افزایش عملکرد تهویه شبانه در ساختمان‌های اداری با استفاده از مواد تغییر فازدهنده نمونه موردی: شهر یزد*

ابراهیم سلگی- بهروز محمدکاری***- ریما فیاض****- بهشید حسینی*****- هلیا طاهری******

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰
تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۲/۶

چکیده

تهویه شبانه یک روش شناخته شده غیرفعال و پایدار برای کاهش بار سرمایشی در سیستم های تهویه مطبوع و تأمین آسایش حرارتی از طریق تخلیه گرمای ذخیره شده در طول روز، با دمیدن هوای خنک خارج در ساعات شب می‌باشد که با شرایط و ویژگی‌های جرم حرارتی به کار برده شده در جدارهای ساختمان رابطه مستقیم دارد. از آنجایی که استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در تهویه شبانه یک راهبرد قوی برای کاهش بار سرمایشی ساختمان به شمار می‌رود، در این مقاله به بررسی تأثیر مواد تغییر فاز دهنده، به عنوان جرم حرارتی با وزن سبک و در عین حال کارآمد در کاهش بار سرمایشی در سیستم‌های تهویه مطبوع یک مدل اداری با مصالح سبک واقع در شهر یزد پرداخته شده است. به منظور مشخص نمودن ساعت‌های نیاز به بار سرمایشی توسط سیستم‌های تهویه مطبوع، یک مدل ساده دارای سیستم تهویه مطبوع در طول روز و تهویه شبانه آزاد در طول شب به صورت جزء به جزء مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا عوامل اصلی تهویه شبانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شرایط بهینه برای شروع تهویه شبانه و نرخ مطلوب تعویض جریان هوا توسط فن‌ها مشخص شده است. سپس به انتخاب PCM با دمای ذوب مناسب و مقایسه PCM مطلوب با سایر مصالح رایج پرداخته شده است. همچنین میزان بار سرمایشی کاهش یافته توسط سیستم تهویه شبانه همراه با PCM نسبت به سایر حالات رایج موجود در این سیستم مقایسه شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می-دهند که در صورت استفاده از PCM مناسب همراه با تهویه شبانه مطلوب حدود ۴۷ درصد مصرف انرژی برای سرمایش ساختمان‌های اداری شهر یزد در مقایسه با مدل مرجع کاهش می یابد. این تحقیق حاصل مطالعات کتابخانه‌ای برگرفته شده از تحقیقات میدانی می‌باشد که با استفاده از راهبرد شبیه‌سازی رایانه‌ای و تحلیل‌های استدلال منطقی به نتایج مورد نظر رسیده است.

واژگان کلیدی: تهویه شبانه، مواد تغییر فازدهنده، ساختمان‌های اداری، یزد.

* این مقاله برگرفته از پایانامه کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان «بهینه سازی جرم حرارتی موجود در سیستم تهویه شبانه» می باشد که با راهنمایی دکتر بهشید حسینی، دکتر بهروز محمدکاری و با مشاوره دکتر ریما فیاض در رشته انرژی معماری در دانشگاه هنر تهران به پایان رسیده است.

** دانشجوی کارشناسی ارشد انرژی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
Email: solgi_e@yahoo.com
*** استادیار فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.
**** دانشیار معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.
***** دانشیار معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.
****** کارشناسی ارشد انرژی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مقدمه

امروزه به خاطر تغییرات آب و هوایی به وجود آمده استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع برای تأمین آسایش حرارتی درحال افزایش است. از این رو تکنیک‌های سرمایش غیرفعال[1] یک جایگزین بسیار مناسب برای سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها می‌باشند. در بین روش‌های سرمایش غیرفعال در ساختمان‌های اداری، تهویه شبانه با تأمین امکان تهویه با نرخ تعویض هوای بالا و عدم حضور ساکنین در شب، دارای توجیه فنی و کاربرد بالایی است (Pfafferott et al., 2004). در تکنیک تهویه شبانه، گرمای جذب شده در طول روز توسط جرم حرارتی ساختمان توسط تهویه‌ای که در شب اتفاق می‌افتد، تخلیه می‌شود. علاوه بر آن، هوای سرد باقی مانده در جرم حرارتی ذخیره شده و به‌عنوان کاهنده حرارتی در روز بعد عمل می‌نماید. این امر موجب کاهش دمای هوای داخلی ساختمان و بار سرمایشی سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود (Wang et al., 2009). توانایی جرم حرارتی در ذخیره‌سازی سرمایش شبانه تأثیر به‌سزایی در عملکرد تهویه شبانه دارد. بررسی‌ها نشان داده است که کاهش حداکثر دمای روزانه تابعی از سرعت تهویه هوا در شب میباشد. در یک محیط مسطح تأثیرپذیری نرخ تعویض هوا تا ۲۰ بار در ساعت مناسب است. در صورت عدم توانایی تهویه طبیعی در تأمین این مقدار، استفاده از تهویه مکانیکی پیشنهاد شده است (Shaviv et al., 2001). استفاده از جرم حرارتی در تهویه شبانه، علاوه بر کاهش مصرف انرژی (Roach et al., 2013) به‌وسیله پیش سرمایش جدارها (Morgan & Krarti, 2007) باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی (Givoni, 1994) در طول روز می‌شود. مطالعه این سیستم بر روی آب وهوای گوناگون نشان می‌دهد که تهویه شبانه در فصل‌ها و روزهایی مؤثر است که دمای روز بین ۳۰ تا ۳۶ درجه سانتیگراد و دمای شب زیر ۲۵ درجه سانتیگراد باشد (Givoni, 1998).

