

امکان‌سنجی فنی و اقتصادی بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ترکیب سیستم‌های سرمایش تراکمی و سرمایش آزاد، مطالعه موردی: یک ساختمان مسکونی در شهر کرمان

سیدمحمدحجت محمدی*

استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

چکیده

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یک فناوری با پتانسیل بالا برای کاربردهای حرارتی متفاوت است که می‌تواند راه مناسبی برای اصلاح شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی باشد. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. هدف از این پژوهش تحلیل انرژی و انرژی ترکیب دو سیستم سرمایش آزاد و سرمایش تراکمی است که در آن‌ها از مواد تغییر فاز دهنده به منظور صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم، استفاده شده است. ماده تغییر فاز دهنده دما متوسط بکار رفته در سیستم سرمایش آزاد در طول شب با هوای محیط شارژ می‌شود و در طول روز و در طی فرآیند تخلیه، با خنک کردن هوای ورودی به کندانسور سیستم تراکمی، سبب کاهش مصرف انرژی در سیستم خنک کننده ساختمان می‌شود. از سوی دیگر، تخلیه انرژی حرارتی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده در طول ساعات اوج مصرف صورت می‌گیرد. در این ساعات هزینه انرژی بالاتر است؛ بنابراین با استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌توان در هزینه‌های انرژی الکتریکی یک ساختمان نیز صرفه‌جویی کرد. بررسی فنی و اقتصادی این سیستم ترکیبی، نشان می‌دهد که ۴/۸۵٪ کاهش مصرف انرژی الکتریکی، ۱۴/۷۶٪ کاهش در ساعات اوج مصرف و ۶/۷۱٪ کاهش در قبض برق قابل انتظار است.

کلمات کلیدی: سیستم سرمایش تراکمی؛ سیستم سرمایش آزاد؛ مواد تغییر فاز دهنده؛ تحلیل انرژی و انرژی؛ مطالعه اقتصادی.

Technical and Economic Feasibility Study of the Use of Phase Change Materials (PCMs) in the Combination of Compression Refrigeration and Free Cooling Systems, Case Study: A Residential Building in Kerman

S.M.H. Mohammadi*

Assis. Prof., Energy Dep., Inst. Of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate Univ. of Advanced Technology, Kerman, Iran.

Abstract

Thermal Energy Storage (TES) is a high potential technology for different thermal energy applications. TES technology can be an appropriate approach to fill in the gap between electrical energy supply and demand. One efficient and modern method to store thermal energy is the use of phase-change materials (PCMs). The aim of this research is to study the feasibility of the use of PCM materials in the combination of free cooling and compression refrigeration systems. The combined system should be analyzed from energy and exergy viewpoints, in order to evaluate the amount of saved energy and the system performance upgrade. The medium temperature PCM coupled with the free cooling system, can be charged during the cool night time. During the hot day time, discharging this PCM would lower the temperature of the air entering the condenser and consequently; lower the HVAC system energy consumption. On the other hand, PCM discharge happens during the peak-hours in which the electrical energy price is high. Therefore, using PCM would reduce the building energy bills. Technical and economic results show that the proposed combined system would reduce the total electrical energy consumption up to 4.85%, energy consumption in peak-hours up to 14.76% and the electrical energy bill up to 6.71%.

Keywords: Compression Refrigeration System; Free Cooling System; Phase Change Material; Energy And Exergy Analysis; Economic Analysis.

۱- مقدمه

سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع قسمت عمده‌ای از توان تولیدی نیروگاه‌ها را به خصوص در ساعات اوج مصرف، به خود اختصاص می‌دهند. به گفته احمدرضا توکلی، مجری طرح‌های بهینه‌سازی ساتبا^۱، در سال ۱۳۹۵ حدود ۳۰ درصد از انرژی مصرف شده در ساختمان‌ها، برای سرمایش و تهویه مطبوع به‌کار رفته است [۱]. اندیشمندان حوزه انرژی، همواره در تلاش برای ارائه راهکارهایی هستند که بتواند میزان مصرف انرژی در سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع را کاهش دهد. عمده این راهکارها بر دو اساس استوار است؛ بهبود عملکرد سیستم سرمایش [۲] و یا انتقال مصرف انرژی از ساعات پیک مصرف به ساعات غیر پیک. یکی از روش‌هایی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سرمایش آزاد و ذخیره بار سرمایشی در مواد تغییر فاز دهنده (PCM) است. یکی از مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از خنکای هوای شب و ذخیره‌سازی آن توسط زالبا و همکاران [۳] انجام شده است. در این تحقیق به بررسی تجربی و آماری پدیده‌های موثر در یک سیستم سرمایش آزاد پرداخته شده است. بدین منظور، سرمای شب‌هنگام محیط در مواد تغییر فاز دهنده ذخیره و در طول روز برای تهویه مطبوع استفاده شده است. نتایج نشان داده است که ضخامت ماده تغییر فاز دهنده اثر قابل توجهی بر فرآیند انجماد دارد؛ اما در فرآیند ذوب، دمای هوا نسبت به ضخامت ماده تغییر فاز دهنده تاثیر بیشتری می‌گذارد. کمالی [۴] به بررسی مروری مطالعات انجام شده در زمینه بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های جابجایی آزاد پرداخته است. در این پژوهش به مطالعه اثر نوع ماده تغییر فاز دهنده، عوامل موثر بر فرآیند شارژ و تخلیه، امکان‌سنجی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده و نیز تحلیل اقتصادی استفاده از سیستم‌های سرمایش آزاد، پرداخته شده است. وی بیان داشته است که هزینه اولیه یک سیستم سرمایش آزاد فقط در حدود ۱۰٪ بیشتر از سیستم‌های تهویه مطبوع متداول است، اما به این تکنولوژی هنوز به عنوان یک تکنولوژی تجاری نگاه نمی‌شود. مصفا و همکارانش [۵] تحلیل انرژی و انرژی‌سنجی یک سیستم

خنک‌کننده آزاد را انجام داده‌اند که از یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گرمای نهان با مواد تغییر فاز دهنده متعدد استفاده می‌نمود. نتایج نشان داد که افزایش راندمان انرژی به علت کاهش دمای هوای ورودی بسیار چشمگیرتر از اثر افزایش دبی جریان هوا در طول دوره شارژ است. یک تحقیق دقیق و جامع در ارتباط با چالش‌های پیش روی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های سرمایش آزاد توسط وقاص و ضیاءالدین [۶] صورت گرفته است. از دیدگاه ایشان این چالش‌ها عبارتند از: نوع ماده تغییر فاز دهنده، خواص ترموفیزیکی این مواد و هندسه کپسول‌های محتوی ماده تغییر فاز دهنده. ایشان همچنین به پتانسیل‌سنجی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به دلیل بکارگیری مواد تغییر دهنده نیز پرداخته‌اند. تامبی‌دورای و همکاران [۷] در یک مطالعه مروری به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سرمایش آزاد ساختمان‌ها پرداخته‌اند. ایشان همچنین در مورد پتانسیل کاربرد تکنولوژی سرمایش آزاد در آینده، دامنه پیشرفت‌ها در این حوزه و نیز سیاست‌گذاری‌هایی اظهار نظر کرده‌اند که باید توسط دولت‌ها در این خصوص صورت گیرد. سوآیفین و همکاران [۸] یک مطالعه مروری در مورد کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های سرمایش ساختمان‌ها انجام داده‌اند. ایشان دمای بالای هوا در تابستان را به عنوان موثرترین عامل در ضعیف شدن عملکرد مواد تغییر فاز دهنده عنوان داشته‌اند. حسینی راهدار و همکاران [۹] به مقایسه کارایی یخ به عنوان سیستم ذخیره سرمایش و منبع PCM پرداخته‌اند. تحلیل انرژی و انرژی‌سنجی انجام شده نشان داده است که استفاده از یخ و PCM به ترتیب، ۴/۶٪ و ۷/۶٪ کاهش مصرف انرژی را به دنبال دارد. دی‌فالکو و همکاران [۱۰] با آزمایش یک سیستم نمونه که در آن یک سیستم سرمایش فن‌کوئل را به یک تانک ذخیره PCM مجهز نموده‌اند، مدل فیزیکی ارائه شده را به صورت عملی مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان نتیجه گرفته‌اند که سیستم پیشنهادی توانایی کارکرد در توان‌های شارژ/تخلیه‌ی بالا را دارا است و به منظور کاهش پیک مصرف بسیار مناسب است. به طور کل، به سه شکل می‌توان از مواد تغییر فاز دهنده در بهبود آسایش دمایی محیط داخل ساختمان بهره برد. این سه روش عبارتند از روش فعال، غیرفعال و سرمایش آزاد، عالم و

^۱ ساتبا: سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی ایران

^۲ Phase Change Material

راندمان انرژی و انرژی و انرژی سیستم نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر با یک تحلیل اقتصادی دقیق، می‌توان میزان کاهش هزینه‌های یک ساختمان نمونه را مشخص کرد؛ همچنین در این مطالعه، به بررسی ساعتی مصرف در ماه‌های گرم سال و اثر بکارگیری PCM بر مصرف ساعتی انرژی الکتریکی و ارزیابی اقتصادی این فرآیند، پرداخته می‌شود.

