.07	-129.56	-137.01	-155.24	-159.21	-157.85	-153.66
Total Latent Load (kWh)	9.75	18.27	39.31	60.13	96.03	140.99	175.50	176.73	130.42	83.93	36.16	18.56

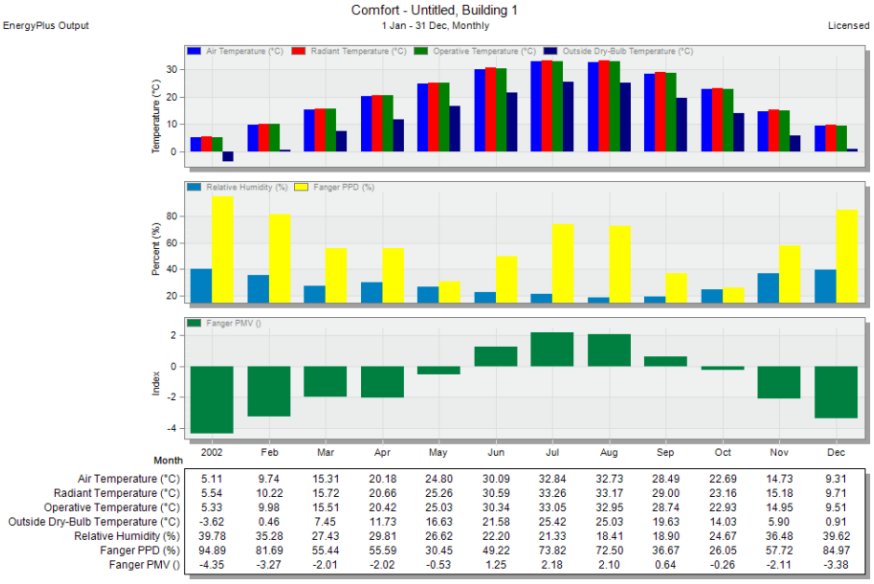
شکل۹- نمودار بارهای حرارتی پنجره شفتی عمودی