منظور از جرم حرارتی قابلیت ذخیره‌سازی گرما توسط لایه‌های جدارهای داخلی و خارجی و تجهیزات ساختمان در اوقات گرم روز و آزادسازی آن در مواقعی است که کاهش دمای هوا صورت می‌گیرد (Handbook, 2007). ترکیب تهویه شبانه و جرم حرارتی یکی از بهترین تکنیک‌ها برای تخلیه گرمای نامطلوب ذخیره شده در طول روز، در اوقات گرم سال و کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه مطبوع و افزایش آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک به شمار می‌آید (Santamouris, et al., 2010). نتایج بررسی تأثیر استفاده از تهویه شبانه طبیعی از طریق پنجره در یک ساختمان اداری پایلوت در کمبریج بر روی ساکنین نشان داد که مکان و مقدار جرم حرارتی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی اوج دمای روزانه دارد؛ به طوری که در سازه سنگین اوج دما ۳ تا ۴ درجه سانتیگراد نسبت به سازه سبک پایین‌تر است (Yun & Steemers, 2010). در بررسی سیستم تهویه شبانه در کتابخانه‌ای در ایرلند که به بررسی جرم حرارتی، مدت زمان تهویه، مقدار انرژی تولید شده روزانه در فضای داخلی و نرخ تعویض هوا در شب پرداخته شده بود، نتایج نشان داد که با افزایش جرم حرارتی از ۸۰۰ به ۱۶۰۰کیلوگرم بر متر مربع متوسط دمای روزانه در حدود ۲ تا ۳ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد (Finn et al., 2007).

استفاده از قابلیت ذخیره‌سازی متداول و سنتی گرما در جدارهای ساختمانی که بر پایه گرمای محسوس است، با توجه به نیاز بالا بودن جرم جدارها و قابل توجه بودن تغییرات دما، در معماری امروز که با رویکرد سبک سازی می‌باشد، جایگاهی ندارد. بهره‌گیری از گرمای نهان مواد تغییر فازدهنده (PCM)[2] گام مؤثری در جهت افزایش قابلیت ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. مواد تغییرفازدهنده (PCM) موادی هستند که در دمای خاصی ذوب و یا منجمد می‌شوند. این مواد دارای قابلیت ذخیره‌سازی مقدار زیادی انرژی به واسطه تغییر فاز می‌باشند، گرمایی که در این مواد به‌واسطه تغییر فاز(گرمای نهان) ذخیره می‌شود به مراتب بیشتر از گرمای ذخیره شده به واسطه تغییر دما (گرمای محسوس) می‌باشد. در طول ۴۰ سال گذشته مواد تغییرفازدهنده‌ای از جمله هیدرات‌های نمک، موم‌های پارافین، اسیدهای چرب، ترکیبات آلی و غیرآلی شناخته شده‌اند (Taheri, 2013). از این مواد به‌صورت موفقیت‌آمیزی برای کاهش بار سرمایشی ساختمان‌های دارای تهویه شبانه استفاده شده است (Álvarez et al., 2013). در ایران علی‌رغم مصرف بالای انرژی برای سرمایش ساختمان‌ها، تحقیقات بسیار کمی در زمینه استفاده از تهویه شبانه صورت گرفته است و از طرفی با افزایش محبوبیت ساخت ساختمان‌های با مصالح سبک استفاده از مواد تغییر فازدهنده در کنار تهویه شبانه می‌تواند مورد استقبال قرار گیرد. در این تحقیق شرایط مطلوب تهویه شبانه همراه با تأثیر مواد تغییر فازدهنده برای ایجاد حداکثر بهره‌وری تهویه شبانه در اقلیم گرم و خشک(شهر یزد) مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که سیستم تهویه شبانه به دلیل تهویه با نرخ تعویض هوای بالا نیازمند کاربری‌های با عدم حضور ساکنین در شب می‌باشد و از طرفی دارای حداکثر بهره‌وری در اقلیم‌های گرم و خشک با اختلاف دمای شبانه‌روزی زیاد می‌باشد، ساختمان‌های اداری شهر یزد برای انجام تحقیقات انتخاب شد.

هدف از این تحقیق، ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش بار سرمایشی ساختمان‌های اداری ساخته شده با مصالح سبک، با استفاده از مواد تغییر فازدهنده در تکنیک تهویه شبانه می‌باشد، به همین منظور ابتدا به تعیین عوامل اصلی تهویه شبانه که عبارتند از: انتخاب حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه، انتخاب ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب مناسب و تعیین نرخ تعویض هوا پرداخته شده است. سپس میزان کاهش بار سرمایشی و ساعت‌های بیش گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق حاصل مطالعات کتابخانه‌ای برگرفته شده از تحقیقات میدانی می‌باشد که با استفاده از راهبرد شبیه‌سازی رایانه‌ای و تحلیل‌های استدلال منطقی به نتایج مورد نظر رسیده است.

۱. مشخصات مدل و اعتبار سنجی

مدل شبیه‌سازی شده برگرفته از مدل تجربی ساخته شده توسط کارتیک موروگانانتام[۳] (Muruganantham et al., 2010) به‌منظور بررسی استفاده از مواد تغییر فازدهنده برای بهبود وضعیت انرژی ساختمان‌ها و کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها می‌باشد (شکل‌های ۱و۲).

