سال دوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۴، ص ص ۲۰- ۲۷
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۵
تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۰۵

# بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در نمای دو پوسته؛ راهکاری مؤثر برای بهره گیری از انرژی تجدید پذیر خورشید

**سید علیرضا ذوالفقاری[1*]، مهران سعادتی نسب[2]، الهه نوروزی جاجرم[2]**

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک و مدیرگروه پژوهشی انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی دانشگاه بیرجند، بیرجند، بیرجند
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۳۷۶، zolfaghari@birjand.ac.ir

**چکیده**

امروزه استفاده از نماهای دو پوسته به دلیل تأثیر قابل توجه بر کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها در کنار جذب حداکثری انرژی تجدید پذیر خورشید مورد توجه بسیاری از مهندسان قرار گرفته است. تحقیقات پیشین نشان داده است که نماهای دو پوسته در فصل سرد عملکرد حرارتی مطلوبی دارد. این در حالی است که در فصل گرم سال، استفاده از نمای دو پوسته می‌تواند گاهی موجب افزایش بار ساختمان شود. بر این اساس در سالهای اخیر، ایده استفاده از نماهای دو پوسته دارای مواد تغییر فاز دهنده به منظور کاهش مصرف انرژی در فصل گرم سال ارائه شده است. در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن یک ساختمان بلند مرتبه دارای نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده در اقلیم‌های تبریز و بندرعباس، به تحلیل عملکرد حرارتی نماهای دو پوسته تغییر فاز دهنده در طول سال پرداخته شده است. نتایج نشان داد که در اقلیم تبریز استفاده از نماهای دو پوسته معمولی، اگر چه در ماه‌های سرد حدود ۲۰ درصد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد؛ ولی می‌تواند موجب افزایش ۱۴ درصدی بار سرمایشی در تابستان شود. این در حالی است که با استفاده از نماهای دو پوسته با شیشه‌های تغییر فاز دهنده مصرف انرژی در ماه‌های سرد و گرم سال، به ترتیب حدود ۱۲/۵٪ و ۷٪ کاهش خواهد یافت. برای اقلیم بندرعباس نیز عملکرد نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده در طول سال مثبت بوده و مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی را به ترتیب ۵/۷٪ و ۱۲/۶٪ کاهش داده است.

**کلیدواژگان:** نمای دو پوسته، مواد تغییر فاز دهنده، مصرف انرژی.

# Utilizing phase change materials in double skin facade; An effective approach for using solar renewable energy

**Alireza Zolfaghari[1*], Mehran Sa'adati Nasab [2], Elaheh Norouzi Jajarm[2]**

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir
Received: 26 November 2015 Accepted: 26 December 2015

**Abstract**

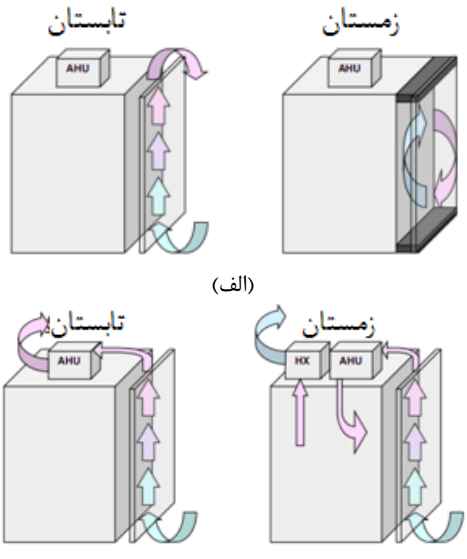
Nowadays, using the double skin facades has attracted the attention of many engineers because of its significant effects on the buildings' energy consumption, beside of maximum absorption of solar renewable energy. The previous researches have shown that the double skin facades have an appropriate thermal performance in the cold season. However, using double skin façade may lead to increase the building's energy demand in the warm season. Therefore, in the recent years, the idea of using double skin facades with phase change materials (PCM) has been proposed in order to decrease the summer energy consumption of buildings. In this study, a thermal performance analysis has been performed by considering a high-rise building with the phase change material double skin façade in Tabriz and Bandarabas climatic conditions. The results indicate that using the ordinary double skin façades in Tabriz climatic conditions can decrease the building's energy consumption up to 20% in cold months of the year; but it can lead to increase the summer cooling load about 14%. However, by using double skin façades with the phase change material glazing, the building's energy consumption in cold and warm seasons may decrease about 12.5% and 7%, respectively. Also, the double skin façades with the phase change material glazing shows a good performance in Bandarabas climatic conditions with cooling and heating load energy saving about 5.7 and 12.6%, respectively.