۲- توصیف مسئله

از آنجایی که هدف در این پژوهش، بررسی میزان کاهش مصرف انرژی و کاهش مصرف در ساعات پیک، افزایش راندمان انرژی و انرژی سیستم و در نهایت تعیین میزان صرفه‌جویی در هزینه‌های مرتبط با قبض برق ساختمان است، باید ابتدا سیستم مبنا معرفی شود که در آن از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نشده است. سپس، پیکربندی سیستمی معرفی گردد که در آن از PCM به منظور ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده شده است.

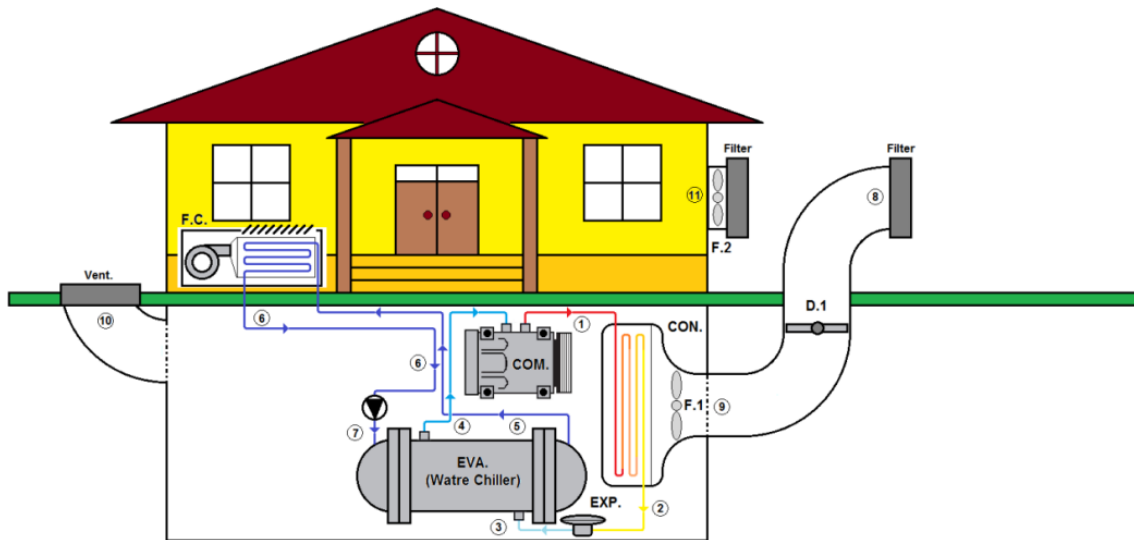
۲-۱- سیستم مبنا

شکل ۱ نمودار توصیفی یک سیستم تهویه مطبوع تراکمی را نشان می‌دهد که در این پژوهش، سیستم مبنا^۱ نامیده می‌شود؛ همچنین شکل ۲ نمودار دما - انترپوی را برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱ با مبرد R134a، نمایش می‌دهد. در این سیستم آبی که وظیفه جذب حرارت از ساختمان و انتقال آن به مبرد سیستم سرمایش تراکمی را دارد، با دمای 17°C به اواپراتور سیستم سرمایش وارد و پس از رسیدن به دمای هدف (13°C) از آن خارج می‌شود (فرآیند ۷ تا ۵). این آب وارد فن‌کوئل‌های ساختمان می‌شود و پس از تامین بار سرمایشی ساختمان به اواپراتور برمی‌گردد. از سوی دیگر مبرد که در کمپرسور دما و فشار آن افزایش یافته است و به حالت مافوق گرم رسیده است (نقطه ۱)، به سمت کندانسور رانده می‌شود. در کندانسور با تبادل حرارت با هوای محیط در یک فرآیند تقریباً فشار ثابت، به مایع متراکم تبدیل می‌شود (نقطه ۲). سپس با عبور از شیر انبساط، فشار و دمای آن کاهش می‌یابد (نقطه ۳). این کاهش

همکاران [۱۱] در یک مطالعه عملی، به مقایسه روش غیرفعال و سرمایش آزاد پرداخته‌اند. این مطالعه در شهر ملبورن استرالیا انجام شده است. از نتایج این تحقیق برمی‌آید که عملکرد سیستم سرمایش آزاد موثرتر بوده است و سبب شده است $2/63$ درجه سانتی‌گراد کاهش در پیک دمای ساختمان مشاهده شود. این در حالی است که با استفاده از روش غیر فعال، کاهش نقطه پیک فقط در حد $0/44$ درجه سانتی‌گراد بوده است. بخشی‌پور و همکاران [۱۲] نیز اثر بکارگیری یک مبدل حرارتی PCM را در مسیر عبور مبرد و بعد از خروج از کندانسور مورد بررسی قرار داده‌اند. در این شبیه‌سازی نتیجه‌گیری شده است که با استفاده از PCM می‌توان ضریب عملکرد سیستم سرمایش را تا $9/58\%$ افزایش داد. صید و حسن [۱۳] نیز در یک مطالعه پارامتری، به بررسی اثر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع با سیکل سرمایش تراکمی پرداخته‌اند. در این تحقیق، حداکثر 14% افزایش در ضریب عملکرد سیستم گزارش شده است.

در شرایط آب و هوایی گرم و خشک همانند شهر کرمان، دمای بالای هوا در ساعات اوج مصرف سبب می‌شود که از یک سو میزان بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان‌ها زیاد شود و از سوی دیگر هوای گرم سبب می‌شود، ضریب عملکرد سیستم تهویه مطبوع نیز کاهش یابد. این دو عامل در کنار هم، منجر به افزایش هزینه انرژی الکتریکی در ساختمان می‌شود. همانگونه که بیان شد، یکی از راهکارهای مدیریت مصرف انرژی در ساختمان استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته است، به بررسی استفاده از PCM در دیوارهای ساختمان پرداخته‌اند. به نظر می‌رسد، انجام یک مطالعه موردی که با توجه به شرایط آب و هوایی شهر کرمان و تعرفه‌های بخش مسکونی در این اقلیم، به بررسی اثر بکارگیری PCM در سیستم تهویه مطبوع ساختمان بپردازد، می‌تواند نتایج جدیدی را در زمینه این شیوه مدیریت مصرف انرژی، ارائه دهد. از این رو در این تحقیق، اثر بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده بر انرژی مصرفی سیستم تهویه مطبوع و میزان مصرف در ساعات اوج بار مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ همچنین به منظور کاهش هزینه‌های سیستم، برای شارژ PCM از هوای خنک در طول شب استفاده می‌شود. اثر کاربرد PCM بر

¹ Base System



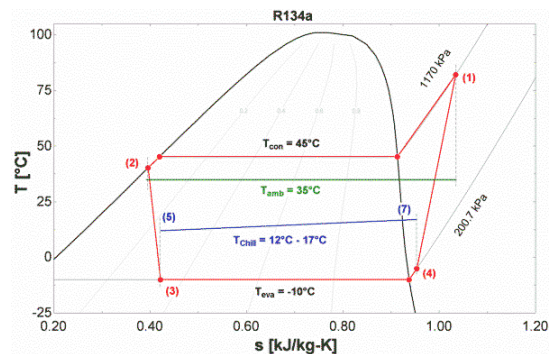
شکل ۱- نمودار توصیفی سیستم سرمایش تراکمی مرکزی

با آنچه که در این پژوهش استفاده شده است، متفاوت است، فقط در بخش راستی آزمایی نتایج، از فرضیات مورد استفاده در مرجع یاد شده استفاده شده است. شایان ذکر است که فرضیات مورد استفاده در سایر قسمت‌ها در بخش ۲-۳ توضیح داده شده است.