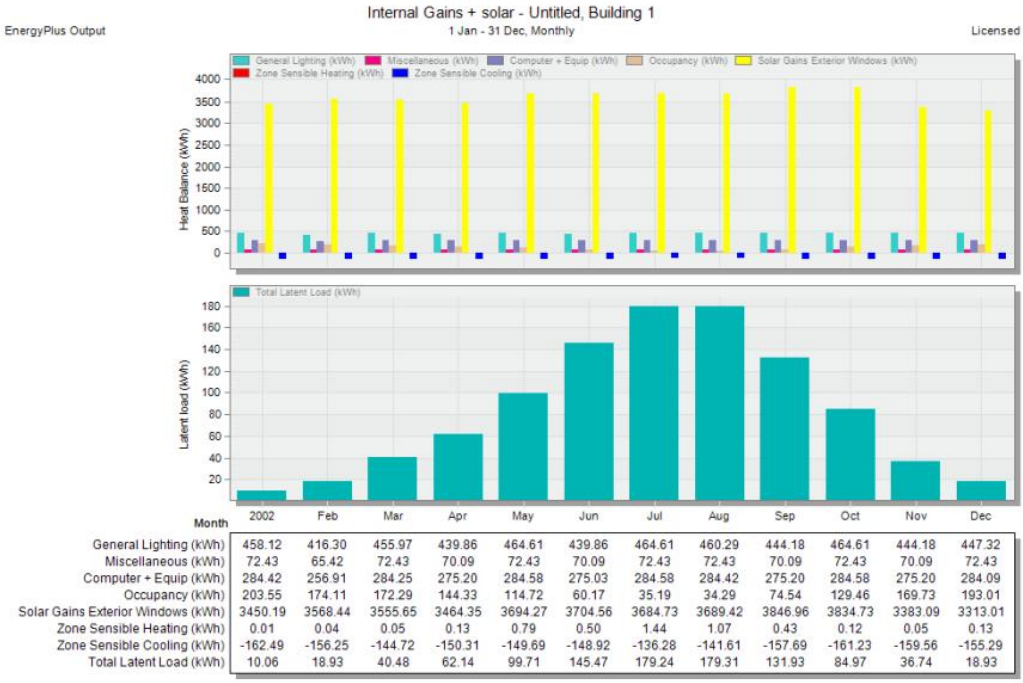
شکل ۱۰- نمودار تهویه پنجره شفتی عمودی

پنجره یکپارچه

نتایج نشان داد که این نوع پنجره تأثیر مثبتی بر میزان تابش دریافتی داشته و بیشترین میزان انرژی دریافتی در **ماه شهریور** (۳۸۴۶.۹۶ کیلووات ساعت) مشاهده شد. با این حال، در **ماه دی** شاخص **PMV** تا **4.35-**کاهش یافته است که نشان‌دهنده نیاز به بهبود در عملکرد این پنجره است.

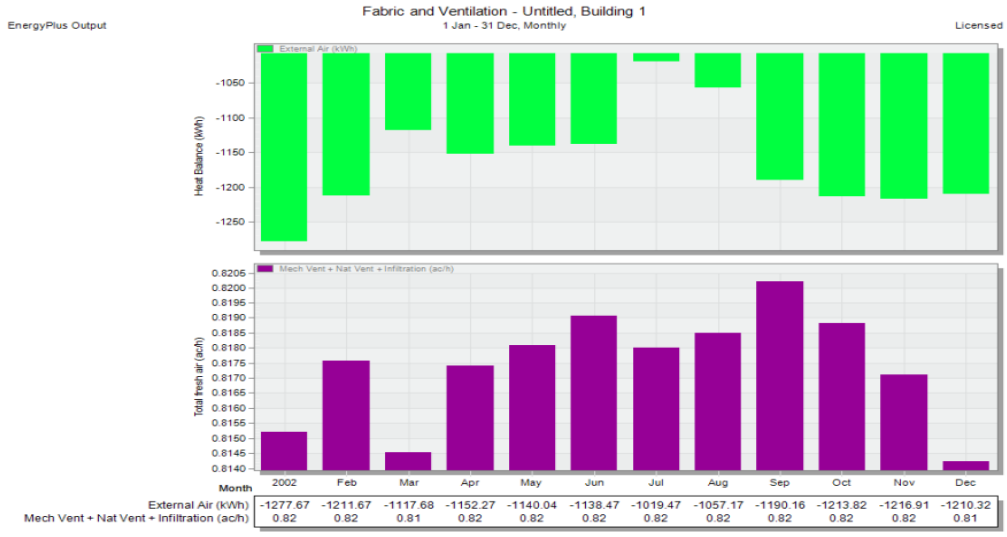


شکل۱۱-نمودار آسایش حرارتی پنجره یکپارچه



Month	2002	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
General Lighting (kWh)	458.12	416.30	455.97	439.86	464.61	439.86	464.61	460.29	444.18	464.61	444.18	447.32
Miscellaneous (kWh)	72.43	65.42	72.43	70.09	72.43	70.09	72.43	72.43	70.09	72.43	70.09	72.43
Computer + Equip (kWh)	284.42	256.91	284.25	275.20	284.58	275.03	284.58	284.42	275.20	284.58	275.20	284.09
Occupancy (kWh)	203.55	174.11	172.29	144.33	114.72	60.17	35.19	34.29	74.54	129.46	169.73	193.01
Solar Gains Exterior Windows (kWh)	3450.19	3568.44	3555.65	3464.35	3694.27	3704.56	3684.73	3689.42	3846.96	3834.73	3383.09	3313.01
Zone Sensible Heating (kWh)	0.01	0.04	0.05	0.13	0.79	0.50	1.44	1.07	0.43	0.12	0.05	0.13
Zone Sensible Cooling (kWh)	-162.49	-156.25	-144.72	-150.31	-149.69	-148.92	-136.28	-141.61	-157.69	-161.23	-159.56	-155.29
Total Latent Load (kWh)	10.06	18.93	40.48	62.14	99.71	145.47	179.24	179.31	131.93	84.97	36.74	18.93