**Keywords:** Double skin façade, Phase change materials, Energy consumption

## ۱- مقدمه

انرژی پایدار به مفهوم استفاده از منابع به شیوه ای است که انرژی لازم برای جمعیت فعلی فراهم شود و شرایط نسل های آتی نیز مورد توجه قرار گیرد. انرژی های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشید، باد، آب، امواج، جزر و مد و ...، نقش موثری را در این خصوص ایفا می‌کنند. یکی از بارزترین مصادیق استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، استفاده از نور خورشید در طول روز به عنوان منبع روشنایی طبیعی می‌باشد. از این رو کاربرد نماهای شیشه‌ای در ساختمان‌ها با گسترش قابل توجهی روبه‌رو است. این در حالی است که استفاده از نماهای تمام شیشه، می‌تواند موجب افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها شود. بر این اساس، مدتهاست که طراحان و مهندسان به دنبال یافتن تدابیری هستند که به کمک آنها بتوان ضمن استفاده‌ی حداکثری از روشنایی طبیعی جهت تامین نور کافی در ساختمان‌های بلند مرتبه، میزان مصرف انرژی را کمینه نمود. در این میان، یکی از مؤثرترین تدابیر، استفاده از نماهای دو پوسته است.

سازوکار 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 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 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].




**شکل ۱** طرحواره نحوه عملکرد نمای دو پوسته در زمستان و تابستان (الف) با تهویه طبیعی (ب) با تهویه مکانیکی[۱]

شایان ذکر است که استفاده از نماهای دو پوسته، طبعاً هزینه‌های اجرایی قابل توجهی را به فرآیند ساخت و ساز تحمیل خواهد کرد؛ به 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]. به بیان دیگر، تمایل کارفرمایان به معماری شفاف جهت استفاده حداکثری از انرژی تجدیدپذیر خورشید در ساختمان‌های اداری بلند مرتبه از یک سو و هزینه‌های بالای انرژی در ساختمانهای دارای نمای شیشه‌ای از سوی دیگر، باعث شده است تا استفاده از نماهای دو پوسته به عنوان یک راه حل مؤثر برای بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر خورشید، مورد توجه طراحان و مهندسان قرار داشته باشد.

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. هنسن و همکارانش[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 کارآیی 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. 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[1] 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 همکارانش[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 همکارانش[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

1. Zonal Method

همین سال، صابونی و همکاران[۱۴] کاربرد نرم‌افزار انرژی پلاس را برای شبیه‌سازی نماهای دو پوسته توسعه دادند. همچنین در سال ۲۰۱۳، قدیمی و همکارانش[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.

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) جلوگیری از ورود بار ناشی از تابش‌های خورشیدی با بکارگیری اجزای کمکی مانند سایه‌انداز در نمای دو پوسته و (۲) ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی دریافتی در طول روز و به تأخیر انداختن ورود انرژی به ساختمان. بر این اساس، رویکرد ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی منجر به ارائه ایده‌های مختلفی در زمینه طراحی نماهای دو پوسته شده است که در این میان می‌توان به ایده استفاده از مواد تغییر فاز دهنده[1] در نماهای دو پوسته اشاره نمود. لازم به توضیح است که مواد تغییر فازدهنده، موادی هستند که دمای ذوب آنها در بازه عملکردی سیستم قرار دارد و در محدوده تغییر دمای سیستم، دچار تغییر فاز می‌شوند. بر این اساس، با ورود حرارت به سیستم (مثلاً در هنگام دریافت حرارت تابشی در طول روز) این مواد ذوب می‌شوند و گرما را در خود ذخیره می‌کنند و مانع از افزایش دمای سیستم می‌شوند. در عوض، هنگامی که سیستم در حال سرد شدن است (مثلاً در طول شب)، مواد تغییر فاز دهنده مجدداً منجمد شده و گرمای ذخیره شده را به سیستم بر می‌گردانند. در سال ۲۰۰۵، وینلادر و همکارانش[۱۶] در یکی از تحقیقات پیشرو در این زمینه، ایده استفاده از مواد تغییر فاز دهنده شفاف در شیشه‌های ساختمانی را مطرح کردند و بکارگیری این شیشه‌ها را در نماهای دو پوسته پیشنهاد دادند. در سال ۲۰۱۲، دی گارسیا و همکارانش[۱۷] میزان جذب خورشیدی را برای یک نما دو پوسته تهویه شونده و دارای مواد تغییر فازدهنده به طور تجربی تعیین نمودند. در سال ۲۰۱۳، گویا و همکاران[۱۸] به بررسی تجربی تأثیر استفاده شیشه‌های دارای مواد تغییر فاز دهنده در نمای دو پوسته و مقایسه آنها با شیشه‌های معمولی پرداختند و نشان دادند که استفاده از این شیشه‌ها می‌تواند به ویژه در روزهای آفتابی تابستان موجب بهبود چشمگیر در عملکرد حرارتی نمای دو پوسته شود. در همان سال، دی گارسیا و همکارانش در دو تحقیق تجربی[۱۹] و عددی[۲۰] به بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد یک نمای دو پوسته تهویه شونده در فصل زمستان پرداختند. همچنین ایشان در سال ۲۰۱۴ در تحقیقی مشابه[۲۱]، عملکرد نمای مذکور را برای کل سال مورد تحلیل و بررسی قرار دادند.