جدول ۱ مقایسه نتایج پژوهش حاضر و نتایج گزارش شده در مرجع [۱۴] را ارائه می‌دهد. از مقایسه مقادیر ارائه شده در جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که مدلسازی انجام شده از دقت قابل قبولی برخوردار است.

در یک سیستم سرمایش، معیار سنجش بازده سیستم توسط ضریب عملکرد (COP)^۱ بدست می‌آید. ضریب عملکرد به صورت نسبت توان سرمایش تولیدی توسط سیستم به انرژی مصرفی آن، تعریف می‌شود؛ بنابراین در یک چیلر تراکمی، ضریب عملکرد به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود. در این رابطه Q_{eva} توان سرمایشی تولید شده توسط چیلر و W_{tot} کل توان الکتریکی مصرف شده، شامل توان مصرف شده در کمپرسور، پمپ‌ها و فن‌ها است.

در یک ساختمان، با گرم‌تر شدن هوای محیط، میزان اتلافات حرارتی نیز زیادتر می‌شود؛ بنابراین با گرم‌تر شدن هوا، بار حرارتی ساختمان نیز افزایش می‌یابد. شکل ۳ نمودار

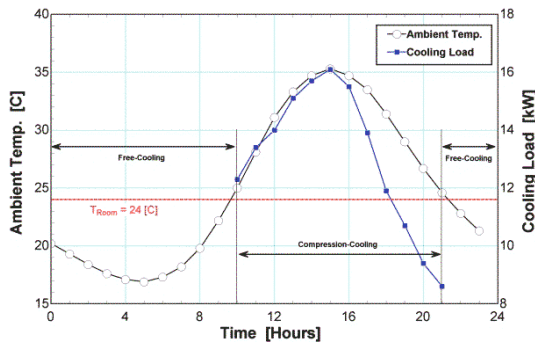


شکل ۲- نمودار دما - انترپوی مربوط به سیستم سرمایش تراکمی نمایش داده شده در شکل ۱

دما و فشار تا اندازه‌ای است که می‌تواند از آب خنکی که از فن‌کویل‌ها برگشته است، جذب حرارت کند. مبرد سپس وارد اواپراتور می‌شود و با جذب حرارت از آب خنک، ابتدا به حالت بخار اشباع و سپس چند درجه‌ای هم وارد منطقه مافوق گرم می‌شود (نقطه ۴). حال بخار مبرد به کمپرسور مکش شده و با دریافت کار تا حالت خروجی کمپرسور (نقطه ۱) متراکم می‌شود و به این شکل چرخه فرآیندهای مبرد تکمیل می‌شود.

به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از مدلسازی این سیستم، مقادیر محاسبه شده با نتایج گزارش شده توسط موروسوک و تساتسارونیس [۱۴] مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه در سیستم بررسی شده در مرجع [۱۴] برخی فرضیات

^۱ Coefficient of Performance



شکل ۳- نمودار تغییرات ساعتی دمای محیط و بار سرمایشی یک ساختمان نمونه در یک روز تابستانی

از روز که کار می‌کند را نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن دو عامل ذکر شده، توان مصرفی یک سیستم تهویه مطبوع تراکمی با گرم‌تر شدن هوا به شدت افزایش خواهد یافت.

همچنین توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که ساعات گرم روزهای تابستان منطبق با ساعات اوج مصرف انرژی الکتریکی است. شرکت‌های توزیع برق معمولاً این ساعت‌ها را به عنوان ساعات اوج مصرف (ساعات پیک) در نظر می‌گیرند؛ بنابراین هزینه برق مصرفی در یک ساختمان نیز در این ساعت‌ها افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن تمامی این موارد، یکی از راهکارهایی که منجر به کاهش قبض برق یک ساختمان می‌شود، کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم سرمایش آن ساختمان در ساعات اوج مصرف است.

۲-۲- سیستم ترکیبی

در بسیاری از کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده از PCM به عنوان بخشی از مصالح ساختمان استفاده می‌شود [۱۵]. این کاربرد را می‌توان نوعی استفاده غیرفعال^۱ از PCM دانست؛ چراکه باید در زمان ساخت ساختمان، پیش‌بینی‌های لازم انجام شود. این روش را معمولاً در ساختمان‌های ساخته شده نمی‌توان استفاده کرد؛ اما استفاده از PCM در قسمت کندانسور و اواپراتور سیستم‌های سرمایش تراکمی برای ساختمان‌های موجود هم امکان‌پذیر است. در این پژوهش، این کاربرد در ورودی کندانسور در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی

پژوهش حاضر	مرجع [۱۴]	توصیف	علامت اختصاری
۶۱/۰۶	۶۱/۱	دمای مبرد خروجی از کمپرسور	$T_i (^{\circ}C)$
۹۹/۹۸	۱۰۰	بار سرمایشی سیستم	$Q_{eva} (kW)$
۸/۲۶۹	۸/۲۷۱	اتلاف انرژی در کمپرسور	$ED_{com} (kW)$
۷/۴۵	۷/۴۵۲	اتلاف انرژی در کندانسور	$ED_{con} (kW)$
۱۰/۰۷	۱۰/۰۷۰	اتلاف انرژی در شیر انبساط	$ED_{exp} (kW)$
۶/۶۴۱	۶/۷۱۴	اتلاف انرژی در اواپراتور	$ED_{eva} (kW)$

تغییرات ساعتی دمای محیط و بار سرمایشی یک ساختمان نمونه با مساحت ۳۰۰ مترمربع را در یک روز تابستانی در شهر کرمان نمایش می‌دهد. اگر دما آسایش در این ساختمان برابر با ۲۴°C در نظر گرفته شود، در ساعاتی که دمای محیط از این میزان کمتر است، می‌توان به روش سرمایش آزاد فرآیند تهویه ساختمان را به انجام رساند. در این روش کافی است که هوای محیط به داخل ساختمان دمیده شود. یک نمونه ساده از سرمایش آزاد در ساختمان‌ها، باز گذاشتن پنجره‌ها در طول شب است. پس در ساعاتی که تهویه ساختمان به روش سرمایش آزاد صورت می‌پذیرد، سیستم سرمایش تراکمی خاموش است و عملاً تامین بار سرمایشی ساختمان بر عهده سیستم سرمایش نیست. از سوی دیگر، در یک سیستم سرمایش هر چه اختلاف دمای بین محیط دما بالا (محیطی که کندانسور با آن تبادل حرارت می‌نماید) و محیط دما پایین (محیطی که اواپراتور با آن تبادل حرارت می‌نماید) بیشتر شود، ضریب عملکرد آن کاهش می‌یابد.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{W_{tot}} \quad (1)$$

از آنجایی که کندانسور در سیستم مفروض هوا خنک است و با هوای محیط خنک می‌شود، بنابراین با افزایش دمای محیط، ضریب عملکرد این سیستم کاهش می‌یابد. از این رو در یک روز تابستان با نزدیک شدن به ساعات گرم روز، COP کاهش می‌یابد. شکل ۴ تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی یک سیستم سرمایش تراکمی هوا خنک در ساعاتی

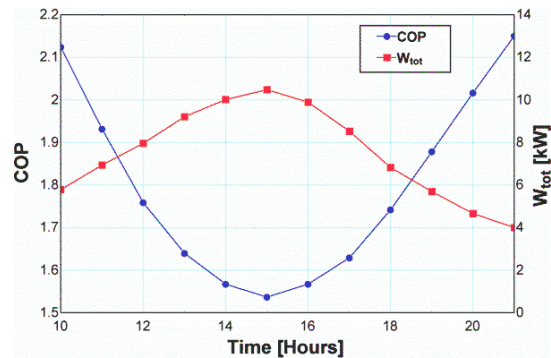
^۱ Passive

جدول ۲- خواص حرارتی ماده تغییر فاز دهنده RT25 [۱۶]

مقدار عددی	نام خاصیت (واحد)
۷۴۹	چگالی در حالت مایع (kg/m^3)
۷۸۵	چگالی در حالت جامد (kg/m^3)
۱/۴۱	ظرفیت گرمایی ویژه در حالت مایع ($kJ/kg.K$)
۱/۸۰	ظرفیت گرمایی ویژه در حالت جامد ($kJ/kg.K$)
۲۳۲	گرمای نهان ذوب / انجماد (kJ/kg)
۲۶/۶	دمای ذوب / انجماد ($^{\circ}C$)

بنابراین، به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌توان از دمنده مربوط به کندانسور برای مکش هوا به سمت محفظه نگهداری PCM استفاده کرد. در این شرایط دمپره‌های شماره یک (D.1) و شماره سه (D.3) باز و دمپر شماره دو (D.2) بسته است.