مدل تجربی ساخته شده در شهر فونیکس[۴] در ایالت آریزونای[۵] آمریکا واقع شده است و دارای آب و هوای گرم و خشک می‌باشد. مدل مورد مطالعه اتاقی دارای ۴/۸۸ متر طول،۳/۶۶ متر عرض، ۲/۴۴ متر ارتفاع و سقف شیبدار با ۴/۱۲ شیب می‌باشد. در جدار شرقی مدل تجربی یک در چوبی به ابعاد ۰/۷۶۲ متر عرض و ۱/۹۸متر ارتفاع به همراه یک پنجره تک جداره به ابعاد ۰/۷۶ متر طول و ۰/۴۹متر عرض قرار گرفته است. همانند شکل ۲ در مدل تجربی از PCM با دمای ذوب ۲۹ درجه سانتیگراد در تمام دیوارها، سقف و کف استفاده شده است.

شکل ۱: مدل‌های تجربی ساخته شده همراه با PCM

شکل ۲: نصب PCM بر روی سقف مدل

(Muruganantham et al., 2010)

در جدول۱مصالح به کاربرده شده در هر یک از جدارها از خارج به داخل همراه با ضخامت آن‌ها نشان داده شده است.

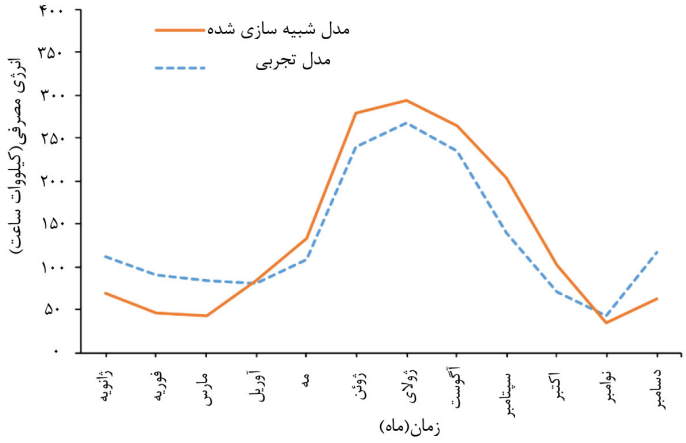
جدول ۱: مصالح به کار برده شده در مدل

نام ساختار	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	لایه چهارم
دیوار	پوشش خارجی ۱/۳سانتی متر	عایق پلی استایرن ۸ سانتی متر	PCM- ۱ سانتی متر	تخته گچی ۱ سانتی متر
کف	پوشش کف ۵ سانتی متر	PCM- ۱ سانتی متر	بتن ۵ سانتی متر	-
سقف	پوشش خارجی ۱/۳ سانتی متر	عایق پلی استایرن ۱۵ سانتی متر	PCM- ۱ سانتی متر	تخته گچی ۱ سانتی متر

(Muruganantham et al., 2010)

برای شبیه‌سازی مدل از نرم افزار انرژی‌پلاس[۶] استفاده شده است. برای اعمال تأثیر PCM ها، در این نرم‌افزار از الگوریتم CFD[۷] در معادلات انتقال حرارت در جدارها استفاده شده است. به منظور تعیین میزان خطای مدل شبیه‌سازی شده، به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل با نتایج حاصل از مدل ساخته و اندازه‌گیری شده با PCMتوسط موروگانانتام پرداخته شده است. در شکل ۳ مقایسه بین بارهای ماهانه ساختمان در مدل شبیه‌سازی شده و مدل تجربی نشان داده شده است. اختلاف بین مدل ساخته شده و شبیه‌سازی شده کمتر از ۲ درصد می‌باشد و ضریب همبستگی R بیشتر از ۰/۹۳ می باشد. این اعداد نشان دهنده قابل قبول بودن مدل شبیه‌سازی شده بوده و شبیه سازی صورت گرفته برای ادامه تحقیقات قابل اعتماد می‌باشد.

شکل ۳: مقایسه نتایج ماهانه مدل تجربی و مدل شبیه‌سازی شده



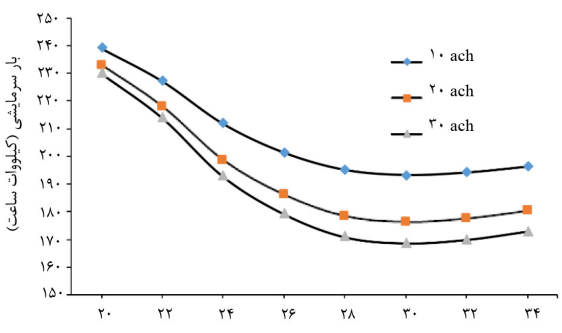
از دلایل انتخاب مدل مذکور برای شبیه‌سازی، تشابه قابل توجه شرایط آب و هوایی مدل تجربی با اقلیم شهر یزد می‌باشد و همچنین هر دو تحقیق به تأثیر PCM ها در کاهش بار سرمایش می‌پردازد. صرف نظر از PCM های موجود در جدارها جرم حرارتی مدل کم است و این امر تأثیر مستقیم PCMها را در ذخیره‌سازی حرارتی بیشتر نشان می‌دهد. این مدل در شهر یزد برای یک ساختمان اداری با ساعت کاری (۸:۰۰-۱۸:۰۰) در جهت شمالی- جنوبی شبیه‌سازی شده است. شهر یزد در کمربند خشک و نیمه خشک نیمکره شمالی قرار گرفته است و بیش از ۴ درصد مساحت کشور را شامل می شود. این شهر دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشد و به دلیل رطوبت کم هوا، نوسان درجه حرارت در طول شبانه و روز مخصوصاً در فصل تابستان در آن بسیار زیاد است (Keshtkaran, 2011). داده های آب و هوایی استفاده شده در این تحقیق برگرفته از ایستگاه سینوپتیک شهر یزد که دارای عرض جغرافیایی ۳۱/۵۳° و طول جغرافیایی ۵۴/۱۴° که در ارتفاع ۱۲۳۰ متری از سطح دریا واقع شده، می‌باشد.