چنانچه گفته شد، تحلیل عملکرد نماهای دوپوسته دارای مواد تغییر فاز دهنده کمتر از 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، تا کنون تحقیقی در زمینه مقایسه عملکرد سالانه نماهای دو پوسته تغییر فاز دهنده با نماهای دو پوسته معمولی و نماهای تک پوسته انجام نشده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر به تحلیل و مقایسه عملکرد سه نوع نمای مختلف در یک ساختمان بلند مرتبه در اقلیم‌های تبریز و بندرعباس پرداخته می‌شود.

## ۲- فضای نمونه

به منظور بررسی تاثیر نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده بر میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری بلند مرتبه، ساختمانی ۹ طبقه به ارتفاع ۲۷ متر در شهر تبریز و بندرعباس 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 هرکدام به ابعاد ۲×۲ 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 ۲، 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 بازه‌ی آسایش حرارتی افراد در نظر گرفته شده است. همچنین، برنامه‌ی زمان‌بندی استفاده از ساختمان اداری مذکور، به این صورت است که در طول روز از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعدازظهر تعداد ۱۰ نفر از کارمندان در هر واحد مشغول به کار سبک هستند و در روز جمعه ساختمان خالی از افراد است. ساختمان در تابستان در تمام زمان کارکرد، از نور طبیعی و در زمستان تا ساعت ۱۵ از نور طبیعی و یک ساعت از روشنایی الکتریکی استفاده می‌کند.

نمای دو پوسته‌ی ساختمان دارای ۷۰ سانتی‌متر عمق و ۲۷ متر ارتفاع است و مکانیزم تهویه‌ی هوای بین نمای دوپوسته به صورت تهویه طبیعی و در اثر اختلاف دما و اختلاف فشار می‌باشد. لایه‌های تشکیل دهنده‌ی پوسته-ی خارجی از خارج به داخل به ترتیب شامل شیشه معمولی ۶ میلیمتری، ۱۳ میلیمتر گاز آرگون، شیشه معمولی ۶ میلیمتری و ۳ میلیمتر پوشش تغییر فاز دهنده می‌باشد. در قسمت پایین و بالای نمای دو پوسته، دو دریچه هر یک به ابعاد ۹/۵×۰/۷ متر مربع 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 دوره‌ی سرما همواره بسته بوده تا عملکرد گلخانه‌ای خود را حفظ کنند. لازم به ذکر است که دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر مبنای نتایج تحقیقات مرتبط پیشین، برابر با ۳۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده [۲۲, ۲۳] و خواص حرارتی و تابشی پارافین صنعتی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است[۲۴, ۲۵].

دلایل استفاده از ماده تغییر فاز دهنده مرکب از پارافین با زنجیره مستقیم آلکان ( $CH3(CH2)16CH3$ ) عبارتند از : ۱) خواص حرارتی آن در دسترس است ۲) دمای ذوب آن در یک نقطه ثابت و حدود ۳۰ درجه سانتیگراد است ۳) در هردو فاز مایع و جامد نورگذر است ۴) مقادیر زیادی از آن در دسترس و هزینه‌ی آن کم است[۲۶].

همچنین در جدول ۲ و ۳، خواص و ترتیب قرارگیری مواد به کار رفته در دیوارهای ساختمان آورده شده است. ضمناً به منظور مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده 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.