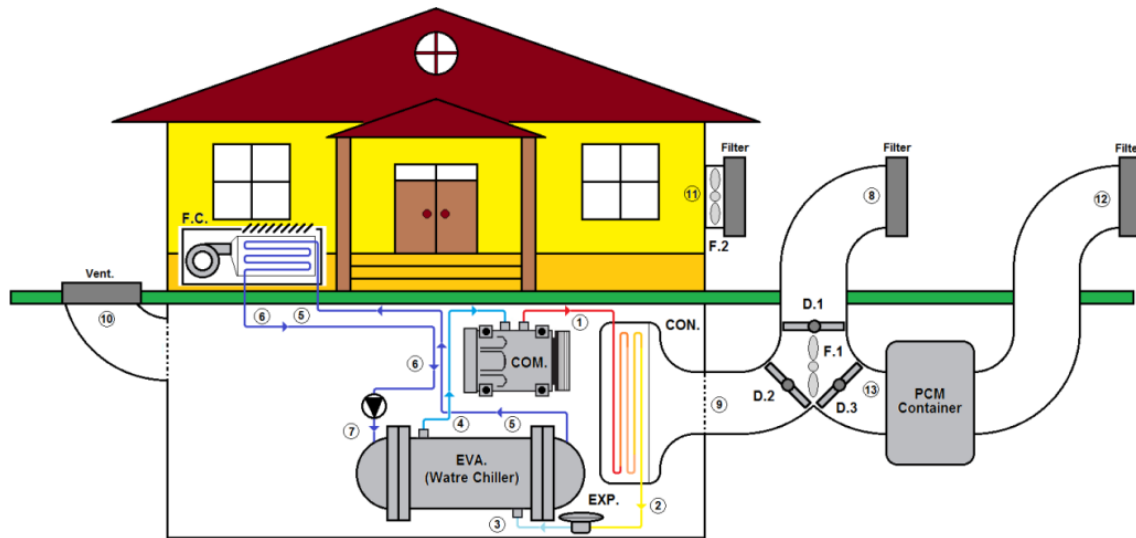
از زمانی که سیستم سرمایش تراکمی به منظور تهیه ساختمان وارد مدار می‌شود، دمپر شماره سه بسته می‌شود و هوای محیط برای خنک‌کاری کندانسور مورد استفاده قرار می‌گیرد (همانند سیستم مبنا). در ساعات اوج مصرف که از یک سو هزینه مصرف الکتریسیته بیشتر و از سوی دیگر مصرف سیستم بالاتر است، دمپر شماره یک بسته و دمپر شماره سه باز می‌شود؛ بنابراین هوای محیط قبل از تبادل حرارت با کندانسور، از روی محفظه نگهداری PCM عبور می‌کند. از سوی دیگر، نوع ماده PCM به گونه‌ای انتخاب شده است که در این ساعات دمای هوای محیط از دمای ذوب PCM بیشتر باشد. این امر سبب می‌شود که حرارت از هوای محیط به PCM منتقل شود و آن را ذوب کند؛ لذا، دمای هوایی که از محفظه PCM عبور کرده کاهش می‌یابد و سپس به سمت کندانسور رانده می‌شود. این امر سبب کاهش دمای تقطیر در کندانسور و به تبع آن، افزایش ضریب عملکرد سیستم سرمایش تراکمی خواهد شد. افزایش COP به نوبه خود توان مصرفی سیستم و هزینه قبض برق ساختمان را در آن ساعات کاهش می‌دهد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تمامی PCM شارژ شده ذوب و یا به اصطلاح، دشارژ شود. پس از آن، مجدداً



شکل ۴- نمودار تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی سیستم سرمایش در یک روز تابستانی نمونه

در این پژوهش راهکاری که برای کاهش قبض برق یک ساختمان نمونه پیشنهاد شده است، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور کاهش دمای هوای خنک‌کاری در کندانسور است؛ چراکه استفاده از سرمایش آزاد (هوای خنک شبانگاهی در مناطق کویری مانند کرمان)، می‌تواند به کاهش بیشتر مصرف انرژی در ساختمان کمک نماید. برای این منظور از یک PCM استفاده می‌شود که در دمایی نزدیک به دمای آسایش ساختمان تغییر فاز می‌دهد. با توجه به اینکه دمای آسایش $24^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است، ماده تغییر فاز دهنده‌ای که مورد مطالعه قرار گرفته است، نوعی ماده پارافینی با نام تجاری RT25 است که خواص حرارتی آن در جدول ۲ نمایش داده شده است. شکل ۵ نمودار توصیفی سیستم تهویه مطبوعی را نشان می‌دهد که در آن از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان ذخیره‌ساز بار سرمایی استفاده شده است.

در سیستم ترکیبی، از هوای خنک شب به منظور منجمد کردن (شارژ کردن) PCM استفاده می‌شود. برای این منظور در طول ساعاتی از شب که اختلاف دمای هوا و دمای نقطه انجماد PCM به میزان مشخصی برسد، هوای محیط به سمت محفظه نگهداری PCM مکش می‌شود. تماس حرارتی این هوای خنک با ظرف‌های حاوی PCM سبب می‌شود که PCM منجمد شود. محفظه نگهداری PCM بایستی به خوبی عایق پوش باشد تا اتلافات حرارتی در آن به کمترین میزان خود برسد. با توجه به اینکه در ساعاتی که PCM شارژ می‌شود، فضای ساختمان به صورت آزاد خنک‌کاری می‌گردد، در این ساعات سیستم سرمایش تراکمی خاموش است؛



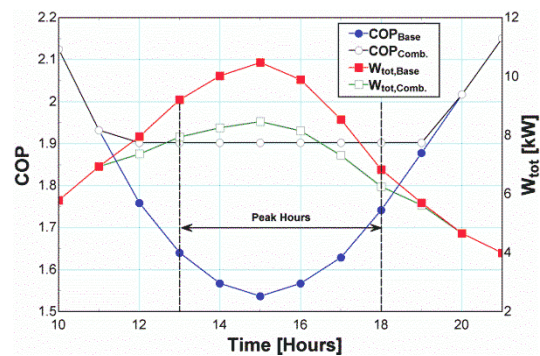
شکل ۵- نمودار توصیفی سیستم سرمایه‌گذاری ترکیبی

بماند. ثابت ماندن COP_{Comb} را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد؛ بنابراین می‌توان گفت که در ساعات اوج مصرف سیستم سرمایه‌گذاری تراکمی در حالت ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده توان کمتری نسبت به این سیستم در حالت مبنا مصرف می‌کند؛ اما باید به این نکته نیز توجه داشت که برای شارژ کردن PCM مقداری توان الکتریکی توسط دمنده هوا مصرف می‌شود. در بخش نتایج به تفصیل در مورد میزان مصرف انرژی الکتریکی در هر کدام از سیستم‌ها و مقایسه اقتصادی آنها بحث خواهد شد.

۲-۳- فرضیات مورد استفاده

در حل مجموعه معادلات حاکم بر یک مسئله تحلیل انرژی و انرژی، پارامترهای زیادی دخیل می‌باشند. به منظور ساده‌سازی مجموعه معادلات از یک سو و نزدیک‌تر نمودن جواب‌های حاصل به واقعیت فیزیکی مسئله از سوی دیگر، عموماً فرضیاتی بیان می‌شود که به حل دستگاه معادلات حاکم کمک می‌نماید. در این بخش مهم‌ترین فرضیات مورد استفاده در حل مسئله بیان می‌شود.

- در طی هر ساعت از زمان مورد مطالعه در مسئله، شرایط پایا فرض شده است و معادلات در این شرایط تدوین شده‌اند؛ بنابراین در طی آن ساعت، دماها ثابت فرض شده است.



