

## بررسی تأثیر استفاده از نماهای دوپوسته سبز بر مصرف انرژی ساختمان‌های بلند مرتبه در شرایط اقلیمی تهران

سید علیرضا ذوالفقاری<sup>۱\*</sup>، مهران سعادت‌نوبخت<sup>۲</sup>، الهه نوروزی جاجرم<sup>۳</sup>

| اطلاعات مقاله   | چکیده   |
|---|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۸<br>پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۶                   | <p>عملکرد نمای دو پوسته در فصل گرم سال وابستگی شدیدی به نحوه طراحی اجزای نما و نیز اقلیم مورد بررسی نشان می‌دهد. به بیان دیگر، در صورتی که نمای دو پوسته در اقلیم‌های بسیار گرم استفاده شود، می‌تواند میزان بار ساختمان را افزایش دهد. برای رفع این مشکل، دو راه حل ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی و جلوگیری از ورود بار ناشی از تابش‌های خورشیدی با به کارگیری اجزای کمکی مانند سایه‌اندازها در نمای دو پوسته مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. بر این اساس در سال‌های اخیر، ایده استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی به منظور کاهش مصرف انرژی در فصل گرم سال ارائه شده است. در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن یک ساختمان بلند مرتبه با نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی در اقلیم تهران، به تحلیل عملکرد حرارتی نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی در طول سال پرداخته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از نماهای دو پوسته معمولی، اگر چه در ماه‌های سرد حدود ۲۴/۳ درصد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد؛ ولی می‌تواند موجب افزایش ۱۸/۳ درصدی بار سرمایشی در تابستان شود، در حالی که با استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی مصرف انرژی در ماه‌های سرد و گرم سال، به ترتیب حدود ۲۱/۴٪ و ۲۲/۵٪ کاهش خواهد یافت.</p> |
| <p><b>واژگان کلیدی:</b><br/>نمای دو پوسته، دیوار سبز، مصرف انرژی.</p> |   |

### ۱- مقدمه

و حرکت هوا در نظر گرفته می‌شود که این تهویه می‌تواند از نوع طبیعی یا مکانیکی باشد. در شکل (۱) طرحواره‌ای از نحوه عملکرد نماهای دو پوسته دارای تهویه طبیعی در فصل زمستان و تابستان نشان داده شده است. در طی فصل سرما، نمای دو پوسته عملکردی تقریباً مشابه با گلخانه و شیشه دو جداره دارد. به این صورت که هوای موجود در داخل شکاف گرم شده و این هوای گرم باعث کاهش اتلاف حرارت از طریق جابه‌جایی می‌شود. همچنین در طی فصل گرما، با باز شدن دریچه‌های پایین و بالا می‌توان مانع از تجمع هوای گرم در نمای دو پوسته شد و دمای ساختمان را در حد مطلوب نگه داشت [۱]. البته بدیهی است که استفاده از نماهای دو پوسته، هزینه‌های اجرایی قابل توجهی را به فرآیند ساخت و ساز تحمیل خواهد کرد؛ به

در سال‌های اخیر، استفاده از نماهای تمام شیشه در ساختمان‌های بلند مرتبه به دلیل زیبایی و امکان استفاده از دید مناسب گسترش زیادی یافته است. این در حالی است که به کارگیری این نوع از نما می‌تواند موجب افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها شود. بر این اساس، مدت-هاست که طراحان و مهندسان به دنبال یافتن تدابیری هستند که به کمک آنها بتوان ضمن حفظ دید و منظر مناسب در ساختمان‌های بلند مرتبه، میزان مصرف انرژی را کمینه نمود. یکی از تدابیر کارآمد در این زمینه، استفاده از نماهای دو پوسته است. ساز و کار عملکرد نماهای دو پوسته به این صورت است که این نماها دارای حداقل دو غشاء هستند و حد فاصل این دو غشاء مسیری برای تهویه

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zolfaghari@birjand.ac.ir

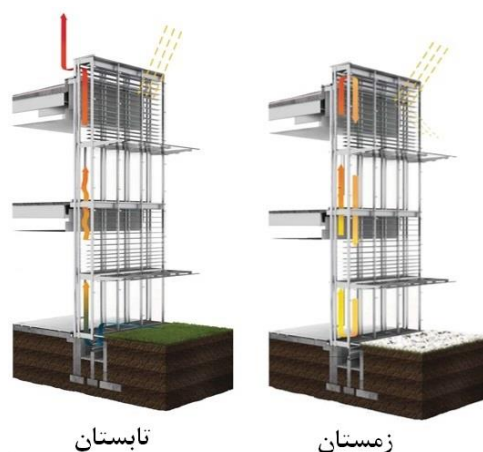
۱. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند

۲. دانشگاه بیرجند

۳. دانشگاه بیرجند

در سال ۲۰۰۴، مانز [۹] میزان انرژی خورشیدی عبوری از یک نمای دو پوسته دارای جابه‌جایی طبیعی را در شرایط مختلف به صورت عددی و تجربی تعیین نمود. همچنین در سال ۲۰۰۸، جیرو و حقیقت [۱۰] کاربرد روش حل منطقه‌ای<sup>۱</sup> را بر مدل‌سازی نماهای دو پوسته مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که می‌توان بدون حل کامل معادلات جریانی متداول در دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد نماهای دو پوسته را به کمک معادلات ساده منطقه‌ای با دقت قابل قبولی مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار داد. در سال ۲۰۱۰، هوکرمان و همکاران [۱۱] در تحقیقی تجربی، تأثیر نماهای دو پوسته را بر شرایط آسایش حرارتی ساکنان و کیفیت هوای داخل بررسی نمودند و نتایج را با حالت نمای تک پوسته مقایسه کردند. در همین سال، هاشمی و همکاران [۱۲] رفتار یک نمای دو پوسته تهویه شونده را برای اقلیم تهران به طور تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که در فصل گرم سال، دمای هوای عبوری از نماهای دو پوسته بین ۱ تا ۱۰ درجه سلسیوس از دمای هوای بیرون بیشتر خواهد بود و این امر می‌تواند موجب افزایش بار تابستانه شود. همچنین ایشان نشان دادند که استفاده از سایه‌انداز در نمای دو پوسته جنوبی، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد این نماها دارد. به طوری که در صورت استفاده از سایه‌انداز در فصل تابستان، دمای هوای عبوری از نمای دو پوسته بین ۷ تا ۱۲ درجه سلسیوس نسبت به دمای هوای بیرون کمتر خواهد بود و این امر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش بار برودتی خواهد داشت. در سال ۲۰۱۲، قدمیان و همکاران [۱۳] یک حل تحلیلی برای تعیین توزیع سرعت و دما در نمای دو پوسته ارائه نمودند و عملکرد این نماها را به لحاظ فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. در همین سال، صابونی و همکاران [۱۴] کاربرد نرم‌افزار انرژی پلاس را برای شبیه‌سازی نماهای دو پوسته توسعه دادند. همچنین در سال ۲۰۱۳، قدیمی و همکاران [۱۵] به تحلیل پارامتریک رفتار حرارتی یک نمای چند پوسته در اقلیم تهران پرداختند و میزان حرارت عبوری در نماهایی با بیش از دو پوسته را تحت تأثیر عوامل مختلف بررسی نمودند. پومپونی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ تأثیر استفاده از نماهای دو پوسته بر آسایش حرارتی ساکنان داخل یک ساختمان در