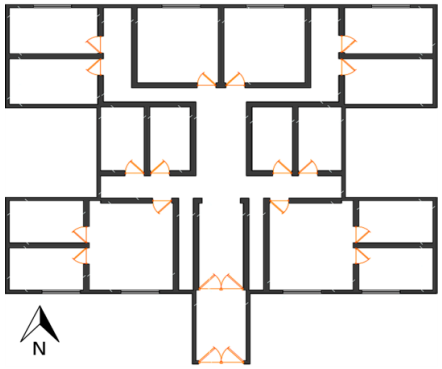
2. Phase Change Materials (PCM)

**جدول ۱** خواص ترموفیزیکی عایق تغییر فازدهنده (ضخامت ۳ میلیمتر) [۲۴, ۲۵]

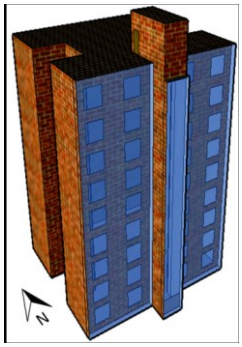
| خواص | واحد | مایع | جامد |
|---|---|---|---|
| گرمای نهان ذوب | (kJ/kg) | ۲۴۳/۵ | ۲۴۳/۵ |
| چگالی | (kg/m³) | ۷۸۰ | ۸۶۵ |
| گرمای ویژه | (J/kgK) | ۲۱۹۶ | ۱۹۳۴ |
| ضریب هدایت حرارتی | (W/mK) | ۰/۱۴۸ | ۰/۳۵۸ |
| ضریب عبور خورشیدی | | ۰,۸ | ۰,۶ |
| ضریب جذب خورشیدی | | ۰,۱۵ | ۰,۲ |
| ضریب بازتابش خورشیدی | | ۰,۰۵ | ۰,۲ |
| ضریب عبور مرئی | | ۰,۹ | ۰,۷۳ |
| ضریب جذب مرئی | | ۰,۰۳ | ۰,۱۲ |
| ضریب بازتابش مرئی | | ۰,۰۷ | ۰,۱۵ |

**جدول ۲** جنس مصالح به کار رفته در ساختمان

| مواد و مصالح | ضریب هدایت حرارتی (W/mK) | گرمای ویژه (J/kgK) | چگالی (kg/m³) |
|---|---|---|---|
| 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 |
| موزاییک | ۱/۴ | ۱۰۰۰ | ۳۰۰۰ |
| سرامیک | ۱/۳ | ۸۴۰ | ۲۳۰۰ |




(الف)



(ب)

**شکل ۲** نمایی از فضای نمونه تحقیق حاضر (الف) پلان کلی طبقات ساختمان، (ب) نمای ظاهری ساختمان

**جدول ۳** ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها و ضخامت آن‌ها از خارج به داخل

| 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 |
| | لایه هوا | ۰/۴ |
| | گچ و خاک | ۰/۰۲ |
| | گچ | ۰/۰۰۵ |
| دیوار خارجی | سنگ گرانیت | ۰/۰۲ |
| | ملات | ۰/۰۲ |
| | آجر | ۰/۲ |
| | گچ و خاک | ۰/۰۲ |
| | گچ | ۰/۰۰۵ |
| دیوار داخلی | گچ | ۰/۰۰۵ |
| | گچ و خاک | ۰/۰۲ |
| | آجر | ۰/۱ |
| | گچ و خاک | ۰/۰۲ |
| | گچ | ۰/۰۰۵ |

## ۳- روش حل

در این تحقیق به منظور مدلسازی فضای نمونه از نرم‌افزار دیزاین بیلدر[۱] استفاده شده است. این نرم‌فزار از حلگر پایه انرژی‌پلاس[۲] برای تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت حاکم بر ساختمان بهره می‌گیرد. بر این اساس، دیزاین بیلدر به روش موازنه حرارتی و رویکرد ناحیه‌ای برای هوا[۳]، محاسبات مربوط به انتقال حرارت و جریان هوا را انجام می‌دهد. جزئیات مربوط به نحوه مدلسازی و معادلات حاکم در مرجع مهندسی نرم‌افزار[۲۷] آمده است. همچنین، مدلسازی انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده توسط معادله انرژی همراه با تغییر فاز انجام شده است[۲۸]:

$$\rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k\vec{\nabla}T) \qquad (۱)$$

که $\rho$ چگالی (kg/m³)، $k$ رسانش حرارتی ماده (W/mK)، $T$ دما (K) و $H(T)$ تابع انتالپی ماده تغییر فاز دهنده است و داریم[۲۹]:

$$H(T) = \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT + \beta L_f \qquad (۲)$$

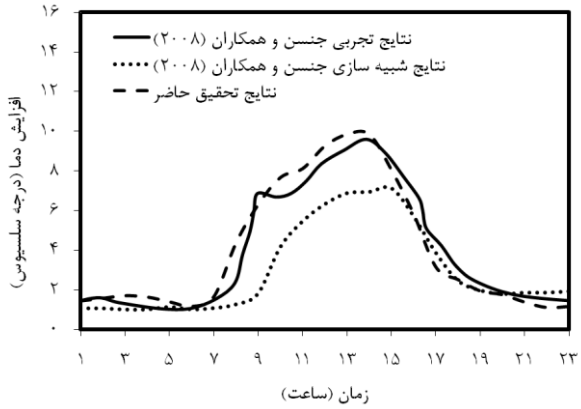
که $C_p$ گرمای ویژه ماده (J/kgK)، $L_f$ حرارت محسوس ماده (J/kg) و $\beta$ سهم جرمی ماده ذوب شده به کل ماده تغییر فاز دهنده است. همچنین، جزئیات مربوط به سایر معادلات مربوط به مدلسازی مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان، در مرجع [۳۰] آورده شده است.