شکل۱۲-نمودار بارهای حرارتی پنجره یکپارچه

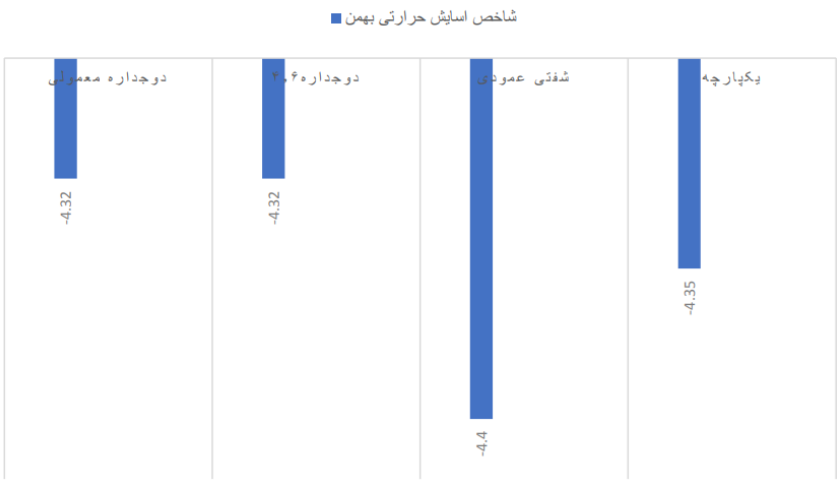


Month	2002	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
External Air (kWh)	-1277.67	-1211.67	-1117.68	-1152.27	-1140.04	-1138.47	-1019.47	-1057.17	-1190.16	-1213.82	-1216.91	-1210.32
Mech Vent + Nat Vent + Infiltration (ac/h)	0.82	0.82	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81

شکل۱۳-نمودار تهویه پنجره یکپارچه

پنجره مناسب از نظر شاخص آسایش حرارتی

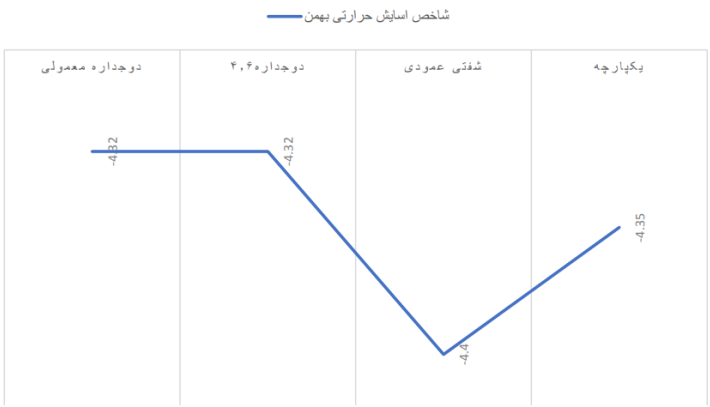
در مجموع، نتایج نشان داد که **پنجره دوجداره ۴ و ۶ میلی‌متری** بهترین عملکرد را از نظر آسایش حرارتی و میزان تبادل حرارتی در اقلیم سرد همدان داشته است. بنابراین، توصیه می‌شود برای طراحی بهینه ساختمان‌های مسکونی در این اقلیم، استفاده از این نوع پنجره در اولویت قرار گیرد. مطالعات آینده می‌توانند بر روی بررسی ضخامت‌های مختلف لایه‌های پنجره دوجداره و تأثیر آن‌ها بر کاهش مصرف انرژی متمرکز شوند.



شکل۱۴-نمودار مقایسه پنجره ها از نظر شاخص اسایش حرارتی در بهمن ماه

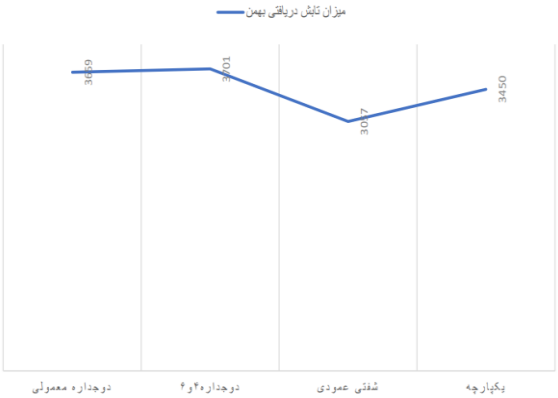
شکل۱۵-نمودار مقایسه فرم ها از نظر میزان تابش دریافتی در بهمن ماه