ضخامت PCMها در جداره‌های شبیه سازی شده ضخامت بهینه ۱ سانتیمتر می‌باشد (Taheri, 2013) و طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران محدوده آسایش برای گرمایش و سرمایش بین ۲۱ تا ۲۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

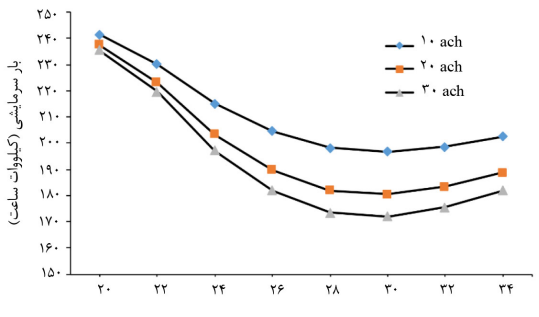
۲. انتخاب حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه

طبق تحقیقات انجام شده بهترین برنامه زمانی برای تهویه شبانه ساختمان‌های اداری شهر یزد از ۲۴ تا ۷ صبح مشخص شده است (Bozorgchami, 2012). این در حالی است که در پژوهش حاضر، به‌منظور جلوگیری از ورود هوا با دمای بالا در شب‌های گرم تابستان و در نتیجه ممانعت از تأثیر منفی آن بر روی تهویه شبانه، باید یک دمای مشخص به‌عنوان دمای ترموستات فن‌ها به سیستم وارد شود. به‌عبارت دیگر، تهویه شبانه زمانی اتفاق می‌افتد که دمای هوای بیرون از دمای تعیین شده کمتر باشد. به این ترتیب از ورود هوای گرم به داخل فضا و تأثیر منفی آن در آسایش حرارتی جلوگیری شود. بار سرمایشی کل سال در ساعت‌های اداری (۸:۰۰-۱۸:۰۰) در سه نرخ تعویض هوای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ حجم در ساعت (ach)[۸] بر روی دو PCM با دماهای ذوب ۲۷و ۲۹ درجه سانتیگراد آنالیز و محاسبه شد که نتایج آن‌ها در شکل ۴و۵ نشان داده شده است.

شکل ۴: تأثیر تغییر حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه بر روی بار سرمایشی سالانه مدل- PCM با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد



شکل ۵: تأثیر تغییر حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه بر روی بار سرمایشی سالانه مدل - PCM با دمای ذوب ۲۹ درجه سانتیگراد



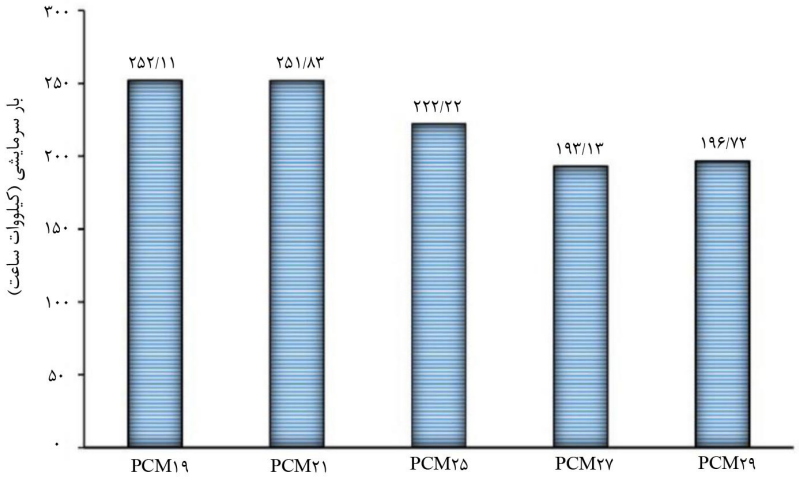
همانطور که در شکل‌های ۴و۵ مشاهده می‌شود، محور افقی نمودار نشان دهنده حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه می‌باشد و با افزایش حداکثر دمای هوای خارج تا ۳۰ درجه سانتیگراد بار سرمایشی در حال کاهش است. چنانچه دمای ترموستات فن‌ها از ۳۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود بار سرمایشی افزایش می‌یابد. به همین دلیل ۳۰ درجه سانتیگراد مناسب‌ترین دما برای دمای ترموستات فن‌ها یا به عبارت دیگر حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه می‌باشد.

برای مثال در حالتی که تمام دیوارها، کف و سقف دارای PCM با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد هستند و تهویه شبانه با حداکثر دمای ۳۰ درجه سانتیگراد برای ترموستات فن‌ها و نرخ تعویض هوای ۱۰ حجم در ساعت انجام می‌شود مجموع بار سرمایشی سالانه ۱۹۳/۱۳ کیلو وات ساعت می‌باشد. در حالیکه چنانچه تهویه شبانه با همین شرایط ولی در بازه زمانی ۲۴ تا ۷ صبح انجام شود، مجموع بار سرمایشی سالانه ۱۹۵/۸۷ کیلووات ساعت می‌باشد. در نتیجه مجموع مصرف انرژی سالانه برای سرمایش در روزهای گرم سال، در حالتی که مدل دارای یک فن ترموستات‌دار با حداکثر دمای۳۰ درجه سانتیگراد برای شروع تهویه باشد، در مقایسه با حالتی که تهویه شبانه در ساعات ۲۴ تا ۷ صبح انجام گرفته است، حدود ۱/۴درصد کاهش یافته است.