3. DesignBuilder
4. EnergyPlus
5. Air Zonal Method

## ۴- اعتبارسنجی حل

به منظور بررسی اعتبار حل، از مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج جنسن و همکاران[۳۱] 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 ۳ مقایسه میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج جنسن و همکاران[۳۱] 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 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 تاثیر نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده بر عملکرد ساختمان‌های بلند مرتبه پرداخته خواهد شد.




**شکل۳** مقایسه نتایج مربوط به افزایش دمای هوای عبوری از نمای دو پوسته نسبت به هوای بیرون با نتایج تجربی و شبیه‌سازی جنسن و همکاران[۳۱]

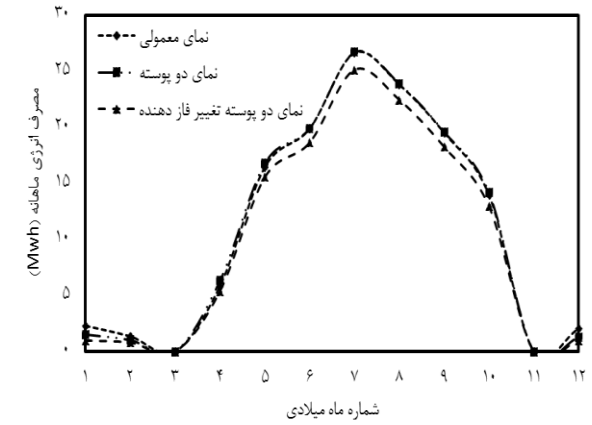
## ۵- نتایج

به منظور مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده با سایر نماهای مشابه، یک نمای معمولی و یک نمای دو پوسته فاقد مواد تغییر فاز دهنده نیز مدلسازی شده است. البته میزان مقاومت حرارتی کلی دیواره در همه این حالت‌ها برابر فرض شده است.

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب میزان مصرف انرژی مورد نیاز ساختمان برای سه نمای مختلف در اقلیم‌های تبریز و بندرعباس را نشان می‌دهند. در شکل ۴ 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 است. این در حالی است که نماهای دو پوسته تغییر فاز دهنده به دلیل ذخیره حرارت هوای محبوس در طول روز مانع از انتقال گرما به محیط ساختمان شده و باعث افزایش مصرف انرژی ساختمان نسبت به نمای دوپوسته شده است. به عبارت بهتر گرمای محبوس شده در نمای دوپوسته که در حالت معمولی از طریق همرفت وارد ساختمان می‌شود، در ماده تغییر فاز دهنده ذخیره شده و مانع گرم‌تر شدن فضای داخل می‌شود. همچنین به دلیل نیاز سرمایشی اندک ساختمان در اقلیم تبریز عملکرد منفی نمای دوپوسته تاثیر چندانی بر افزایش مصرف انرژی سرمایشی ساختمان نداشته اگرچه استفاده از شیشه های تغییر فاز دهنده این عملکرد نامطلوب را اصلاح می‌کنند.

بر خلاف اقلیم تبریز در اقلیم بندرعباس این رویه کاملا متفاوت می باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که استفاده از نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده در بندرعباس علاوه بر بهره‌گیری از عملکرد شبه گلخانه‌ای، به کمک عملکرد تغییر فازی خود در زمان گرما، انرژی را ذخیره کرده و در هنگام شب این انرژی را به محیط ساختمان داده و مانع از ورود بیش از حد سرما به ساختمان شود. همچنین برای اقلیم بندرعباس، استفاده از نماهای دو پوسته در ماه‌های گرم سال عملکرد مطلوبی نداشته و مصرف انرژی ساختمان را افزایش می‌دهد. دلیل عملکرد نامناسب نمای دو پوسته نسبت به حالت معمول در ماه‌های گرم به این موضوع برمی‌گردد که هوای موجود در بین نمای بیرونی و جداره‌ی 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 با شیشه‌های دارای مواد تغییر فاز دهنده تا حدودی بر طرف کرد. شیشه‌های دارای مواد تغییر فاز دهنده با ذخیره گرمای نهان در ساعات اوج گرما، مانع از بالا رفتن بیش از حد دما می‌شود و این گرما را در موقع شب به خارج از ساختمان پس می‌دهند. با کاهش دمای هوای بین دو پوسته، عملکرد نما اصلاح و گرما از بازشوهای تعبیه شده در بالای نما خارج می‌شود.