با توجه به اینکه اقلیم همدان سرد و کوهستانی است، ماه بحرانی از نظر شاخص آسایش حرارتی بهمن ماه است.لذا در این ماه شاخص ها مقایسه شده و بهینه ترین حالت انتخاب گردید



شکل۱۶-مودار مقایسه پنجره ها از نظر شاخص اسایش حرارتی در بهمن ماه و مرداد ماه

با توجه به نمودار ۱۷در بهمن ماه دوجداره۴و۶ بهترین عملکرد را داشته است. بنابراین پنجره دوجداره۶.۴ بهینه ترین ساختمان است.



شکل۱۷-نمودار مقایسه فرم ها از نظر میزان تابش دریافتی در دی ماه

داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها به‌صورت نمودارها و جداول ارائه شد که نشان‌دهنده تغییرات مصرف انرژی در شرایط مختلف اقلیمی هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ساختمان‌هایی با نمای دوپوسته نسبت به ساختمان‌های متداول، مصرف انرژی کمتری دارند. میزان کاهش مصرف انرژی بستگی به نوع مصالح به‌کاررفته در لایه‌های نما و نحوه طراحی آن دارد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از نمای دوپوسته در مقایسه با ساختمان‌های متداول، مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این کاهش به عواملی مانند نوع مصالح، ضخامت لایه‌ها و طراحی دقیق سیستم بستگی دارد. انتخاب صحیح مصالح می‌تواند تبادل حرارتی بین محیط داخلی و خارجی را کنترل کرده و نیاز به گرمایش را در زمستان و سرمایش را در تابستان کاهش دهد. برای ارائه تحلیل عمیق‌تر، داده‌های شبیه‌سازی را می‌توان به تفصیل بیان کرد، مانند درصد کاهش مصرف انرژی برای هر نوع مصالح دوپوسته، مقایسه ساختمان‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و تعیین بهینه‌ترین طراحی نما. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مصالح دوپوسته تأثیر محسوسی بر کاهش نیاز گرمایشی ساختمان دارد و در عین حال شرایط آسایش حرارتی را بهبود می‌بخشد.

نمای دوپوسته باعث کاهش بار گرمایشی در زمستان و کنترل دمای داخلی در تابستان می‌شود. انتخاب نوع مصالح و طراحی دقیق تأثیر بسزایی در عملکرد بهینه آن دارد.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین همخوانی دارد و نشان می‌دهد که استفاده از نماهای دوپوسته به‌عنوان راهکاری پایدار در اقلیم‌های سرد می‌تواند اثربخش باشد.

مشکلاتی مانند محدودیت در داده‌های شبیه‌سازی و دقت مدل‌های نرم‌افزاری از جمله محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شوند.

نتایج این پژوهش می‌تواند به معماران و طراحان در بهینه‌سازی مصرف انرژی و طراحی ساختمان‌های پایدار کمک کند. استفاده از مصالح دوپوسته نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی دارد و باعث بهبود آسایش حرارتی در ساختمان‌های مسکونی می‌شود.

تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی ضخامت و ترکیب مصالح دوپوسته پیشنهاد می‌شود.

معماران باید در طراحی ساختمان‌های خورشیدی در اقلیم‌های سرد به‌طور جدی از مصالح دوپوسته بهره ببرند.

فهرست منابع

سراج، فاطمه، مهدیزاده، محمدمهدی، دانش و هانیه صنایعییان. ۱۳۹۳. تأثیر جداره‌های لایه درونی و بیرونی نماهای دوپوسته بر میزان مصرف انرژی ساختمان‌های اداری و آموزشی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۶، ص ۱۸۰ـ۱۹۱.

قنبران، عبدالحمید ، حسین‌پور،امین .۱۳۹۲ بررسی رفتار حرارتی نماهای دوپوسته در اقلیم شهر تهران. *معماری و شهرسازی پایدار*، ۱۳(۴): ص۴۳ـ۵۳.