طوری که نتایج برخی تحقیقات نشان داده است که زمان بازگشت سرمایه برای اجرای نماهای دو پوسته حتی در کشورهای توسعه یافته و دارای تعرفه انرژی واقعی نیز به حدود ده سال خواهد رسید [۲]. همین امر موجب شده است تا روند توسعه نماهای دو پوسته با کندی همراه باشد. با این وجود، مزایای قابل توجهی از جمله شفافیت معماری، عایق‌بندی حرارتی و آکوستیکی مناسب، کاهش اثر منفی فشار در ساختمان‌های بلند مرتبه و امکان بهره‌گیری از تهویه طبیعی موجب شده است که کماکان توجه به توسعه و بهبود طراحی نماهای دو پوسته در دستور کار مهندسان و طراحان قرار داشته باشد [۳].



شکل ۱: طرحواره نحوه عملکرد نمای دو پوسته دارای تهویه طبیعی در زمستان و تابستان

در دو دهه اخیر، تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای در زمینه بررسی عملکرد نماهای دو پوسته انجام پذیرفته است. در سال ۲۰۰۱، گان [۴] در یکی از تحقیقات پیشگام در زمینه نماهای دو پوسته، میزان انتقال حرارت از این نماها را در شرایط مختلف به کمک حل عددی ارزیابی نمود. هسن و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۲، در تحقیقی به توسعه مبانی مدل‌سازی یک نمای دو پوسته پرداختند. در همین سال، کراگ [۶] ایده استفاده از تهویه مکانیکی در نماهای دو پوسته را مطرح کرد و میزان کارایی آن را مورد بررسی قرار داد. در سال ۲۰۰۴، گراتیا و دی‌هیرد [۷] اثرات تهویه طبیعی در نماهای دو پوسته را به طور جامع بررسی نمودند. همچنین ایشان طی تحقیقی دیگر [۸] در همین سال، عملکرد یک نمای دو پوسته جنوبی را با در نظر گرفتن آرایش‌ها و عوامل مؤثر متعدد مورد بهینه‌سازی قرار دادند.

<sup>۱</sup> Zonal Method

پوسته در فصل زمستان و تابستان نشان داده شده است. در سال ۲۰۰۳، مازیارز [۲۲] در یکی از تحقیقات پیشرو در این زمینه، با بررسی شرایط داخل نمای دو پوسته در نواحی مختلف و با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، پوشش گیاهی مناسب برای اقلیم‌های مختلف را پیشنهاد کرد. در سال ۲۰۰۵، استک و همکاران [۲۳] به صورت تجربی استفاده از پوشش گیاهی در نمای دو پوسته را بررسی کردند و نشان دادند که با استفاده از این روش می‌توان بار سرمایشی ساختمان را تا حدود ۲۰ درصد کاهش داد. در سال ۲۰۱۱، لین و همکارش [۲۴] به بررسی تجربی تأثیر استفاده پوشش گیاهی در نمای دو پوسته و مقایسه آنها با پرده‌های معمولی پرداختند و نشان دادند که استفاده از پوشش گیاهی می‌تواند موجب بهبود چشمگیر در عملکرد حرارتی نمای دو پوسته شود. در همان سال، فنگ و همکاران در تحقیق تجربی [۲۵] به بررسی تأثیر استفاده از پوشش گیاهی بومی بر عملکرد یک نمای دو پوسته تهویه شونده در فصل تابستان در شهر شانگهای پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش چگالی پوشش گیاهی در نمای دو پوسته، باعث کاهش محسوسی در دمای نمای دو پوسته و کاهش مصرف انرژی ساختمان خواهد شد. همچنین با توجه به پیچیدگی شبیه‌سازی پوشش‌های گیاهی عمودی، در سال ۲۰۱۵، لارسن و همکاران [۲۶]، دو روش برای شبیه‌سازی دیوارهای گیاهی با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس ارائه کردند. در سال ۲۰۱۶ وانگ و بالدوین [۲۷]، استفاده از نماهای دو پوسته سبز در ساختمان‌های مسکونی مرتفع هنگ کنگ را بررسی و پیشنهادهایی را جهت پژوهش بیشتر در مورد این نماها ارائه کردند. در سال ۲۰۱۷ پرز و همکاران [۲۸]، به مقایسه نماهای تک پوسته گیاهی و دو پوسته گیاهی پرداخته و بهترین میزان تراکم پوشش گیاهی برای اقلیم مدیترانه‌ای را مشخص کردند. همچنین ایشان نشان دادند که استفاده از این نماها می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا ۳۴٪ کاهش دهد. در سال ۲۰۱۸ یانگ و همکاران [۲۹] عملکرد نماهای دو پوسته گیاهی را در تابستان برای اقلیم شهر شانگهای بررسی کرده و نشان دادند که دمای داخل ساختمان تا حدود ۲ درجه سانتیگراد کاهش خواهد یافت. همچنین ایشان پیشنهاد کردند که تأثیر استفاده از این نماها بر مصرف انرژی سالانه ساختمان،

اقلیم گرم حاره‌ای را مورد بررسی قرار داد. وانگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۷ در یک تحقیق تجربی دو نوع شیشه‌ی عایق خورشیدی و نمای دو پوسته خورشیدی را با یکدیگر مقایسه کردند و نشان دادند که استفاده از نمای دو پوسته دارای سیستم جاذب انرژی خورشید به طور میانگین سالانه ۲۸/۴٪ و شیشه‌های عایق خورشیدی ۳۰٪ مصرف انرژی را کاهش می‌دهند. ژانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۷ نیز در یک پژوهش کاربردی و تجربی تأثیر استفاده از پرده‌های دارای سیستم برق خورشیدی همراه با نماهای دو پوسته را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که استفاده از این پرده‌ها در تابستان ۱۲/۶٪ انرژی بیشتری را نسبت به نمای دو پوسته معمولی کاهش خواهد داد. در همان سال آلبرتو و همکاران [۱۹] به صورت پارامتریک عوامل مختلف تأثیرگذار بر عملکرد نماهای دو پوسته نظیر هندسه نما، فاصله نمای دو پوسته، نوع بازشو، مقدار بازشو و نوع شیشه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. همچنین سو و همکاران [۲۰] با همین دیدگاه، بهترین پارامترهای نمای دو پوسته در اقلیم‌های مختلف چین را مورد ارزیابی قرار داده و انتخاب کردند.