**شکل۴** مقایسه مصرف انرژی ماهانه به ازای سه نوع نمای مختلف در تبریز

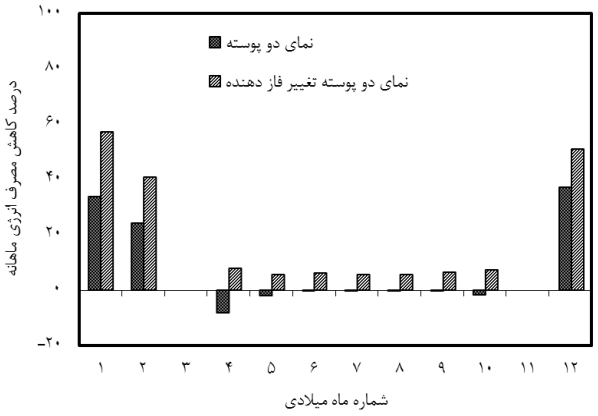



**شکل۵** مقایسه مصرف انرژی ماهانه به ازای سه نوع نمای مختلف در بندرعباس

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب درصد بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان به ازای ۱۲ ماه سال را برای تبریز و بندرعباس نشان می‌دهند. شکل ۶ نشان می‌دهد که در اقلیم تبریز استفاده از نمای دو پوسته معمولی در بهترین حالت توانسته در ماه اکتبر، حدود ۳۷ درصد مصرف انرژی را کاهش دهد. این در حالی است که استفاده از نماهای دو پوسته با شیشه‌های تغییر فاز دهنده، میزان کاهش مصرف انرژی در این ماه را به نزدیک ۱۴ درصد برساند که عملکرد نامطلوب نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده برای اقلیم‌های سرد را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۶ نشان می‌دهد که نماهای دو پوسته‌ی معمولی در بهترین حالت در ماه اگوست حدود ۹ درصد و در بدترین حالت در ماه جولای حدود ۲۰ درصد به میزان مصرف انرژی ساختمان اضافه کرده است. اما استفاده از نماهای دو پوسته با شیشه‌های تغییر فاز دهنده توانسته این عملکرد منفی را به عملکردی مطلوب تبدیل کرده و در بهترین حالت در ماه آگوست ۸ درصد میزان مصرف انرژی سرمایشی را کاهش دهد. عملکرد مناسب نماهای تغییر فاز دهنده در کلیه‌ی ماه‌های گرم ادامه داشته و به طور میانگین حدود ۶ درصد میزان مصرف انرژی را کاهش داده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که در اقلیم بندرعباس استفاده از نمای دو پوسته معمولی در بهترین حالت توانسته در ماه دسامبر، حدود ۳۷ درصد مصرف انرژی گرمایشی را کاهش دهد. این در حالی است که استفاده از نماهای دو پوسته با شیشه‌های تغییر فاز دهنده، توانسته میزان کاهش مصرف انرژی در این ماه را به نزدیک ۵۱ درصد برساند. همچنین، شکل ۷ نشان می‌دهد که نماهای دو پوسته‌ی معمولی در بهترین حالت در ماه اگوست حدود ۰,۵ درصد و در بدترین حالت در ماه آپریل بیش از ۸ درصد به میزان مصرف انرژی ساختمان اضافه کرده است. اما استفاده از نماهای دو پوسته با شیشه-های تغییر فاز دهنده توانسته این عملکرد منفی را به عملکردی مطلوب تبدیل کرده و در بهترین حالت در ماه آپریل ۸ درصد میزان مصرف انرژی سرمایشی را کاهش دهد. عملکرد مناسب نماهای تغییر فاز دهنده در کلیه‌ی ماه‌های گرم ادامه داشته و به طور میانگین حدود ۵,۵ درصد میزان مصرف انرژی را کاهش داده است.