۳. انتخاب ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب مناسب در تهویه شبانه

به‌منظور انتخاب PCM با دمای ذوب مناسب برای ساختمان‌های اداری شهر یزد که دارای تهویه شبانه می‌باشند، با ثابت فرض کردن نرخ تهویه ۱۰ حجم در ساعت و حداکثر دمای خارج ۳۰ درجه سانتیگراد برای ترموستات فن‌ها به بررسی PCMهای به کار رفته در مدل شبیه‌سازی شده با دمای ذوب ۱۹ تا ۲۹ درجه سانتیگراد پرداخته شده است و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان دهنده تأثیر تغییر نقطه ذوبPCM موجود در سیستم تهویه شبانه بر روی بار سرمایشی مدل شبیه‌سازی شده می‌باشد.

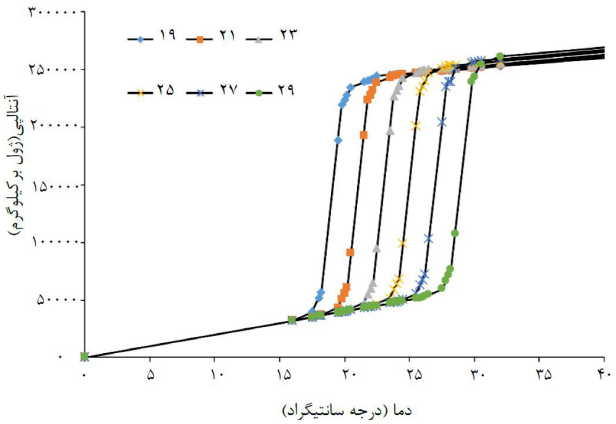
شکل ۶: تأثیر تغییر دمای ذوب PCM بر روی بار سرمایشی سالانه مدل



همانطور که در نمودارهای موجود در شکل ۶ نشان داده شده است با افزایش دمای ذوب PCM از ۱۹تا ۲۷ درجه سانتیگراد بار سرمایشی سالانه مدل شبیه‌سازی شده از حدود ۲۵۲ کیلووات ساعت به ۱۹۳ کیلووات ساعت در حال کاهش است. ولی با گذشتن از دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد بار سرمایشی سالانه افزایش می‌یابد. در نتیجه PCM با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد بهترین عملکرد را در تهویه شبانه ساختمان‌های اداری شهر یزد دارد.

مواد تغییر فازدهنده استفاده شده در این تحقیق از نوع آلی پارافینی می‌باشد که در این مواد، با افزایش طول زنجیره و تعداد کربن‌ها، نقطه‌ی ذوب و گرمای نهان نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این نیز مواد پارافینی، دارای گستره وسیعی از دمای ذوب (تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشند. از محاسن دیگر مواد پارافینی تغییر حجم کم در طول فرآیند تغییرفاز، تکرار پذیری تغییرفاز، جرم حجمی بالا، پایدار از لحاظ شیمیایی، غیر خورنده، غیر سمی، اشتعال ناپذیر و ارزان قیمت بودن می باشد (Taheri, 2013). اطلاعات مربوط به تغییرات آنتالپی بر حسب دما و محدوده تغییرفاز PCM با دماهای ذوب متفاوت استفاده شده در این شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این شکل شیب نمودار مواد با نقاط ذوب مختلف یکسان‌سازی شده است. به‌عبارت دیگر، گرماهای ویژه در حالت‌های مایع و جامد و همچنین گرمای نهان تغییر فاز مایع-جامد برای تمامی حالت‌های بررسی‌شده یکسان در نظر گرفته شده است (Solgi, 2014).

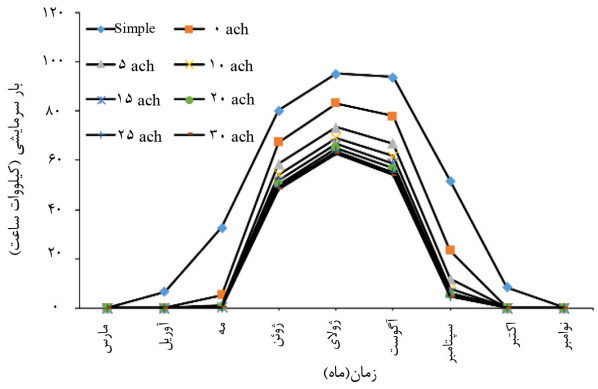
شکل ۷: تغییرات آنتالپی بر حسب دما برای PCM با دمای ذوب متفاوت



۴. تأثیر تغییر نرخ تعویض هوا در تهویه شبانه

برای بررسی تأثیر نرخ تعویض هوا نوع و ضخامت PCM ثابت فرض می‌شود. PCM با دمای ذوب ۲۷درجه سانتیگراد با ضخامت یک سانتی متر و حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه ۳۰ درجه سانتیگراد به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است. دمای آسایش داخل ساختمان اداری در فصل تابستان برای اقلیم یزد طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران ۲۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. چنان‌چه دمای هوای داخل مدل در ساعات اداری از ۲۸ درجه سانتیگراد فراتر رود سیستم‌های تهویه مطبوع روشن خواهند شد. با توجه به شرایط ذکر شده تغییر نرخ تعویض هوا از ۰ تا ۳۰ حجم در ساعت در بازه‌های ۵ تایی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا نتایج به دست آمده بدون در نظر گرفتن انرژی مصرفی توسط فن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸: تاثیر تغییر نرخ تعویض هوا بر روی بار سرمایشی ماهانه مدل بدون در نظر گرفتن انرژی مصرفی توسط فن‌ها



همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در صورت لحاظ نکردن تأثیر فن‌ها هر چه نرخ تعویض هوا افزایش یابد انرژی مصرفی برای سرمایش مدل در طول ساعات اداری کاهش می‌یابد. دلیل این امر سردتر شدن جرم حرارتی موجود در مدل بر اثر افزایش نرخ تعویض هوا در شب می‌باشد. از آنجایی که تأثیر افزایش نرخ تعویض هوا بر روی انرژی مصرفی توسط فن-ها در نظر گرفته نشده است؛ هر چه نرخ تهویه هوا افزایش یابد، بار سرمایشی کاهش خواهد یافت. کاهش بار سرمایشی در ابتدا که تهویه شبانه وجود ندارد (صفر حجم در ساعت) و یا تهویه شبانه با نرخ ۵ حجم در ساعت صورت می‌گیرد زیاد می‌باشد، اما در ادامه کاهش بار سرمایشی در اثر افزایش نرخ تعویض هوا روند نزولی پیدا می‌کند.
در جدول ۲ بار سرمایشی سالانه مدل با در نظر گرفتن مصرف انرژی توسط فن‌ها نشان داده شده است. هر چقدر نرخ تعویض هوا افزایش می‌یابد مصرف انرژی توسط فن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در مجموع افزایش نرخ تهویه هوا از ۱۵ حجم در ساعت به بالا تأثیری چندانی در کاهش مصرف انرژی ندارد و باعث ایجاد تلاطم در ساختمان‌های اداری نیز می‌شود. افزایش نرخ تهویه هوا بیشتر از ۲۵ حجم در ساعت، به خاطر افزایش زیاد مصرف انرژی فن‌ها نسبت به کاهش صورت گرفته در بار سرمایشی، تأثیر منفی در کل مصرف انرژی خواهد گذاشت. در نتیجه استفاده از تکنیک تهویه شبانه با نرخ ۱۵ حجم در ساعت مطلوب است و باعث کاهش ۴۶/۵ درصدی مصرف انرژی برای سرمایش در کل سال می‌شود.

در جدول ۲ نتایج به دست آمده با حالتی مقایسه شده‌اند که از تهویه شبانه و مواد تغییر فازدهنده استفاده نشده است (Simple) و دارای مجموع بار سرمایشی ۳۶۵/۲۴ کیلووات ساعت در سال می‌باشد.

جدول ۲: تأثیر تغییر نرخ تعویض هوا بر روی بار سرمایشی ماهانه مدل با در نظر گرفتن انرژی مصرفی توسط فن‌ها

نرخ جریان هوا (حجم در ساعت)	بار سرمایشی (kwh)	انرژی الکتریکی فن‌ها (kwh)	کاهش بارسرمایشی
Simple	۳۶۵/۲۴	-	-
۰	۲۵۷/۲۶	-	%۲۹/۶
۵	۲۱۶/۰۹	۴/۳۶	%۴۰/۸
۱۰	۲۰۱/۶۲	۸/۴۹	%۴۴/۸
۱۵	۱۹۵/۴۴	۱۲/۵۴	%۴۶/۵
۲۰	۱۹۲/۹۴	۱۶/۵۵	%۴۷/۲
۲۵	۱۹۲/۴۷	۲۰/۵۳	%۴۷/۳
۳۰	۱۹۳/۱۸	۲۴/۵	%۴۷/۱

۵. کاهش ساعت‌های بیش گرمایش توسط تهویه شبانه

شاخص دیگری که در تکنیک تهویه شبانه مورد بررسی قرار می‌گیرد کاهش تعداد ساعت‌های بیش گرمایش[۹] در روزهای گرم سال می‌باشد. برای محاسبه میزان ساعت‌های بیش گرمایش سه دمای پایه داخلی ۲۴ ، ۲۶و ۲۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از این دماها تهویه شبانه با نرخ تعویض هوای ۰ تا ۳۰ حجم در ساعت در بازه ۵تایی صورت گرفته و نتایج در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. این کاهش ساعت‌های بیش گرمایش در محدوده ساعت اداری و در صورت خاموش بودن سیستم تهویه مطبوع می‌باشد. نتایج به دست آمده با حالتی مقایسه شده‌اند که تهویه شبانه وجود ندارد و تعویض هوا برابر صفر است.

جدول ۳: تأثیر تهویه شبانه بر روی کاهش تعداد ساعات بیش گرمایش در دمای پایه ۲۴ درجه سانتیگراد

نرخ جریان هوا (حجم در ساعت)	تعداد ساعت‌های بیش گرمایش	کاهش ساعت‌های بیش گرمایش
۰	۱۵۷۴	-
۱۰	۱۴۴۷	%۸/۱
۱۵	۱۴۳۰	%۹/۱
۲۰	۱۴۲۱	%۹/۷
۲۵	۱۴۱۲	%۱۰/۳
۳۰	۱۴۰۶	%۱۰/۷

جدول ۴: تأثیر تهویه شبانه بر روی کاهش تعداد ساعات بیش گرمایش در دمای پایه ۲۶ درجه سانتیگراد

نرخ جریان هوا (حجم در ساعت)	تعداد ساعت‌های بیش گرمایش	کاهش ساعت‌های بیش گرمایش
۰	۱۳۸۷	-
۱۰	۱۲۴۰	%۱۰/۶
۱۵	۱۲۲۴	%۱۱/۸
۲۰	۱۲۱۲	%۱۲/۶
۲۵	۱۲۰۲	%۱۳/۳
۳۰	۱۱۹۱	%۱۴/۱