شایان ذکر است که در تمامی تحقیقات مذکور، عملکرد نماهای دو پوسته در فصل سرد سال بسیار مطلوب ارزیابی شده است. این در حالی است که در فصل گرم سال، عملکرد نمای دو پوسته وابستگی شدیدی به نحوه طراحی اجزای نما و نیز اقلیم مورد بررسی نشان می‌دهد. به بیان دیگر، در صورتی که نمای دو پوسته در اقلیم‌های بسیار گرم استفاده شود، می‌تواند میزان بار ساختمان را افزایش دهد. برای رفع این مشکل، طراحان دو راه حل کلی را پیشنهاد می‌کنند: (۱) ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی دریافتی در طول روز و به تأخیر انداختن ورود انرژی به ساختمان [۲۱] و (۲) جلوگیری از ورود بار ناشی از تابش‌های خورشیدی با به-کارگیری اجزای کمکی مانند سایه‌انداز در نمای دو پوسته. بر این اساس، رویکرد جلوگیری از ورود بار ناشی از تابش-های خورشیدی با به-کارگیری اجزای سایه‌انداز منجر به ارائه ایده‌های مختلفی در زمینه طراحی نماهای دو پوسته شده است که در این میان می‌توان به ایده استفاده از پوشش‌های گیاهی<sup>۱</sup> در نماهای دو پوسته اشاره نمود. در شکل (۲) طرحواره‌ای از نحوه عملکرد پوشش گیاهی در نمای دو

<sup>1</sup> Green Wall

و مکانیزم تهویه هوا بین نمای دو پوسته به صورت تهویه طبیعی و در اثر اختلاف دما و اختلاف فشار می باشد. لایه های تشکیل دهنده پوسته خارجی از خارج به داخل به ترتیب شامل شیشه معمولی ۶ میلی متری، ۱۳ میلی متر گاز آرگون، شیشه معمولی ۶ میلی متری می باشد. در قسمت پایین و بالای نمای دو پوسته، دو دریچه هر یک به ابعاد  $0.7 \times 9.5$  مترمربع وجود دارد که طبق برنامه‌ی زمانی تعریف شده، این دریچه‌ها در طول دوره گرما از ساعت ۷ صبح تا ۷ عصر باز بوده و پس از آن بسته می‌باشند. همچنین این دریچه‌ها در طول دوره سرما همواره بسته بوده تا عملکرد گلخانه‌ای خود را حفظ کنند. لازم به ذکر است که خواص تابشی و حرارتی پوشش گیاهی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است [۲۶]. همچنین در جدول ۲ و ۳، خواص و ترتیب قرارگیری مواد به کار رفته در دیوارهای ساختمان آورده شده است.

جدول ۱: خواص تابشی و حرارتی پوشش گیاهی [۲۶-۲۳]

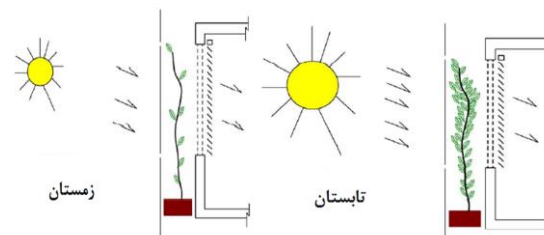
| مقدار | خاصیت تابشی/حرارتی                            |
|-------|---|
| ۰/۲   | ضریب عبور نور خورشید                          |
| ۰/۳   | ضریب بازتابش نور خورشید                       |
| ۰/۰۶  | ضریب عبور نور مرئی                            |
| ۰/۰۹  | ضریب بازتابش نور مرئی                         |
| ۰/۹۵  | ضریب نشر حرارتی                               |
| ۰     | ضریب عبور حرارتی                              |
| ۰/۵۹  | ضریب هدایت حرارتی ( $W/m^2C$ )                |
| ۰/۷۵  | چگالی پوشش گیاهی ( $m_{plant}^2/m_{wait}^2$ ) |
| ۲/۵   | شاخص مساحت برگ (LAI)                          |

همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی با سایر نماهای مشابه، یک نمای معمولی و یک نمای دو پوسته نیز مدل‌سازی شده است. البته میزان مقاومت حرارتی کلی دیواره در همه این حالت‌ها برابر فرض شده است.

### ۳- روش حل

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی فضای نمونه از نرم‌افزار دیزاین بیلدر<sup>۱</sup> استفاده شده است. این نرم‌افزار از حلگر پایه انرژی پلاس برای تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت حاکم بر ساختمان بهره می‌گیرد. بر این اساس، دیزاین بیلدر به روش موازنه حرارتی و رویکرد ناحیه‌ای برای هوا<sup>۲</sup>، محاسبات مربوط به انتقال حرارت و جریان هوا را به روش عددی تابع

بار سرمایشی و گرمایشی و همچنین میزان عبور نور خورشید در آینده مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۲: عملکرد پوشش گیاهی در نمای دو پوسته [۲۳]

چنانچه گفته شد، تحلیل عملکرد نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی تنها نزدیک به یک دهه سابقه دارد و مطالعات انجام شده در این زمینه، محدود به تعداد انگشت شماری از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر است. از سوی دیگر، تاکنون تحقیقی در زمینه مقایسه عملکرد سالانه نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی با نماهای دو پوسته معمولی و نماهای تک پوسته انجام نشده است و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه صرفاً محدود به فصل گرم سال بوده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر به تحلیل عملکرد نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی و مقایسه عملکرد آن با دو نوع نمای مختلف در یک ساختمان بلند مرتبه در اقلیم تهران پرداخته می‌شود.

### ۲- فضای نمونه

به منظور بررسی تأثیر نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی بر میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری بلند مرتبه، ساختمانی ۹ طبقه به ارتفاع ۲۷ متر در شهر تهران در نظر گرفته شده است. مساحت هر طبقه ۲۹۲ متر مربع و ارتفاع آن ۲/۸ متر است. در نمای شمالی و جنوبی ساختمان، به ترتیب پنج و چهار پنجره هر کدام به ابعاد  $2 \times 2$  مترمربع به صورت متقارن قرار دارند که از نوع دو جداره و پر شده با گاز آرگون بوده و ضریب انتقال حرارت کلی هر یک از آنها  $2.5 W/m^2.K$  می‌باشد. در شکل (۳)، نمایی از ساختمان نمونه مورد مطالعه در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

دمای طرح داخل برای فصل تابستان ۲۸/۱ و برای فصل زمستان ۲۳/۴ درجه سلسیوس و منطبق بر بازه آسایش حرارتی در نظر گرفته شده است. نمای دو پوسته‌ی ساختمان دارای ۷۰ سانتی‌متر عمق و ۲۷ متر ارتفاع است

<sup>2</sup> Airflow Network Method

<sup>1</sup> DesignBuilder

جزئیات مربوط به نحوه مدل‌سازی و معادلات حاکم در مرجع مهندسی نرم‌افزار [۳۰] آمده است.