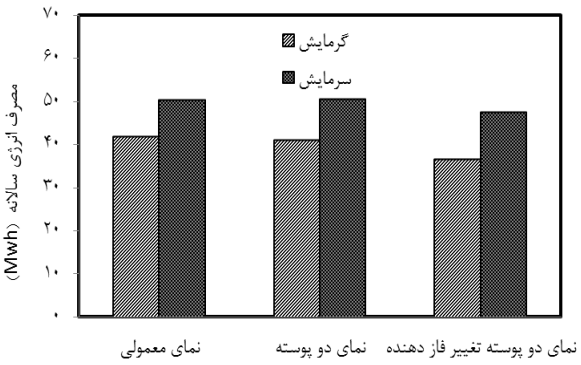
**شکل ۶** مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی ماهانه با استفاده از نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده در تبریز



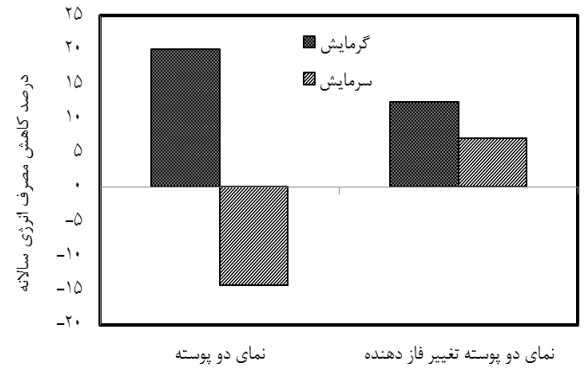

**شکل ۷** مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی ماهانه با استفاده از نمای دو پوسته تغییر فاز دهنده در بندرعباس

شکل‌های ۸ تا ۱۱ به ترتیب مصرف انرژی ساختمان و درصد کاهش مصرف انرژی در کل سال را برای اقلیم‌های تبریز و بندرعباس نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در اقلیم تبریز استفاده از نماهای دو پوسته معمولی در ماه‌های سرد در مجموع با مصرف ۱۶۹ مگاوات ساعت انرژی گرمایشی و کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی و در ماه‌های گرم با مصرف ۶/۱ مگاوات ساعت انرژی سرمایشی و افزایش ۱۴/۳ 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 با شیشه‌های تغییر فاز دهنده اگرچه می‌توان این عملکرد دوگانه را به عملکردی مطلوب در طول سال تبدیل کرد اما عملکرد گرمایشی نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده نسبت به نمای دوپوسته تضعیف شده و به ۱۲/۵ درصد کاهش می‌رسد. همچنین عملکرد نامطلوب نمای دوپوسته با استفاده از شیشه های تغییر فاز دهنده با کاهش ۷ درصدص به عملکردی مثبت تبدیل می‌شود. برای اقلیم بندرعباس استفاده از نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده مصرف انرژی ۴۱ مگاوات ساعتی را به ۳۶/۵ مگاوات ساعت رسانده و کاهش ۱۲ درصدی در مصرف انرژی گرمایشی را درپیش داشته است. همچنین استفاده از نوع نما مصرف انرژی سرمایشی ساختمان را از ۵۰ مگاوات ساعت به ۴۷ مگاوات ساعات کاهش داده است که معادل ۵/۷ درصد کاهش می‌باشد. این در حالی است که استفاده از نمای دوپوسته در اقلیم بندر عباس باعث افزایش ۰/۳ درصدی در مصرف انرژی گرمایشی شده است.

**شکل ۸** مقایسه میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان در تبریز




**شکل ۹** مقایسه میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان در بندرعباس




**شکل ۱۰** مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی سالانه با استفاده از نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده در تبریز

**شکل ۱۰** مقایسه درصد کاهش میزان مصرف انرژی سالانه با استفاده از نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده در بندرعباس

## ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، عملکرد نماهای دوپوسته دارای مواد تغییر فاز دهنده به لحاظ میزان مصرف انرژی ماهانه و سالانه در شرایط اقلیمی تبریز و بندرعباس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نماهای دو پوسته دارای مواد تغییر فاز دهنده در اقلیم بندرعباس از مزیت چشمگیری نسبت به نماهای معمولی و نیز نماهای دو پوسته متداول برخوردار است. به طوری که نماهای دو پوسته تغییر فاز دهنده 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 مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا حدود ۱۳٪ در ماه‌های سرد و تا حدود ۶٪ در ماه‌های گرم سال کاهش دهد و از این طریق موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی ساختمان گردد. همچنین نتایج نشان داد که برای اقلیم تبریز به دلیل سرمای شدید هوا و نیاز به جذب حداکثری گرمای خورشید، استفاده از نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده به دلیل ذخیره گرما عملکرد نامطلوبی نسبت به نمای دوپوسته داشته است. بر این اساس استفاده از نمای دوپوسته ۲۰٪ و نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده ۱۲/۵٪ مصرف انرژی گرمایشی ساختمان را کاهش می‌دهند. در ماه‌های گرم سال عملکرد نمای دوپوسته تغییر فاز دهنده بسیار مطلوب بوده و توانسته مصرف انرژی سرمایشی را ۷٪ کاهش دهد در حالی که نمای دوپوسته حدود ۱۴درصد مصرف انرژی ساختمان را افزایش می‌دهد.