شکل ۶- نمودار تغییرات ساعتی ضریب عملکرد و توان مصرفی سیستم‌های سرمایه‌گذاری مبنا و ترکیبی در یک روز تابستانی نمونه

دمپر شماره سه بسته و دمپر شماره دو باز خواهد شد و سیستم ترکیبی فرآیند خنک‌کاری ساختمان را همانند سیستم مبنا ادامه خواهد داد. در این پژوهش فرض می‌شود که در زمان دشارژ PCM، دمای هوای خروجی از محفظه نگهداری PCM تا کمترین مقدار ممکن کاهش یابد. این کمینه دما در واقع چند درجه‌ای بالاتر از دمای ذوب PCM خواهد بود. شکل ۶ نمودار ساعتی تغییرات ضریب عملکرد و توان مصرفی را برای دو سیستم مبنا و ترکیبی در یک روز نمونه نمایش می‌دهد. با توجه به این فرض که دمای هوای خروجی از محفظه PCM (دمای هوای ورودی به کندانسور) در طول فرآیند دشارژ ثابت است، انتظار می‌رود که در این مدت ضریب عملکرد سیستم سرمایه‌گذاری تراکمی ثابت باقی

- اختلاف دمای متوسط مبرد خروجی از کندانسور و هوای ورودی به آن برابر با 10°C در نظر گرفته شده است [۱۷].
- اختلاف دمای متوسط آب خروجی از فن‌کویل و هوای ورودی به آن برابر با 7°C فرض شده است.
- میزان مافوق گرم شدن بخاری که از اواپراتور سیستم تراکمی خارج می‌شود و همچنین میزان مادون سرد شدن مایعی که از کندانسور سیستم تراکمی خارج می‌شود، 5°C در نظر گرفته شده است.
- افزایش دمای آب در زمان عبور از فن‌کویل 5°C در نظر گرفته شده است.
- راندمان ایزنتروپیک برای پمپ برابر با 90% و افزایش فشار آب در عبور از پمپ 50 kPa فرض شده است.
- در طی مرحله شارژ، بالاترین دمایی که هوای خروجی از محفظه PCM می‌تواند به آن دست یابد، 2°C کمتر از دمای ذوب PCM است.
- در طی مرحله دشارژ، کم‌ترین دمایی که هوای خروجی از محفظه PCM می‌تواند به آن دست یابد، 2°C بیشتر از دمای ذوب PCM است.
- همچنین در طی هر ساعت از مراحل شارژ و دشارژ، نرخ تبادل حرارت PCM با محیط ثابت در نظر گرفته شده است. بدیهی است که با تغییر دمای محیط، این نرخ انتقال حرارت در ساعت‌های مختلف با هم متفاوت است.
- دمای آسایش محیط تهویه شده، 24°C فرض شده است.
- دمای آستانه شروع به کار فن شماره ۱ دمای 20°C فرض شده است. این بدان معنی است که در طول شب زمانی که دمای هوای محیط از 20°C کمتر شد، فن F.1 شروع به کار کرده و فرآیند شارژ PCM آغاز می‌شود. زمانی که دمای محیط از 20°C بیشتر شد، فن خاموش شده و فرآیند شارژ پایان می‌یابد.

$$\dot{V}_{F.2} = \frac{V_{Room}(m^3) \times 1.5}{3600 (s)} \quad (۴)$$

۳- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی هر یک از اجزاء یک سیستم مورد مطالعه، معادلات بقای جرم، بقای انرژی و توازن انرژی باید برای آن تجهیز مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه حل این معادلات برای هر جزء از سیستم، میزان مصرف انرژی و انرژی در آن جزء بدست می‌آید. در حالت پایدار، معادله پایستگی برای یک جزء به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} = 0 \quad (۵)$$

با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در یک حجم کنترل و در حالت دائم، معادله بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک) به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود.

$$Q - W = \sum_{in} (\dot{m} \times h) - \sum_{out} (\dot{m} \times h) \quad (۶)$$

معادله توازن انرژی در واقع تلفیقی از قوانین اول و دوم ترمودینامیک است. معادله عمومی توازن انرژی را نیز می‌توان به صورت رابطه (۷) بیان کرد [۲۰].

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - W_{cv} + \sum_{in} (\dot{m} \times e) - \sum_{out} (\dot{m} \times e) - ED = 0 \quad (۷)$$

دو دسته ناشی از اتلافات سیستم و ناشی از بازگشت ناپذیری‌ها طبقه بندی می‌شوند [۲۱]. از این رو برای سیستم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، راندمان قانون دوم ترمودینامیک با استفاده از معادله (۹) بدست می‌آید [۲۲].

$$\eta_{ex} = \frac{E_{Gain}}{E_{Supply}} = 1 - \frac{ED_{tot}}{E_{Supply}} \quad (9)$$

در این رابطه E_{Gain} ، E_{Supply} و ED_{tot} به ترتیب نشان‌دهنده میزان انرژی مفید بدست آمده از سیستم، مقدار انرژی تغذیه شده به سیستم و میزان اتلافات کل انرژی در سیستم است. انرژی ورودی به این سیستم به صورت توان الکتریکی است که تماماً از جنس انرژی شناخته می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که انرژی تغذیه شده به سیستم برابر با توان مصرفی کل سیستم است که در شرایط کاری مختلف، در کمپرسور، پمپ‌ها و فن‌ها مصرف می‌شود. میزان انرژی مفید و اتلافات کل انرژی سیستم را بسته به شرایط کارکرد، می‌توان به موارد ذکر شده در جدول ۴ تقسیم‌بندی کرد.

با صرف نظر از انرژی شیمیایی، می‌توان انرژی مخصوص را توسط رابطه (۸) تعریف کرد که در آن دمای مطلق مرجع است.

$$e = h - T_0 \times s \quad (8)$$

جدول ۳ معادلات حاکم برای مدل‌سازی تمامی اجزاء مورد استفاده در یک سیستم ترکیبی را نشان می‌دهد. برای واضح‌تر شدن معادلات، از شماره نقاط ارائه شده در شکل ۵، استفاده شده است.

۳-۱- راندمان انرژی سیستم‌ها

در یک سیستم سرمایش، راندمان انرژی همواره به صورت ضریب عملکرد تعریف می‌شود که توسط رابطه (۱) بیان شده است. راندمان انرژی در تحلیل سیستم‌ها می‌تواند همراه کننده باشد، چراکه نمی‌تواند میزان انحراف سیستم از حالت ایده‌آل را مشخص نماید. راندمان انرژی معمولاً دیدگاه روشن‌تری از وضعیت عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. در راندمان انرژی جریان‌های مختلف مواد، بنابر میزان محتوی انرژی آنها وزن دهی می‌شود و انحرافات از حالت ایده‌آل به

جدول ۳- معادلات حاکم بر اجزاء مختلف سیستم

نام اختصاری تجهیز	معادلات بقای جرم و انرژی	معادله بالانس انرژی
سیستم سرمایش تراکمی		
CON	$Q_{con} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_2) = \dot{m}_9 \times (h_{10} - h_9)$	$ED_{con} = \dot{m}_1 \times (e_1 - e_2) + \dot{m}_9 \times (e_9 - e_{10}) + W_{F,1}$
EXP	$h_2 = h_3$	$ED_{exp} = \dot{m}_2 \times (e_2 - e_3)$
EVA	$Q_{eva} = \dot{m}_3 \times (h_4 - h_3) = Q_{Load}$	$ED_{eva} = \dot{m}_3 \times (e_3 - e_4) + \dot{m}_7 \times (e_7 - e_5)$
COM	$PR = \frac{P_1}{P_4}$ $\eta_{ise} = 0.85 - 0.0467 \times PR$ $\eta_{ise} = \frac{h_{1,s} - h_4}{h_1 - h_4}$ $W_{com} = \dot{m}_4 \times (h_1 - h_4)$	$ED_{com} = \dot{m}_4 \times (e_4 - e_1) + W_{com}$
سیستم تهویه ساختمان		
F.C. (Fan Coil)	$Q_{FC} = \dot{m}_6 \times (h_7 - h_6) = Q_{Load}$	$ED_{FC} = \dot{m}_6 \times (e_6 - e_7) + Q_{FC} \left(1 - \frac{T_0}{T_{Room}}\right) + W_{fan,FC}$
Pump	$h_6 = h_5 + v_5 \times \frac{\Delta P_{pump}}{\eta_{pump}}$ $W_{pump} = \dot{m}_5 \times (h_6 - h_5)$	$ED_{pump} = \dot{m}_5 \times (e_5 - e_6) + W_{pump}$
سیستم سرمایش آزاد		
Free Cooling Sys.	$\dot{m}_{F,2} = \rho_{air} \times \dot{V}_{F,2} = 0.375 \left(\frac{kg}{s}\right)$ $W_{F,2} = 0.775 \times \dot{V}_{F,2}$	$ED_{Free Cooling} = \dot{m}_{F,2} \times (e_{11} - e_{10}) + W_{F,2}$