جدول ۳: ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها و ضخامت آن‌ها

| اجزاء ساختمان   | لایه‌ها     | ضخامت (m) |
|-----------------|-------------|-----------|
| کف متصل به زمین | بتن با پوکه | ۰/۱       |
|                 | ملات        | ۰/۰۲      |
|                 | موزائیک     | ۰/۰۳      |
| کف بین طبقات    | گچ          | ۰/۰۰۵     |
|                 | گچ و خاک    | ۰/۰۲      |
|                 | لایه هوا    | ۰/۴       |
|                 | بتن         | ۰/۱       |
|                 | بتن با پوکه | ۰/۰۸      |
|                 | ملات        | ۰/۰۲      |
|                 | سرامیک      | ۰/۰۱      |
| سقف ساختمان     | آسفالت      | ۰/۰۴      |
|                 | قیرگونی     | ۰/۰۳      |
|                 | ملات        | ۰/۰۲      |
|                 | بتن با پوکه | ۰/۰۵      |
|                 | بتن         | ۰/۱       |
| دیوار خارجی     | لایه هوا    | ۰/۴       |
|                 | گچ و خاک    | ۰/۰۲      |
|                 | گچ          | ۰/۰۰۵     |
|                 | سنگ گرانیت  | ۰/۰۲      |
|                 | ملات        | ۰/۰۲      |
| دیوار داخلی     | آجر         | ۰/۲       |
|                 | گچ و خاک    | ۰/۰۲      |
|                 | گچ          | ۰/۰۰۵     |
|                 | گچ و خاک    | ۰/۰۲      |
|                 | آجر         | ۰/۱       |
| دیوار داخلی     | گچ و خاک    | ۰/۰۲      |
|                 | آجر         | ۰/۱       |
|                 | گچ          | ۰/۰۰۵     |

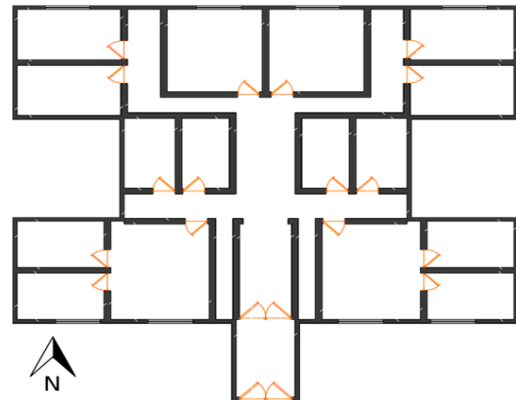
### ۳-۱- مدل‌سازی جریان هوا

مدل‌سازی جریان هوا در نرم‌افزار دیزاین بیلدر به روش ناحیه‌ای صورت گرفته و برای این مدل‌سازی، نرم‌افزار مطابق شکل (۴)، سه نقطه را در طول نمای دو پوسته و سه نقطه را در طول فضای داخلی ساختمان در نظر گرفته و جریان هوا را با استفاده از نیروی شناوری و فشار باد مدل‌سازی می‌کند. از این روش مدل‌سازی جریان هوا در مدل‌سازی نمای دو پوسته مراجع [۳۱-۳۳] استفاده شده است. در کلیه این مراجع نیز جهت اطلاع از جزئیات

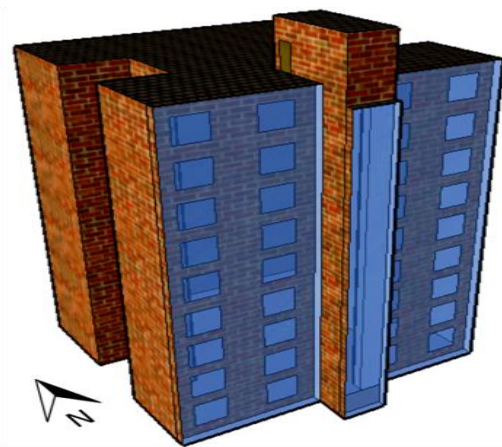
انتقال هدایت<sup>۱</sup> انجام می‌دهد.

جدول ۲: جنس مصالح به کار رفته در ساختمان [۲۱]

| مواد و مصالح | ضریب هدایت حرارتی (W/mK) | گرمای ویژه (J/kgK) | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|
| قیرگونی      | ۰/۲۵                     | ۱۰۰۰               | ۱۷۰۰                       |
| آسفالت       | ۱/۱۵                     | ۱۰۰۰               | ۲۱۱۰                       |
| آجر          | ۱                        | ۸۴۰                | ۱۹۰۰                       |
| ملات         | ۱/۱۵                     | ۹۲۰                | ۲۰۰۰                       |
| بتن با پوکه  | ۰/۳۴                     | ۸۴۰                | ۱۳۰۰                       |
| بتن          | ۱/۷۵                     | ۱۰۰۰               | ۲۳۰۰                       |
| لایه هوا     | ۰/۳                      | ۱۰۰۰               | ۱۰۰۰                       |
| گچ و خاک     | ۱/۱۵                     | ۸۴۰                | ۱۰۰۰                       |
| گچ           | ۰/۷                      | ۱۰۰۰               | ۱۳۰۰                       |
| سنگ گرانیت   | ۲/۹                      | ۸۴۰                | ۲۵۰۰                       |
| موزائیک      | ۱/۴                      | ۱۰۰۰               | ۳۰۰۰                       |
| سرامیک       | ۱/۳                      | ۸۴۰                | ۲۳۰۰                       |



(الف)

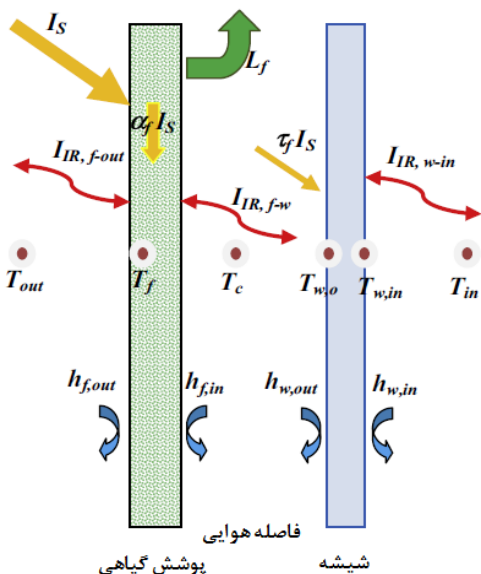


(ب)