معرفت، مهدی، عزیز عظیمی و دیگران.۱۳۸۹، تحلیل یک سوله صنعتی با نمای دوپوسته در تهران. *همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی*. تهران: دانشگاه صنعتی شریف.

ک.یین، رابرت؛ تحقیق موردی، علی پارسائیان و سیدمحمد اعرابی، تهران، دفتر پژوهش‌های فرهنگی، ۱۳۷۶، چاپ دوم، ص ۲۰.

Aksamija, A. (2018). Thermal, energy and daylight analysis of different types of double skin facades. *Journal of Facade Design and Engineering, 6*(1), 1–39. https://doi.org/10.7480/jfde.2018.1.1527

Alibaba, H.Z. and M.B. Ozdeniz. 2011. Thermal comfort of multiple-skin facades in warmclimate offices. Scientific Research and Essays,6(19):P.4065-4078.

Altan, H., et al.2014. INDOOR ENVIRONMENT IN A UNIVERSITY OFFICE BUILDING WITH A DOUBLE-SKIN FACADE, in Building Simulation and Optimization. England.

Blanco, F., Palacios, E., & Torres, G. (2016). Analysis of the energetic performance of perforated metal façade systems. Energy and Buildings, 127, 23-33.

Daneshjoo, K., Rahmani, M., & Sadeghi, M. (2022). The effect of dynamic double skin façade on energy efficiency in office buildings: A case study in Mashhad. *Building and Environment*, 220, 109230. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109230

Flores Larsen, S., L. Rengifo, and C. Filippín. 2015. Double skin glazed façades in sunny Mediterranean climates. Energy and Buildings, 102:P.18-31.

Hallawa, A. H., Alam, M. Z., & Omer, R. A. (2017). Energy efficiency in buildings: A review of past, present, and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 740-752.

Hashemi, N., R. Fayaz, and M. Sarshar. 2010. Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate. Energy and Buildings, 42(10):P.1823-1832.

Jensen, R.L., O. Kalyanova, and P. Heiselberg. 2008. Modeling a Naturally Ventilated Double Skin Façade with a Building Thermal Simulation Program, in Building Physics, th Nordic Symposium

Joe, J., et al., 2014. Optimal design of a multi-story double skin facade. Energy and Buildings, 76:P.143-150.

Kragh, Mikkel. 2001. Monitoring of Advanced Facades, in The whole-life performance of facades. University of Bath, Bath, UK.

Kinnane, O. and T. Prendergast, 2014. Assessment of the double-skin façade passive thermal buffer effect, in 30th INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE. CEPT University, Ahmedabad.

Lou, W., Zong, L., Yang, B., Liang, Y., Ma, Y., & Xu, Y. (2012). Microbial synthesis of lactate containing polyesters by Escherichia coli. Metabolic engineering, 14(3), 380-386.

Rahimi, N., Mahdizadeh Seraj, F., Homani Rad, M., & Mahmoudi Zarandi, M. (2022). Natural ventilation and energy consumption reduction in double-skin façades: A case study in hot and dry climates. *Sustainability*, 14(10), 6004. https://doi.org/10.3390/su14106004

Rezaee, R., et al., 2011. Decision making for the optimization of double-skin façade for offices.

Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2024). Energy consumption of high-rise double skin façade buildings: A review and simulation study. *Energy and Buildings*, 284, 112948. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112948

Shameri, A., Abdul-Rahman, H., & Mohammad, M. (2013). Daylight performance of double skin facade with ventilation strategy in tropical climate. Energy and Buildings, 59, 1-9.

Olgyay, V. (2015). Design with climate. In Design with Cli-mate. Princeton university press.

Perez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. (2008). A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, 40 (3) , pp. 394-398.

Kim, Y., Lee, S., Kim, B., & Lee, J. (2011). Numerical simulation of double-skin facade using energyplus: Challenges and limitations. Energy and Buildings, 43(6), 1448-1454.

Krarti Elizabeth, Carmody John, and Heschong Lisa.(2004). "Impact of Double-Skin Facades on Energy and Comfort in a Mild Continental Climate." HVAC&R Research 10, no. 4: 387-408.187