جدول ۴- پارامترهای موثر در محاسبه راندمان اگزرژی سیستم‌ها در شرایط کاری مختلف

روابط مورد استفاده	حالت مورد بررسی
$E_{Gain} = Q_{eva} \times \left 1 - \frac{T_0}{T_{cold}} \right $	
$E_{Supply} = W_{com} + W_{fans} + W_{pump}$	سیستم‌های مینا و ترکیبی در حالت استفاده از خنک‌کاری تراکمی
$ED_{tot} = \sum_{components} ED_{Chiller} + ED_{fancoil} + \dot{m}_{10} \times e_{10}$	
$E_{Gain} = \dot{m}_{F,2} \times (e_{10} - e_{11})$	
$E_{Supply} = W_{F,2}$	سیستم مینا در حالت استفاده از خنک‌کاری آزاد
$ED_{tot} = \dot{m}_{F,2} \times (e_{11} - e_{10}) + W_{F,2}$	
$E_{Gain} = \dot{m}_{F,1} \times (e_{13} - e_{12}) + \dot{m}_{F,2} \times (e_{10} - e_{11})$	
$E_{Supply} = W_{F,1} + W_{F,2}$	سیستم ترکیبی در حالت استفاده از خنک‌کاری آزاد
$ED_{tot} = \dot{m}_{F,1} \times (e_{12} - e_{13}) + W_{F,2} + \dot{m}_{F,2} \times (e_{11} - e_{10}) + W_{F,2}$	

ارائه شده است، نرم‌افزار هاپ (HAP)^۱ نامیده می‌شود. با توجه به اینکه در این پژوهش نیاز است که بار حرارتی ساختمان به صورت ساعتی محاسبه شود، نرم‌افزار HAP این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. حال می‌توان نتایج مربوط به مدل‌سازی ساختمان را از نرم‌افزار دریافت کرد. این نتایج برای روز میانگین در ماه جولای، در شکل ۷ به نمایش در آمده است. شایان ذکر است که روز میانگین در واقع به شکل روزی تعریف می‌شود که دمای ساعتی آن میانگین دماهای ساعتی سه روز از گرمترین روزهای این ماه است؛ همچنین ذکر این نکته نیز ضروری است که اطلاعات آب و هوایی مورد استفاده در این پژوهش توسط نرم‌افزار متئونورم^۲ فراهم شده است.

۴-۲- مقایسه عملکرد سیستم‌های مینا و ترکیبی در شرایط طراحی

سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان برای شرایطی طراحی می‌شود که بار حرارتی ساختمان بیشینه است. با توجه به اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان، بیشینه بار حرارتی

در بررسی جدول ۴ باید به دو نکته توجه نمود: نکته اول: در محاسبه راندمان اگزرژی، شرایط کاری پایا در نظر گرفته شده است و از جملات مربوط به اگزرژی ذخیره شده در سیستم، صرف‌نظر شده است. نکته دوم: در حالت استفاده از سیستم خنک‌کاری تراکمی، معادلات برای سیستم مینا و ترکیبی یکسان است. تنها تفاوت در این است که هوای عبوری از روی کندانسور در سیستم ترکیبی با دمایی کمتر نسبت به حالت مینا وارد می‌شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- محاسبه بار حرارتی ساختمان

در گذشته، محاسبه بار حرارتی یک ساختمان فرآیندی زمان‌بر و خسته‌کننده محسوب می‌شد. با ورود کامپیوتر به عنوان ابزاری مفید برای کوتاه نمودن مدت زمان محاسبات، شرکت‌های مختلف اقدام به ارائه نرم‌افزارهایی نمودند که انجام فرآیند محاسبه بار حرارتی ساختمان‌ها را کوتاه و آسان نماید. یکی از این نرم‌افزارها که توسط شرکت کریر

^۱ Hourly Analysis Program

^۲ Meteonorm Software

جدول ۵- پارامترهای عملکردی و میزان تبادل انرژی اجزاء مختلف سیستم‌های مبنا و ترکیبی

علامت اختصاری	توصیف	سیستم مبنا	سیستم ترکیبی
T_{amb}	دمای محیط ($^{\circ}C$)	۳۵/۳	۳۵/۳
T_{con}	دمای کندانسور ($^{\circ}C$)	۴۵/۳	۳۸/۶
T_{eva}	دمای اواپراتور ($^{\circ}C$)	-۱۰	-۱۰
T_{Room}	دمای اتاق ($^{\circ}C$)	۲۴	۲۴
Q_{load}	بار حرارتی ساختمان (kW)	۱۶/۱	۱۶/۱
W_{tot}	توان کل مصرفی (kW)	۱۰/۵	۸/۵
Q_{con}	بار حرارتی کندانسور (kW)	۲۳/۶	۲۲
Q_{eva}	بار حرارتی اواپراتور (kW)	۱۶/۱	۱۶/۱
COP	ضریب عملکرد	۱/۵۴	۱/۹

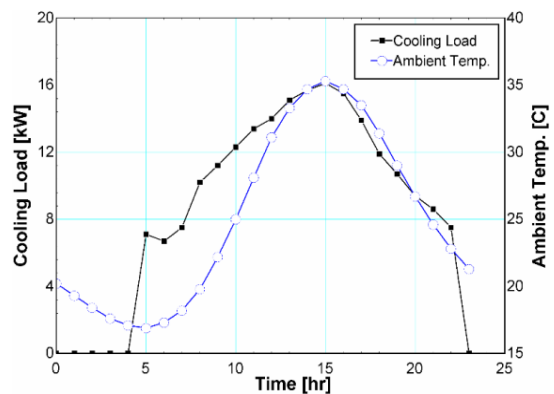
جدول ۶- اتلافات و راندمان انرژی سیستم‌های مبنا و ترکیبی در نقطه طراحی

اتلافات و راندمان انرژی	سیستم مبنا	سیستم ترکیبی
ED_{com} (kW)	۴/۱۳	۳
ED_{con} (kW)	۱/۳۶	۱/۲۱
ED_{eva} (kW)	۱/۶	۱/۵۶
ED_{exp} (kW)	۰/۹۱	۰/۶۳
ED_{FC} (kW)	۱/۲۷	۱/۲۶
ED_{pump} (kW)	۰	۰
ED_{tot} (kW)	۹/۸۷	۸/۲۲
η_{ex} (%)	۵/۸۴	۷/۲۳

۳-۴- بررسی عملکرد ساعتی سیستم‌های مبنا و ترکیبی
 برای بررسی عملکرد سیستم‌های مورد مطالعه و با توجه به اینکه این سیستم‌ها برای تهویه تابستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، جدول ۷ مقادیر ساعتی ضریب عملکرد و راندمان

ساعت ۱۵ روز میانگین در ماه جولای اتفاق می‌افتد. از این رو، تمامی نتایج ارائه شده در این بخش مربوط به این شرایط طراحی است. مدل‌سازی اجزاء مختلف سیستم مورد مطالعه به طور کامل در نرم‌افزار EES انجام شده است. جدول ۵ پارامترهای عملکردی و میزان تبادل انرژی اجزاء مختلف سیستم‌های مبنا و ترکیبی را با یکدیگر مقایسه می‌کند. شایان ذکر است که دمای تبخیر مبرد در اواپراتور سیستم سرمایش تراکمی $10^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است.

همانگونه که انتظار می‌رفت، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، دمای کندانسور سیستم ترکیبی در مقایسه با این دما در سیستم مبنا کاهش می‌یابد. این کاهش دما سبب افزایش ۲۴ درصدی ضریب عملکرد سیستم و در نتیجه کاهش ۱۹ درصدی در توان مصرفی سیستم می‌شود. جدول ۶ به مقایسه اتلافات انرژی در هر یک از اجزاء سیستم‌های مورد مطالعه و همچنین راندمان انرژی آنها می‌پردازد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در سیستم ترکیبی اتلاف انرژی در تمامی اجزاء کمتر از میزان جزء متناظر در سیستم مبنا است. تنها در مورد اواپراتور و فن کویل می‌توان گفت که اتلافات تغییر چندان نداشته است. دلیل این امر این است که تغییر دمای کندانسور تأثیری در عملکرد اواپراتور و در نتیجه عملکرد فن کویل ندارد. از طرف دیگر، میزان کل اتلافات انرژی در سیستم ترکیبی به میزان ۱۶/۷ کاهش و راندمان انرژی به میزان ۲۳/۸ درصد افزایش یافته است. این افزایش راندمان نشان دهنده بهبود واقعی عملکرد سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم مبنا است.