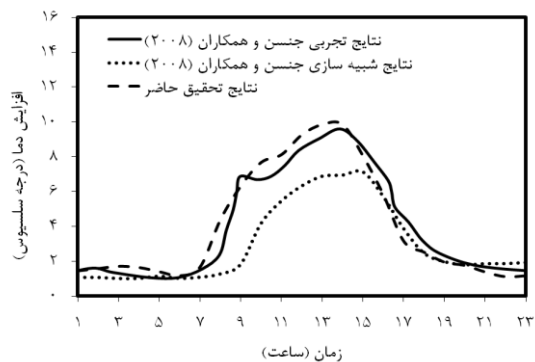
شکل ۳: نمایی از فضای نمونه تحقیق حاضر، (الف) پلان کلی طبقات ساختمان، (ب) نمای ظاهری ساختمان

<sup>۱</sup> Conduction Transfer Function

همچنین جزئیات مربوط به سایر معادلات مربوط به مدل - سازی پوشش گیاهی در نمای دو پوسته در مرجع [۳۴] آورده شده است.



شکل ۵: مکانیزم انتقال حرارت در نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی [۳۴]



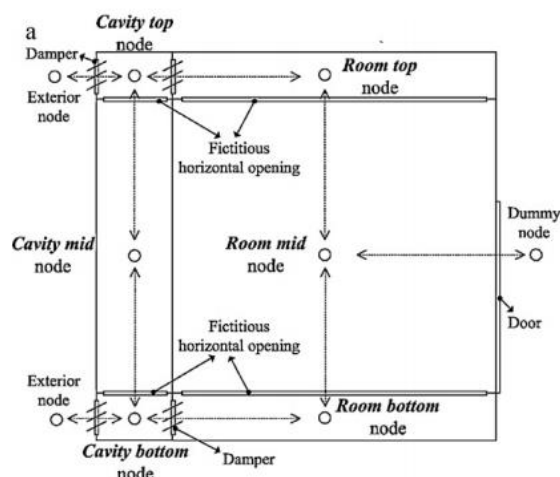
شکل ۶: مقایسه نتایج مربوط به افزایش دمای هوای عبوری از نمای دو پوسته نسبت به هوای بیرون [۳۵]

#### ۴- اعتبارسنجی حل

به منظور بررسی اعتبار حل، از مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج جنسن و همکاران [۳۵] استفاده شده است. ایشان در یک تحقیق تجربی، به بررسی عملکرد نمای دو پوسته در یک ساختمان نمونه پرداختند و سپس نتایج کار تجربی خود را با نتایج حاصل از مدل‌سازی ساختمان به کمک نرم‌افزار BSim مقایسه کردند.

در شکل (۶) مقایسه میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج جنسن و همکاران [۳۵] نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج تحقیق حاضر همخوانی بسیار مناسبی با نتایج تجربی دارد و حتی به نظر می‌رسد که به

معادلات حاکم به مرجع [۳۰] ارجاع داده شده است.



شکل ۴: مکانیزم مدل‌سازی جریان هوا به صورت ناحیه‌ای در نرم‌افزار دیزاین بیلدر [۳۱]

#### ۳-۲- مدل‌سازی انتقال حرارت

مدل‌سازی انتقال حرارت در نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی توسط معادله (۱) و شبکه تبادل حرارت که در شکل (۵) نشان داده شده، انجام شده است [۳۴].

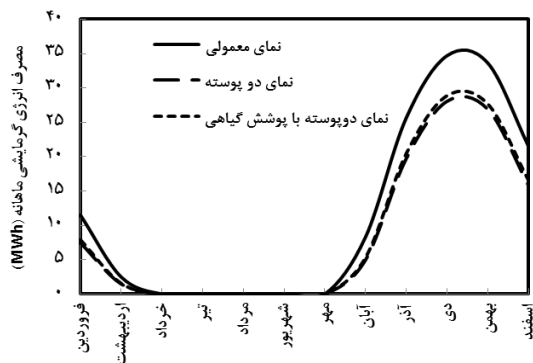
$$\alpha_s I_s - h_{f,out}(T_f - T_{out}) - h_{f,in}(T_f - T_c) - grad - L_f = (\rho c_p)_f e_f \frac{dT_f}{dt} \quad (1)$$

که  $\alpha_s$  ضریب جذب خورشیدی پوشش گیاهی،  $I_s$  تابش خورشیدی بر روی نمای سبز ( $W/m^2$ )،  $h_{f,in}$  و  $h_{f,out}$  ضریب انتقال حرارت در دو طرف پوشش گیاهی،  $T_{out}$  و  $T_c$ ،  $T_f$  ( $W/m^2K$ ) به ترتیب دمای پوشش گیاهی، داخل نمای دو پوسته و محیط بیرون ( $K$ )،  $grad$  شار خالص مادون قرمز بین نمای دو پوسته گیاهی و محیط اطراف ( $W/m^2$ )،  $L_f$  گرمای نهان ( $W/m^2$ ) چگالی پوشش گیاهی ( $kg/m^3$ )،  $c_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت ( $J/kg K$ ) و  $e_f$  متوسط ضخامت برگ ( $m$ ) است و رابطه (۲) را داریم:

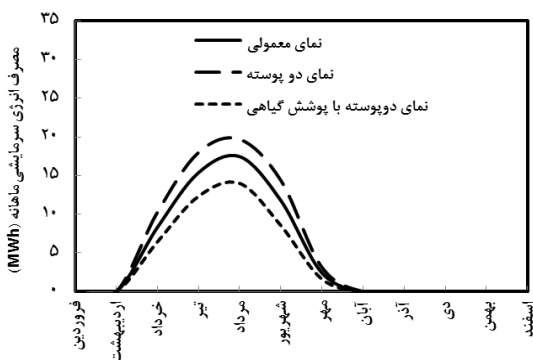
$$rad = \sigma \epsilon_f F_{ground}(T_f^4 - T_{ground}^4) + \sigma \epsilon_f F_{sky}(T_f^4 - T_{sky}^4) + \sigma \frac{\epsilon_f \epsilon_w}{\epsilon_f + \epsilon_w - \epsilon_f \epsilon_w}(T_f^4 - T_{w,in}^4) \quad (2)$$

که  $T_{w,out}$  و  $T_{sky}$ ،  $T_{ground}$  به ترتیب دمای زمین، آسمان و سطح خارجی شیشه ( $K$ )،  $\epsilon_w$  و  $\epsilon_f$  به ترتیب ضریب نشر مادون قرمز پوشش گیاهی و شیشه،  $F_{ground}$  و  $F_{sky}$  ضریب دید و  $\sigma$  ثابت استفان - بولتزمن است.