## ۷- 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, pp. 43-53, 2013. (In Persian)

[4] G. Gan, Thermal transmittance of multiple glazing: computational fluid dynamics prediction, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 21, No. 15, pp. 1583-1592, 2001.

[5] J. L. M. Hensen, M. Bartak, D. Frantisek, Modeling and simulation of a double-skin facade system, *ASHRAE Transactions,* Vol. 108, No. 2, pp. 1251-1259, 2002.

[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 facade, *Energy and Buildings,* Vol. 36, No. 2, pp. 137-146, 2004.

[8] E. Gratia, A. De Herde, Optimal operation of a south double-skin facade, *Energy and Buildings,* Vol. 36, No. 1, pp. 41-60, 2004.

[9] H. Manz, Total solar energy transmittance of glass double façades with free convection, *Energy and Buildings,* Vol. 36, No. 2, pp. 127-136, 2004.

[10] T. E. Jiru, F. Haghighat, Modeling ventilated double skin façade—A zonal approach, *Energy and Buildings,* Vol. 40, No. 8, pp. 1567-1576, 2008.

[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, pp. 976-982, 2010.

[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, pp. 1823-1832, 2010.

[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, pp. 158-165, 2012.

[14] M. A. Sabooni, H. M. Vaseti, M. Maerefat, A. Azimi, Development of thecapability 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, No. 0, pp. 44-55, 2013.

[16] H. Weinläder, A. Beck, J. Fricke, PCM-facade-panel for daylighting and room heating, *Solar Energy,* Vol. 78, No. 2, pp. 177-186, 2005.

[17] A. de Gracia, L. Navarro, A. Castell, Á. Ruiz-Pardo, S. Álvarez, L. F. Cabeza, Solar Absorption in a Ventilated Facade with PCM. Experimental Results, *Energy Procedia,* Vol. 30, No. 0, pp. 986-994, 2012.

[18] F. Goia, M. Perino, V. Serra, Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems, *Energy and Buildings,* Vol. 60, No. 0, pp. 442-452, 2013.
[19] A. de Gracia, L. Navarro, A. Castell, Á. Ruiz-Pardo, S. Alvárez, L. F. Cabeza, Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period, *Energy and Buildings,* Vol. 58, No. 0, pp. 324-332, 2013.
[20] A. de Gracia, L. Navarro, A. Castell, L. F. Cabeza, Numerical study on the thermal performance of a ventilated facade with PCM, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 61, No. 2, pp. 372-380, 2013.
[21] A. de Gracia, L. Navarro, A. Castell, D. Boer, L. F. Cabeza, Life cycle assessment of a ventilated facade with PCM in its air chamber, *Solar Energy,* Vol. 104, No. 0, pp. 115-123, 2014.
[22] M. Solhi, A. Zolfaghari, M. Fathian, M. Saadati Nasab, H. Moslehi, M. Rahimpour, Effect of melting temperature of phase change materials using in building's outer shell on annual energy consumption, in *National Conference on Novel Building Installation (NCNBI)*, Kerman, Iran, 2013. (In Persian)
[23] M. Solhi, A. Zolfaghari, M. Fathian, H. Moslehi, M. Rahimpour, M. Saadati Nasab, Effect of using phase change materials in the building's outer shell on providing the occupants' thermal comfort without heating/cooling system, in *21th ISME Conference*, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)
[24] N. Soares, A. Samagaio, R.Vicente, J. Costa, Numerical simulation of a PCM shutter for buildings space heating during the winter, in *World RenewableEnergy Congress*, Linkoping, Sweden, 2011.
[25] Goia, F., Zinzi, M., Carnielo, E., Serra, V., Characterization of the optical properties of a PCM glazing system. Energy Procedia 30, 428– 437, 2012
[26] L. A. Diaz ,R. Viskanta, Experiments and analysis on the melting of a semitransparent material by radiation, Warme- und Stofftibertragung 20, 311-321, 1986
[27] EnergyPlus, *EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations*, 2007.
[28] M. Ozdenefe, J. Dewsbury, Dynamic thermal simulation of a PCM lined building with Energy Plus, in *Proceedings of 7th WSEAS International Conference on Energy and Environment*, 2012.
[29] P. C. Tabares-Velasco, C. Christensen, M. Bianchi, Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies, *Building and Environment,* Vol. 54, pp. 186-196, 2012.
[30] P. A. Mirzaei, F. Haghighat, Modeling of phase change materials for applications in whole building simulation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 16, pp. 5355-5362, 2012.
[31] 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.