جدول ۵: تأثیر تهویه شبانه بر روی کاهش تعداد ساعات بیش گرمایش در دمای پایه ۲۸ درجه سانتیگراد

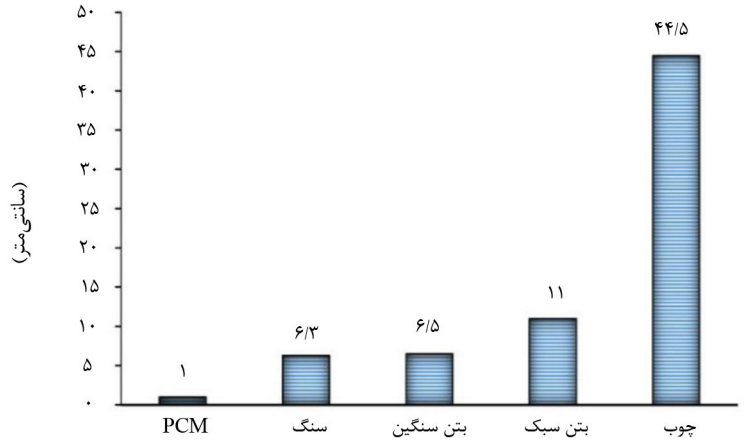
نرخ جریان هوا (حجم در ساعت)	تعداد ساعت‌های بیش گرمایش	کاهش ساعت‌های بیش گرمایش
۰	۹۹۹	-
۱۰	۸۴۴	%۱۵/۵
۱۵	۸۱۵	%۱۸/۴
۲۰	۸۰۲	%۱۹/۷
۲۵	۷۹۴	%۲۰/۵
۳۰	۷۸۸	%۲۱/۱

همانطور که نشان داده شده است میزان کاهش ساعت‌های بیش گرمایش برای دمای پایه ۲۴ درجه سانتیگراد در نرخ تهویه ۵ تا ۳۰ حجم در ساعت بین ۸/۱ تا ۱۰/۷درصد می‌باشد و برای دمای پایه ۲۶ درجه سانتیگراد بین ۱۰/۶ تا ۰/۱ درصد و برای دمای پایه ۲۸ درجه سانتیگراد بین ۱۵/۵ تا ۲۱/۱ درصد می‌باشد. زمانی‌که تهویه شبانه با نرخ ۱۵حجم در ساعت صورت می‌گیرد، تعداد ساعت‌هایی که در زمان اداری دمای هوا بیشتر از ۲۸، ۲۶ و۲۴ درجه سانتیگراد می‌باشد به ترتیب ۱۸/۴ ،۱۱/۸ و۹/۱ درصد نسبت به زمانی‌که تهویه شبانه وجود ندارد، کاهش می‌یابد.

۶. مقایسه مواد تغییر فازدهنده با مصالح رایج

همانطور که در نمودارهای موجود در شکل ۹ نشان داده شده است، ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد و ضخامت یک سانتی متر در تهویه شبانه با شرایط مطلوب تعیین شده در مراحل قبلی (نرخ تهویه ۱۵ حجم در ساعت و حداکثر دمای هوای خارج برای شروع تهویه شبانه ۳۰ درجه سانتیگراد) معادل ضخامت حدود ۶ سانتی متر سنگ، ۷ سانتی متر بتن سنگین، ۱۱ سانتی متر بتن سبک و ۴۵ سانتی متر چوب می‌باشد. مشخصات فیزیکی مواد نام برده در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ذکر شده استفاده از مواد تغییر فازدهنده نسبت به سایر مصالح رایج ذکر شده باعث کاهش چشم‌گیر وزن ساختمان و فضای اشغال شده توسط جرم حرارتی می‌شود. این ویژگی می‌تواند در ساختمان‌های امروزی که با رویکرد سبک سازی می‌باشد، مورد توجه قرار گیرد.

شکل ۹: مقایسه PCM با سایر مصالح از نظر ضخامت



جدول ۶: مشخصات فیزیکی مصالح

نام	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	چگالی (kg/m3)	گرمای ویژه (j/kg.K)
PCM	۰/۲	۸۶۰	۱۶۲۰
سنگ	۳/۱۷	۲۵۶۰	۷۹۰
بتن سنگین	۱/۹۵	۲۲۴۰	۹۰۰
بتن سبک	۰/۵۳	۱۲۸۰	۸۴۰
چوب	۰/۱۵	۶۰۸	۱۶۳۰