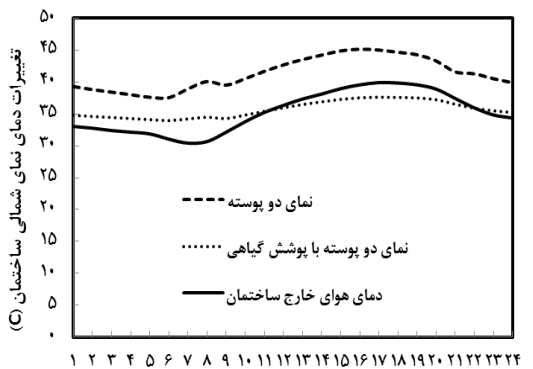
نمی‌یابد. بنابراین مصرف انرژی ساختمان حدود ۱۲,۵ مگاوات ساعت در سال کاهش خواهد یافت.



شکل ۷: نمودار مقایسه مصرف انرژی گرمایشی ماهانه



شکل ۸: نمودار مقایسه مصرف انرژی سرمایشی ماهانه



شکل ۹: نمودار تغییرات دمای داخل نمای دو پوسته شمالی در گرمترین روز

شکل (۹) تغییرات دمای نمای دو پوسته در گرمترین روز سال و شکل (۱۰) تغییرات تابش خورشید بر روی جداره داخلی ساختمان را نشان می‌دهند. بر این اساس استفاده از پوشش گیاهی توانسته با کاهش دمای هوای داخل نمای دو پوسته از حدود ۴۵ درجه سانتیگراد در ساعت ۱۷ عصر به حدود ۳۵ درجه سانتیگراد و یکنواخت کردن دمای داخل پوسته و همچنین کاهش شدت تابش خورشید بر روی

دلیل مدل‌سازی جریان هوا به صورت ناحیه‌ای، دقت نتایج تحقیق حاضر نسبت به نتایج نرم‌افزار BSim بیشتر است. حال که تا حدی از صحت روش مدل‌سازی و نتایج حاصله اطمینان حاصل شد، در ادامه به بررسی تأثیر نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی بر عملکرد ساختمان‌های بلند مرتبه پرداخته خواهد شد.

## ۵- نتایج

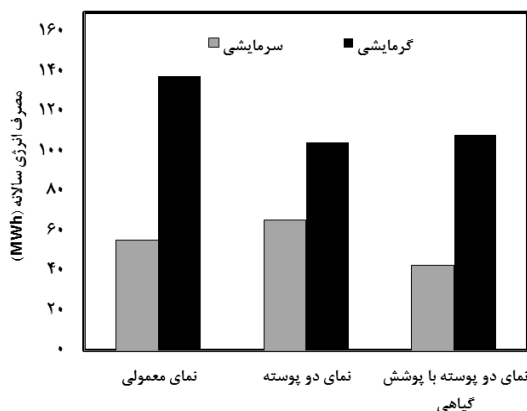
به منظور مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی با سایر نماهای مشابه، یک نمای معمولی و یک نمای دو پوسته فاقد پوشش گیاهی نیز مدل‌سازی شده است.

شکل (۷) میزان مصرف انرژی مورد نیاز ساختمان جهت گرمایش در فصول سرد سال برای سه نمای مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استفاده از نمای دو پوسته به طور کلی در فصل سرما با عملکرد شبه گلخانه‌ای خود توانسته است مصرف انرژی ساختمان را کاهش دهد و این کاهش مصرف در ماه‌های سردتر بیشتر و حدود ۷ مگاوات ساعت می‌باشد. همچنین نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی عملکردی مشابه داشته و تنها به دلیل وجود بخش اندکی از گیاهان در نمای دو پوسته و مانع شدن از ورود تابش خورشید به ساختمان مصرف انرژی ساختمان را بسیار ناچیز افزایش می‌دهند.

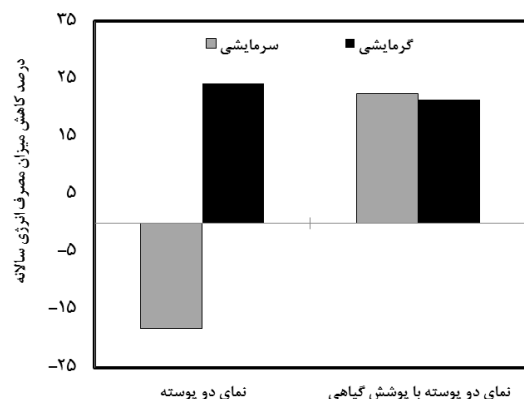
در شکل (۸) میزان مصرف انرژی سرمایشی ساختمان برای سه نمای مختلف به ازای ۱۲ ماه سال نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، استفاده از نماهای دو پوسته در ماه‌های گرم سال عملکرد مطلوبی نداشته و مصرف انرژی ساختمان را حدود ۱۰ مگاوات ساعت افزایش می‌دهد. دلیل عملکرد نامناسب نمای دو پوسته نسبت به حالت معمول به این موضوع برمی‌گردد که هوای موجود در بین نمای بیرونی و جداره ساختمان گرم شده و این هوای گرم برای خروج از فضای نمای دو پوسته نیاز به زمان بیشتری نسبت به نمای معمولی دارد لذا گرمای هوا به جداره‌های ساختمان منتقل شده و باعث افزایش دمای ساختمان و در پی آن افزایش مصرف انرژی سرمایشی شده است. این مشکل را می‌توان به کمک نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی اصلاح کرد. گیاهان موجود در فاصله نمای دو پوسته مانع از تابش مستقیم نور خورشید بر روی جداره‌های داخلی می‌شود و در نتیجه دمای هوای داخل نمای دو پوسته خیلی افزایش

اردیبهشت و آبان، حدود ۴۰ درصد مصرف انرژی را کاهش دهد. در حالی که استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی، مصرف انرژی در این ماه ها را تا نزدیک به ۳۸ درصد کاهش داده است.

همچنین، شکل (۱۲) نشان می دهد که نماهای دو پوسته معمولی در بهترین حالت در ماه مرداد حدود ۱۰ درصد و در بدترین حالت در ماه مهر حدود ۳۰ درصد به میزان مصرف انرژی ساختمان اضافه کرده است. اما استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی توانسته این عملکرد منفی را به عملکردی مطلوب تبدیل کرده و در بهترین حالت در ماه مهر ۳۳ درصد میزان مصرف انرژی سرمایه‌ی ساختمان را کاهش دهد. عملکرد مناسب نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی در کلیه ماه های گرم ادامه داشته و به طور میانگین حدود ۲۳ درصد میزان مصرف انرژی سرمایه‌ی ساختمان را کاهش داده است. شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان و درصد کاهش مصرف انرژی در کل سال را نشان می دهند.