شکل ۷- بار حرارتی ساختمان در روز میانگین ماه جولای

راندمان کمی است. این در حالی است که ضریب عملکرد این سیستم‌ها (راندمان انرژی) در حد قابل قبولی قرار دارد؛ همچنین، شایان ذکر است که دمای ساعتی محیط با استفاده از نرم‌افزار HAP بدست آمده است. با توجه به اینکه در دو ماه جولای و آگوست شرایط طراحی محیط در شهر کرمان تغییر چندانی ندارد، دمای طراحی ساعتی تقریباً یکسان است. از این رو، در ضریب عملکرد و راندمان انرژی سیستم‌ها نیز تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود.

پارامترهای مرتبط با مصرف ساعتی انرژی در سیستم‌های مینا و ترکیبی برای ماه‌های مورد مطالعه جداگانه محاسبه شده است؛ همچنین ساعات تعرفه عادی، کم مصرف و پرمصرف، بر اساس اعلام شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان [۲۳] در محاسبات مد نظر قرار گرفته است. در سیستم مینا، در ساعتی که سیستم تراکمی کار می‌کند، فن شماره ۲ خاموش است که مربوط به خنک‌کاری

انرژی را در سیستم‌های مینا و ترکیبی در چهار ماه مورد نظر برای تهویه تابستانی، نمایش می‌دهد. با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول، می‌توان گفت که به طور کل عملکرد سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم مینا، در ساعتی که فرآیند سرمایش تراکمی در حال انجام است، عملکردی قابل قبول است؛ همچنین ذکر این نکته نیز لازم است که در ماه سپتامبر با توجه به خنک شدن نسبی هوا، ساعتی طولانی‌تر می‌شود که می‌توان از فرآیند خنک‌کاری آزاد برای تهویه ساختمان استفاده کرد. از این رو در ماه سپتامبر، از ساعت ۱۰ الی ۱۱ صبح و همچنین ۹ الی ۱۰ شب نیز می‌توان از سرمایش آزاد بهره برد. از نتایج راندمان انرژی در این جدول نیز می‌توان به عملکرد مطلوب سیستم ترکیبی پی برد.

نکته دیگری که از جدول ۷ بر می‌آید این است که به طور کل، راندمان انرژی سیستم تهویه مطبوع تراکمی

جدول ۷- مقادیر ساعتی ضریب عملکرد و راندمان انرژی در سیستم‌های مینا و ترکیبی

ماه	راندمان انرژی (%)		ضریب عملکرد											
	ژوئن		جولای		آگوست		سپتامبر		ژوئن		جولای		آگوست	
	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی	مینا	ترکیبی
۱۰	۲/۲	۲/۲	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۳	۰/۳	---	---	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱
۱۱	۲/۰	۲/۰	۲/۷	۲/۷	۱/۹	۲/۷	۲/۴	۲/۴	۲/۰	۲/۰	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۲/۰
۱۲	۱/۸	۱/۸	۴/۲	۱/۸	۴/۲	۲/۹	۳/۹	۱/۹	۱/۸	۱/۹	۱/۸	۱/۸	۱/۹	۱/۸
۱۳	۱/۷	۱/۷	۵/۱	۱/۶	۵/۱	۲/۹	۴/۹	۱/۹	۱/۷	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹
۱۴	۱/۶	۱/۶	۵/۶	۱/۶	۵/۶	۲/۹	۵/۵	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹
۱۵	۱/۶	۱/۶	۵/۸	۱/۵	۵/۸	۲/۹	۵/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۵	۱/۹	۱/۵	۱/۹
۱۶	۱/۶	۱/۶	۵/۶	۱/۶	۵/۶	۲/۹	۵/۵	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹
۱۷	۱/۷	۱/۷	۵/۲	۱/۶	۵/۲	۲/۹	۵/۰	۱/۹	۱/۷	۱/۹	۱/۶	۱/۹	۱/۶	۱/۹
۱۸	۱/۸	۱/۸	۴/۳	۱/۷	۴/۳	۲/۹	۴/۱	۱/۹	۱/۸	۱/۹	۱/۷	۱/۹	۱/۷	۱/۹
۱۹	۱/۹	۱/۹	۳/۲	۱/۹	۳/۲	۲/۹	۲/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹
۲۰	۲/۱	۲/۱	۱/۸	۲/۰	۱/۸	۱/۵	۱/۵	۲/۱	۲/۱	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۱
۲۱	۲/۲	۲/۲	۰/۴	۰/۴	۲/۲	۰/۴	۰/۱	۰/۱	---	---	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲

۳۵ سال بدست می‌آید که بسیار از طول عمر سیستم بیشتر خواهد بود.

$$N_p = \frac{\ln \left[\frac{C_{PCM} \times i_f}{C_{save}} + 1 \right]}{\ln(1 + i_f)} \quad (12)$$

همچنین، با احتساب قیمت برق در شهر نیویورک آمریکا که معادل ۱۹/۸۶ سنت برای هر کیلووات ساعت است [۲۶]، دوره بازگشت سرمایه ۲۲ سال خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده میزان کل انرژی الکتریکی سیستم سرمایه‌ش به میزان ۴۶۷/۶۴ کیلووات ساعت کاهش می‌یابد که معادل ۴/۸۵٪ کاهش در مصرف انرژی الکتریکی است؛ همچنین در ساعات پیک مصرف، انرژی مصرفی به میزان ۸۵۰/۴ کیلووات ساعت که معادل ۱۴/۷۶٪ است، کاهش می‌یابد. این میزان کاهش انرژی منجر به ۲۶۶۵۵۹ تومان کاهش هزینه در قبض برق می‌شود که نشان دهنده ۶/۷۱٪ کاهش در طول دوره کارکرد سیستم تهویه تابستانی است. البته با توجه به نرخ نسبتاً اندک الکتروسیته، حداقل دوره بازگشت سرمایه برای این سیستم ۲۲ سال خواهد بود.

۶- سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، طی قرارداد شماره ۹۷/۱۹۲ کمال سپاسگزاری را دارد.

آزاد است. از سوی دیگر، در سیستم ترکیبی زمانی که سیستم تراکمی خاموش است، از فن کندانسور برای شارژ کردن ماده PCM استفاده می‌شود. به همین علت در سیستم ترکیبی توان مصرفی فن‌ها بیشتر است.

۴-۴- تحلیل اقتصادی

به غیر از محاسبه کل میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و میزان کاهش مصرف در ساعات پیک، باید با اعمال تعرفه هزینه برق، میزان صرفه‌جویی اقتصادی سیستم پیشنهادی را بدست آورد. جدول ۸ میزان کل مصرف انرژی در دو سیستم مینا و ترکیبی را در هر ماه از دوره مورد بررسی، نمایش می‌دهد. در ادامه، جدول ۹ هزینه قبض برق ماهانه هر کدام از سیستم‌ها و همچنین مجموع صرفه‌جویی در کل دوره را نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۸ و ۹، می‌توان نتایج این تحقیق را به صورت جدول ۱۰ خلاصه کرد.