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی عوامل اصلی تهویه شبانه و تأثیر مواد تغییر فازدهنده به عنوان جرم حرارتی مؤثر در یک مدل اداری ساده توسط نرم افزار انرژی‌پلاس پرداخته شده است. به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از PCM ها تأثیر زیادی در افزایش عملکرد سیستم تهویه شبانه و کاهش بار سرمایشی ساختمان‌های اداری اقلیم گرم و خشک یزد را دارد. در این تحقیق ابتدا به بررسی دمای ترموستات فن پرداخته شد. طبق آنالیزهای انجام شده دمای ۳۰ درجه سانتیگراد به عنوان حداکثر دمای هوای خارجی و دمای ترموستات فن به‌منظور جلوگیری از ورود هوای گرم در شب‌های تابستان در نظر گرفته شد. در این وضعیت با جلوگیری از ورود هوا با دمای بالا، کارایی سیستم افزایش پیدا می‌کند. در بررسی انتخاب جرم حرارتی سازگار با سیستم تهویه شبانه، در بین مواد تغییر فازدهنده با دماهای ذوب متفاوت، ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد بیشترین قابلیت را در ذخیره‌سازی سرمای شبانه نسبت به سایر دماهای ذوب دارد و به عنوان ماده‌ای که بهترین عملکرد را به عنوان جرم حرارتی مطلوب در تهویه شبانه شهر یزد دارد انتخاب شد. به‌منظور بررسی میزان انرژی مصرفی فن‌ها که امر مهمی در تهویه شبانه محسوب می‌شوند به محاسبه میزان انرژی مصرفی فن‌ها در نرخ‌های مختلف تهویه شبانه پرداخته شد. افزایش نرخ تهویه هوا از ۱۵ حجم در ساعت به بالاتر به خاطر افزایش انرژی مصرفی توسط فن‌ها تأثیری چندانی در کاهش مصرف انرژی ندارد و باعث ایجاد تلاطم در ساختمان‌های اداری می‌شود. در نتیجه نرخ تعویض هوای ۱۵ حجم در ساعت در تهویه شبانه مطلوب می‌باشد. استفاده از تکنیک تهویه شبانه با عوامل اصلی تعیین شده یعنی نرخ تعویض هوای ۱۵ حجم در ساعت همراه PCM با دمای ذوب ۲۷ درجه سانتیگراد باعث کاهش حدود ۴۷ درصد مصرف انرژی برای سرمایش توسط سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود. علاوه بر بار کاهش بار سرمایشی این تکنیک تاثیر بسزایی در کاهش ساعات بیش گرمایش دارد به نحوی که در شرایط مطلوب تهویه شبانه تعداد ساعت‌هایی که در زمان اداری دمای هوای داخلی بیشتر از ۲۸، ۲۶ و۲۴ درجه سانتیگراد می‌باشد به ترتیب ۱۸/۴ ، ۱۱/۸ و ۹/۱ درصد نسبت به زمانی‌که تهویه وجود ندارد کاهش می‌یابد. در آخر استفاده از مواد تغییر فازدهنده نسبت به سایر مصالح رایج در ساختمان‌ها باعث کاهش چشمگیر وزن ساختمان و فضای اشغال شده توسط جرم حرارتی می‌شود.

پی نوشت

1. Passive Cooling
2. Phase Change Material
3. Karthik Muruganantham
4. Phonix
5. Arizona
6. Energy Plus
7. Conduction Finite Difference
8. Air Changes per Hour
9. Over Heating

References

- Alvarez, S., Cabeza, L. F., Ruiz-Pardo, A., Castell, A., & Tenorio, J. A. (2013). Building Integration of PCM for Natural Cooling of Buildings. *Applied Energy*, 109, 514-522.
- Bozorgchami, F. (2012). *Passive Cooling of Buildings by Night-time Ventilation* (Master Thesis), Tehran University.
- Finn, D. P., Connolly, D., & Kenny, P. (2007). Sensitivity Analysis of a Maritime Located Night Ventilated Library Building. *Solar Energy*, 81(6), 697-710.
- GivoniJ, B. (1994). *Passive Low Energy Cooling of Buildings*: John Wiley & Sons.
- Givoni, B. (1998). Effectiveness of Mass and Night Ventilation in Lowering the Indoor Daytime Temperatures. Part I: 1993 Experimental Periods. *Energy and Buildings*, 28(1), 25-32.
- Handbook, A. (2007). HVAC Applications (2007). *American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta*, GA.
- Keshtkaran, P. (2011). Harmonization between Climate and Architecture in Vernacular Heritage: A Case Study in Yazd, Iran. *Procedia Engineering,* 21, 428-438.
- Morgan, S., & Krarti, M. (2007). Impact of Electricity Rate Structures on Energy Cost Savings of Pre-cooling Controls for Office Buildings. *Building and Environmen*t, 42(8), 2810-2818.
- Muruganantham, K., Phelan, P., Horwath, P., Ludlam, D., & McDonald, T. (2010). Experimental Investigation of a Bio-based Phase Change Material to Improve Building Energy Performance. *Paper Presented at the ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability.*
- Pfafferott, J., Herkel, S., & Wambsganß, M. (2004). Design, Monitoring and Evaluation of a Low Energy Office Building with Passive Cooling by Night Ventilation. *Energy and Buildings*, 36(5), 455-465.
- Roach, P., Bruno, F., & Belusko, M. (2013). Modelling the Cooling Energy of Night Ventilation and Economiser Strategies on Façade Selection of Commercial Buildings. *Energy and Buildings*, 66, 562-570.
- Santamouris, M., Sfakianaki, A., & Pavlou, K. (2010). On the Efficiency of Night Ventilation Techniques Applied to Residential Buildings. Energy and Buildings, 42(8), 1309-1313.
- Shaviv, E., Yezioro, A., & Capeluto, I. G. (2001). Thermal Mass and Night Ventilation as Passive Cooling Design Strategy. *Renewable Energy*, 24(3), 445-452.
- Solgi, E. (2014). *Optimizing Thermal Mass in Night Ventilation*. (Master Thesis), Art University.
- Taheri, H. (2013). *Designing Transparent Glazing Capable of Energy Storage* (Master Thesis), Tehran University.
- Wang, Z., Yi, L., & Gao, F. (2009). Night Ventilation Control Strategies in Office Buildings. *Solar Energ*y, 83(10), 1902-1913.
- Yun, G. Y., & Steemers, K. (2010). Night-time Naturally Ventilated Offices: Statistical Simulations of Window-use Patterns from Field Monitoring. *Solar Energy*, 84(7), 1216-1231.