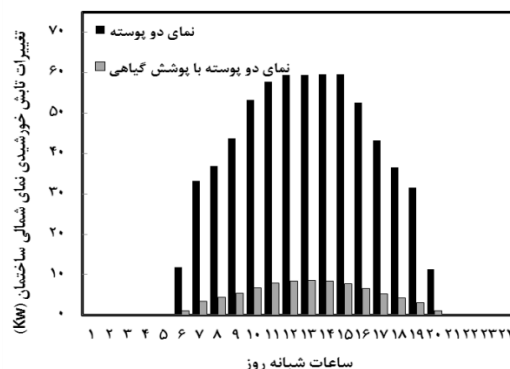


شکل ۱۳: نمودار مقایسه میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان

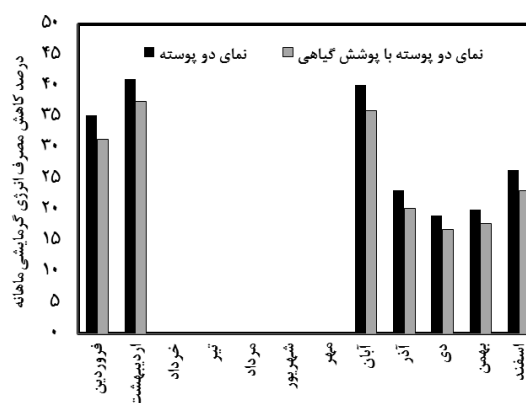


شکل ۱۴: نمودار مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی سالانه با استفاده از نمای دوپوسته با پوشش گیاهی

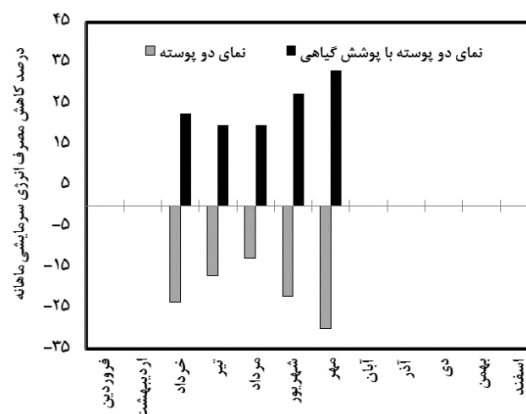
پوسته ساختمان، عملکرد نمای دو پوسته را به شکلی مطلوبی اصلاح کند.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات تابش خورشیدی داخل نمای دو پوسته شمالی در گرمترین روز سال



شکل ۱۱: نمودار مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی گرمایشی ماهانه با استفاده از نمای دو پوسته با پوشش گیاهی



شکل ۱۲: نمودار مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی سرمایشی ماهانه با استفاده از نمای دو پوسته با پوشش گیاهی شکل های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب درصد بهینه سازی مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان به ازای ۱۲ ماه سال را نشان می دهند. طبق شکل (۱۱)، استفاده از نمای دو پوسته معمولی در بهترین حالت توانسته در ماه های



|  |               |  |
|--|---------------|--|
| دمای نمای دوپوسته (K)  | $T_c$         | مشاهده می‌شود که استفاده از نماهای دو پوسته معمولی در ماه‌های سرد در مجموع با مصرف ۱۰۵ مگاوات ساعت انرژی گرمایشی و کاهش ۲۴/۳ درصدی مصرف انرژی و در ماه‌های گرم با مصرف ۶۵/۵ مگاوات ساعت انرژی سرمایشی و افزایش ۱۸/۳ درصدی مصرف انرژی، عملکرد مناسب زمستانه و عملکرد نامناسب تابستانه از خود نشان داده است. این در حالی است که نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی می‌توان این عملکرد دوگانه را به عملکردی مطلوب در طول سال تبدیل کرد؛ به طوری که استفاده از نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی با مصرف ۱۰۸ مگاوات ساعت انرژی گرمایشی در ماه‌های سرد (۲۱/۴٪ کاهش در مصرف انرژی) و نیز با مصرف ۴۲/۹ مگاوات ساعت انرژی سرمایشی (۲۲/۵٪ کاهش در مصرف انرژی) عملکرد بسیار مناسبی را نشان می‌دهد. |
| شار خالص مادون قرمز بین نمای دو پوسته گیاهی و محیط اطراف ( $W/m^2$ ) | $q_{rad}$     |  |
| گرمای نهان ( $W/m^2$ )   | $L_f$         |  |
| چگالی پوشش گیاهی ( $W/m^2$ )   | $\rho$        |  |
| گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kg K)                                     | $c_p$         |  |
| متوسط ضخامت برگ (m)  | $e_f$         |  |
| ثابت استفان-بولتزمن (m)  | $\sigma$      |  |
| ضریب نشر مادون قرمز پوشش گیاهی                                       | $\epsilon_f$  |  |
| ضریب نشر مادون قرمز شیشه   | $\epsilon_w$  |  |
| ضریب دید زمین  | $F_{qground}$ |  |
| ضریب دید آسمان   | $F_{sky}$     |  |
| دمای زمین (K)  | $T_{ground}$  |  |
| دمای آسمان (K)   | $T_{sky}$     |  |
| دمای سطح خارجی شیشه (K)  | $T_{w,out}$   |  |
| دمای سطح داخلی شیشه (K)  | $T_{w,in}$    |  |

#### ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، عملکرد نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی به لحاظ میزان مصرف انرژی ماهانه و سالانه در شرایط اقلیمی تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی از مزیت چشمگیری نسبت به نماهای معمولی و نیز نماهای دو پوسته متداول برخوردار است. به طوری که نماهای دو پوسته دارای پوشش گیاهی می‌توانند هم در فصل گرم و هم در فصل سرد سال عملکرد مناسبی را از خود نشان دهند. بر این اساس، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از نمای دو پوسته دارای پوشش گیاهی می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا حدود ۲۱/۴٪ در ماه‌های سرد و تا حدود ۲۲/۵٪ در ماه‌های گرم سال کاهش دهد و از این طریق موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی ساختمان گردد.