از سوی دیگر، برای مجهز نمودن سیستم تهویه مطبوع ساختمان به منبع ذخیره‌سازی PCM، هزینه‌ای در حدود ۷۰۲۰ دلار نیاز است. این هزینه اولیه بر اساس حجم ذخیره‌سازی مورد نیاز که معادل 0.93 m^3 است و با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۱)، بدست آمده است [۲۴].

$$C_{PCM} = 8.67 \times 10^a \quad (10)$$

$$a = 2.9211 \times e^{0.146 \times \text{Log}(V)} \quad (11)$$

بنابراین، اگر با استفاده از رابطه (۱۲) دوره بازگشت سرمایه محاسبه شود [۲۵]، بر اساس تعرفه‌های برق ایران و با در نظر گرفتن نرخ تورم ۱۰٪ در هزینه برق، دوره بازگشت سرمایه

جدول ۸- میزان کل مصرف انرژی در دو سیستم مینا و ترکیبی

ماه مورد مطالعه	انرژی مصرفی در سیستم مینا (kWh)	انرژی مصرفی در سیستم ترکیبی (kWh)	انرژی مصرفی در سیستم مینا (kWh)	انرژی مصرفی در سیستم ترکیبی (kWh)
ژوئن	۲۴۳۸/۹	۲۳۲۴/۶	۱۲۴۴/۵	۱۴۵۰
جولای	۲۹۰۱/۷	۲۷۶۱	۱۴۳۷/۶	۱۷۰۳/۸
آگوست	۲۸۴۴/۱	۲۷۰۳/۸	۱۴۱۴/۷	۱۶۷۶/۳
سپتامبر	۱۴۶۷/۳	۱۳۹۴/۹	۸۱۳/۹	۹۳۱
مجموع	۹۶۵۲	۹۱۸۴/۳	۴۹۱۰/۷	۵۷۶۱/۱

جدول ۹- هزینه مصرف انرژی در دو سیستم مبنا و ترکیبی

ماه مورد مطالعه	هزینه قبض ماهانه سیستم مبنا (تومان)	هزینه قبض ماهانه سیستم ترکیبی (تومان)	هزینه قبض ماهانه سیستم مبنا (دلار)	هزینه قبض ماهانه سیستم ترکیبی (دلار)
ژوئن	۱۰۰۴۷۰۶	۹۳۹۸۳۳	۹۱/۳۴	۸۵/۴۴
جولای	۱۲۱۹۸۱۶	۱۱۳۸۶۰۶	۱۱۰/۸۹	۱۰۳/۵۱
آگوست	۱۱۹۳۲۶۶	۱۱۱۲۶۵۰	۱۰۸/۴۸	۱۰۱/۱۵
سپتامبر	۵۵۳۷۹۸	۵۱۳۹۳۸	۵۰/۳۵	۴۶/۷۲
مجموع	۳/۹۷۱/۵۸۷	۳/۷۰۵/۰۲۷.۳۷	۳۶۱/۰۵	۳۳۶/۸۲

جدول ۱۰- میزان صرفه‌جویی در هزینه مصرف انرژی

نام پارامتر	مقدار عددی
کل انرژی صرفه‌جویی شده (kWh)	۴۶۷/۶۴
درصد انرژی صرفه‌جویی شده (%)	۴/۸۵
انرژی صرفه‌جویی شده در ساعات پیک (kWh)	۸۵۰/۴
درصد انرژی صرفه‌جویی شده در ساعات پیک (%)	۱۴/۷۶
هزینه صرفه‌جویی شده (تومان)	۵۵۶.۲۶۶
هزینه صرفه‌جویی شده (دلار)	۲۴/۲۳
درصد کاهش هزینه قبض برق (%)	۶/۷۱

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم	زیرنویس‌ها
0	نقطه مرجع
e	انرژی مخصوص (kJ/kg)
E	انرژی کل (kW)
ED	اتلافات انرژی (kW)
h	انتالپی مخصوص (kJ/kg)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
ΔP	افت فشار (kPa)
PR	نسبت فشار
	amb محیط
	$charge$ فرآیند شارژ ماده تغییر فاز دهنده
	$comb.$ سیستم ترکیبی
	con کندانسور
	cv حجم کنترل
	$discharge$ فرآیند دشارژ ماده تغییر فاز دهنده
	eva اواپراتور

- energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *App Therm Engineer* 96: 391-399.
- [10] De Falco M, Capocelli M, Giannattasio A (2016) Performance analysis of an innovative PCM-based device for cold storage in the civil air conditioning. *Eng Build* 122: 1-10.
- [11] Alam M, Sanjayan J, Zou PXW, Ramakrishnan S, Wilson J (2017) Evaluating the passive and free cooling application methods of phase change materials in residential buildings: A comparative study. *Eng Build* 148: 238-256.
- [12] Bakhshipour S, Valipour MS, Pahamli Y (2017) Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger. *Int J Refrig* 83: 1-3.
- [13] Said MA, Hassan H (2018) Parametric study on the effect of using cold thermal storage energy of phase change material on the performance of air-conditioning unit. *App Eng* 230:1380-1402.
- [14] Morosuk T, Tsatsaronis G (2009) Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids. *Energy* 34: 2248-2258.
- [۱۵] گودرزی ع، حقیقی‌پشتیری ا (۱۳۹۴) بررسی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیواره هواکش خورشیدی به منظور تهویه طبیعی فضای یک اتاق. *نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۲۶۹-۲۵۷: (۳): ۵.
- [16] Mosaffa AH, Garousi Farshi L, Infante Ferreira CA, Rosen MA (2014) Energy and exergy evaluation of a multiple-PCM thermal storage unit for free cooling applications. *Renew Eng*, 68: 452-458.
- [17] Judge J, Hwang Y, Radermacher R (1995) Results of two drop-in replacement refrigerants for HCFC-22. The Hague, The Netherlands. *Proc 19th Int Cong Refrig IVb* 1168-1175.
- [18] Hwang Y (2004) Potential energy benefits of integrated refrigeration system with microturbine and absorption chiller. *Int J Refrig* 27: 816-829.
- [19] Harris NC (1983) *Modern Air Conditioning Practice*. 3rd edn. McGraw-Hill, New York, Chapter 8.
- [20] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M (1996) *Thermal Design and Optimization*. 1st edn. John Wiley & Sons, New York, 121-131.
- [21] Dincer I, Rosen MA (2013) *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd edn. Elsevier, Chaps 1 and 2.
- [22] Kaushik SC, Arora A (2009) Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water-LiBr absorption refrigeration system. *Int J Refrig* 32: 1247-1258.
- شیر انبساط *exp*
- فن شماره ۱ یا ۲ *F.1 or F.2*
- فن کوئل *FC*
- مفید *Gain*
- ورودی به حجم کنترل *in*
- بار حرارتی ساختمان *Load*
- نقطه ذوب *melt*
- خروجی از حجم کنترل *out*
- تغذیه شده *Supply*
- کل سیستم *tot*
- ### ۸- مراجع
- [۱] توکلی ار (۱۳۹۵) تهویه مطبوع ۳۰ درصد انرژی را مصرف می‌کند. *درگاه اینترنتی مجله اقتصاد آنلاین* (<https://www.eghtesadonline.com>).
- [۲] طحانی م، شمس‌الدینی س، فراهت س، ربانی ع (۱۳۹۴) شبیه‌سازی ترمودینامیکی کولرهای اجکتوری - تراکمی. *نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۱۸۷-۱۷۹: (۲): ۵.
- [3] Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H (2004) Free-cooling of buildings with phase change materials. *Int J Refrig* 27: 839-849.
- [4] Kamali S (2014) Review of free cooling system using phase change material for building. *Eng Build* 80:131-136.
- [5] Mosaffa AH, Garousi Farshi L, Infante Ferreira CA, Rosen MA (2014) Energy and exergy evaluation of a multiple-PCM thermal storage unit for free cooling applications. *Renew Eng* 68: 452-458.
- [6] Waqas A, Ud-Din Z (2013) Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review. *Renew Sustain Eng Review* 18: 607-625.
- [7] Thambidurai M, Panchabikesan K, Mohan K, Ramalingam V (2015) Review on phase change material based free cooling of buildings – The way toward sustainability. *J Eng Store* 4: 74-88.
- [8] Souayfane F, Fardoun F, Biwole PH (2016) Phase Change Materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Eng Build* 129: 396-431.
- [9] Hoseini Rahdara M, Emamzadeh A, Ataei A (2016) A comparative study on PCM and ice thermal

- [25] Duffie JA, Beckman WA (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. 4th edn. John Wiley & Sons, New York, Chap 11.
- [26] US Energy Information Administrator (2020) Average price of electricity to ultimate customers by end-use sector (<https://www.eia.gov.com>).
- [۲۳] تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آنها از ابتدای اردیبهشت سال ۱۳۹۸ (۱۳۹۸) وزارت نیرو، شرکت نیروی توزیع برق شمال کرمان.
- [24] Dastmalchi M, Ahmadi Boyaghchi F (2020) Exergy and economic analyses of nanoparticle-enriched phase change material in an air heat exchanger for cooling of residential buildings. *Energ Store* 32: 101705.