#### ۷- فهرست علائم

|   |            |
|---|------------|
| ضریب جذب خورشیدی پوشش گیاهی               | $\alpha_f$ |
| تابش خورشیدی بر روی نمای سبز ( $W/m^2$ )  | $I_s$      |
| ضریب انتقال حرارت پوشش گیاهی ( $W/m^2K$ ) | $h_f$      |
| دمای پوشش گیاهی (K)                       | $T_f$      |
| دمای محیط بیرون (K)                       | $T_{out}$  |

## ۸- مراجع

- [1] H. Poirazis, Double skin façades for office buildings, Report EBD-R--04/3, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, pp. 1–192, 2004.
- [2] D. Stribling, B. Stigge, A critical review of the energy savings and cost payback issues of double façades, in CIBSE/ASHRAE Conference, 2009.
- [3] A. Ghanbaran, A. Hosseinpour, "Assessment of thermal behavior of double skin façade in the climate of Tehran", Sustainable Architecture and Urban Development, Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 43–53, (In Persian).
- [4] G. Gan, "Thermal transmittance of multiple glazing: computational fluid dynamics prediction", Applied Thermal Engineering, Vol. 21, No. 15, 2001, pp. 1583–1592.
- [5] J. L. M. Hensen, M. Bartak, D. Frantisek, "Modeling and simulation of a double-skin facade system", ASHRAE Transactions, Vol. 108, No. 2, 2002, pp. 1251–1259.
- [6] M. Kragh, Mechanically ventilated double skin façades, in: M. Anson, J. M. Ko, E. S. S. Lam, Advances in Building Technology, Eds., pp. 1233-1240, Oxford: Elsevier, 2002.
- [7] E. Gratia, A. De Herde, "Natural ventilation in a double-skin façade", Energy and Buildings, Vol. 36, No. 2, 2004, pp. 137–146.
- [8] E. Gratia, A. De Herde, "Optimal operation of a south double-skin façade", Energy and Buildings, Vol. 36, No. 1, 2004, pp. 41–60.
- [9] H. Manz, "Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection", Energy and Buildings, Vol. 36, No. 2, 2004, pp. 127–136.
- [10] T. E. Jiru, F. Haghghat, "Modeling ventilated double skin façade—A zonal approach", Energy and Buildings, Vol. 40, No. 8, 2008, pp. 1567–1576.
- [11] V. Huckemann, E. Kuchen, M. Leão, É. F. T. B. Leão, "Empirical thermal comfort evaluation of single and double skin façades, Building and Environment", Vol. 45, No. 4, 2010, pp. 976–982.
- [12] N. Hashemi, R. Fayaz, M. Sarshar, "Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate", Energy and Buildings, Vol. 42, No. 10, 2010, pp. 1823–1832.
- [13] H. Ghadamian, M. Ghadimi, M. Shakouri, M. Moghadasi, M. Moghadasi, "Analytical solution for energy modeling of double skin façades building, Energy and Buildings", Vol. 50, No. 0, 2012, pp. 158–165.
- [14] M. A. Sabooni, H. M. Vaseti, M. Maerefat, A. Azimi, Development of the capability of EnergyPlus software to simulation of building double-skin facade, in International Symposium on Sustainable Energy in Buildings and Urban Areas, Kusadasi, Turkey, 2012.
- [15] M. Ghadimi, H. Ghadamian, A. A. Hamidi, M. Shakouri, S. Ghahremanian, "Numerical analysis and parametric study of the thermal behavior in multiple-skin façades", Energy and Buildings, Vol. 67, 2013, pp. 44–55.
- [16] F. Pomponi, S. Barbosa, A.E. Piroozfar, "On the Intrinsic Flexibility of the Double Skin Façade: A Comparative Thermal Comfort Investigation in Tropical and Temperate Climates", Energy Procedia, Vol. 111, 2017, pp. 530–539.
- [17] M. Wanga, J. Peng, N. Li, H. Yang, C. Wang, X. Li, T. Lu, "Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units", Applied Energy, Vol. 194, 2017, pp. 148–160.
- [18] Y. Luo, L. Zhang, X. Wang, L. Xie, Z. Liu, J. Wu, Y. Zhang, X. He, "A comparative study on thermal performance evaluation of a new double skin façade system integrated with photovoltaic blinds", Applied Energy, Vol. 199, 2017, pp. 281–293.
- [19] A. Alberto, N.M.M. Ramos, R.M.S.F. Almeida, "Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries", Journal of Building Engineering, Vol. 12, 2017, pp. 87–98.
- [20] Z. Su, X. Li, F. Xue, "Double-skin façade optimization design for different climate zones in China", Solar Energy, Vol. 155, 2017, pp. 281–290.
- [21] A. Zolfaghari, M. Saadati Nasab, E. Norozi, "Energy Analysis of Using Double Skin Façade with Phase Change Materials in a High-Rise Building Under Climate Conditions of Tehran", Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, 2015, pp. 34–40, (In Persian).
- [22] A. Maziarz, Performance of the double skin facade with plants, TU Delft, Delft, p. 105, 2003.
- [23] W.J. Stec, A.H.C. van Paassen, A. Maziarz, "Modelling the double skin facade with plants", Energy and Buildings, Vol. 37, 2005, pp. 419–427.
- [24] J. Lin, T. Mingfang, Experiment on the shading performance and heat transfer through the double skin façade with plants, Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011.
- [25] W. Fang, Z. Xiaosong, T. Junjie, L. Xiuwei, "The thermal performance of double skin facade with Tillandsia usneoides plant curtain", Energy and Buildings, Vol. 43, No. 9, pp. 2127–2133, 2011.

- [26] S. L. Larsen, C. Filippin, G. Lesino, "Thermal simulation of a double skin façade with plants", *Energy Procedia*, Vol. 57, 2014, pp. 1763–1772.
- [27] I. Wong, A. N. Baldwin, "Investigating the potential of applying vertical green walls to high-riser residential buildings for energy-saving in sub-tropical region", *Building and Environment*, Vol. 97, 2016, pp. 34–39.
- [28] G. Perez, J. Coma, S. Sol, L. F. Cabeza, "Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect", *Applied Energy*, Vol. 187, 2017, pp. 424–437.
- [29] F. Yang, F. Yuan, F. Qian, Z. Zhuang, J. Yao, "Summer time thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 39, 2018, pp. 43–51.
- [30] EnergyPlus, *EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations*, 2007.
- [31] D. W. Kim, C. S. Park, "Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin facade with EnergyPlus", *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 12, 2011, pp. 3635–3645.
- [32] L. Gu, *Airflow network modeling in energy plus*, *Proceedings: Building Simulation*, 2007.
- [33] N. M. Mateusa, A. Pinto, G. C. D. Grac, "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell", *Energy and Buildings*, Vol. 75, pp. 511–522, 2014.
- [34] S. L. Larsen, C. Filippin, G. Lesino, "Modeling double skin green façade with traditional thermal simulation software", *Solar Energy*, Vol. 121, 2015, pp. 56–67.
- [35] R. L. Jensen, O. Kalyanova, P. Heiselberg, *Modeling a naturally ventilated double skin façade with a building thermal simulation program*, in 8th Nordic Symposium of Building Physics, 2008.