ارزیابی فنی–اقتصادی بهره‌گیری از سامانه ذخیره‌سازی یخ بر اساس الزامات جدید پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

سعید رهگذر[۱،*]، مازیار دهقان[۱]، ابوالفضل پوررجبیان[۱] و حمیدرضا حقگو[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹

واژگان کلیدی:

بارهای سرمایشی،
ذخیره‌سازی سرما،
سیستم ذخیره یخ،
پیک سایی،
مقررات ملی ساختمان،
مبحث ۱۹،
ارزیابی اقتصادی،
نرم‌افزار کریر.

چکیده

با توجه به سهم قابل توجه بارهای سرمایشی در پیک مصرف برق در کشور و روند فزاینده آن در سال‌های اخیر (تا حدود ۴۰ درصد از اوج تقاضای برق)، در پیش‌نویس ویرایش جدید مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان الزامات متعددی جهت مدیریت این بارها پیش‌بینی شده است. از جمله این الزامات بهره‌گیری از سامانه‌های ذخیره یخ در ساختمان‌های با بار سرمایشی بالا است. به منظور ارزیابی فنی-اقتصادی اجرای این الزامات، بار سرمایشی یک ساختمان نمونه با کاربری آموزشی در شهر اهواز توسط نرم‌افزار کریر شبیه‌سازی و بر اساس دو راهبرد ذخیره کامل و ذخیره جزئی، عملکرد فنی به همراه سرمایه‌گذاری اقتصادی لازم تحلیل شد. زمان بازگشت سرمایه مازاد مورد نیاز جهت اجرای سامانه‌های ذخیره‌سازی با توجه به پتانسیل صرفه‌جویی تعیین و مشخص گردید که بار اقتصادی این الزامات تابعی از نوع راهبرد ذخیره‌سازی، کاربری ساختمان مربوطه و اقلیم است. بر این اساس در ساختمان نمونه مورد بررسی در حالی که بهره‌گیری از ذخیره‌سازی جزئی کاملا اقتصادی است، در شرایط برابر بازگشت سرمایه برای سامانه ذخیره‌سازی کامل بیش از ۵۰ سال خواهد بود. نتایج بررسی سناریوهای مختلف و محتمل تعرفه پایه برق نشان داد که افزایش پنج برابری تعرفه پایه فروش برق، این زمان را به حدود ۱۰ سال کاهش خواهد داد.

۱-مقدمه

با افزایش جمعیت و ارتقاء سطح عمومی زندگی مصرف انرژی به صورت فزاینده‌ای در حال افزایش است. بخش عمده مصرف انرژی در ماه‌های گرم به خصوص در ساعات اوج بار مربوط به بارهای سرمایشی بخش ساختمان است. بخش ساختمان به همراه صنعت ساخت و ساز بزرگترین مصرف‌کننده انرژی بوده و حدود ۴۰٪ مصرف کل انرژی را به خود اختصاص داده است [۱]. بیش از ۸۰٪ انرژی مصرفی در ساختمان‌ها از منابع فسیلی تأمین می‌شود. سوخت‌های فسیلی علاوه بر محدود بودن منابع، از عوامل اصلی تولید آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می باشند. یکی از راه‌های مدیریت مصرف ساعات اوج بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است که در این ساعات بیشترین تولید خود را دارد [۲،۳]. رویکرد دیگر استفاده از انواع راهبردهای مدیریت انرژی و صرفه‌جویی در ساختمان‌ها است که می‌تواند نقش بسزایی در کاهش مصارف داشته باشد [۴]. استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی راهکار مهم و رایج دیگری برای مدیریت بارهای سرمایشی است [۵]. این سامانه‌ها با انتقال بخشی از مصارف ساعات اوج مصرف به ساعات کم‌باری علاوه بر کاهش مصارف در ساعات اوج، به کاهش هزینه‌ها نیز کمک می‌کنند.

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یکی از انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی است که در کنار روش‌های مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی به صورت گسترده مورد استفاده قرار

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.rahgozar@merc.ac.ir

۱. استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی

۲. مربی، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی

گرفته است [۶]. در این فن‌آوری انرژی در قالب گرما و یا سرما در یک ماده ذخیره‌سازی ذخیره شده و در زمان دیگر جهت گرمایش، سرمایش و یا تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سامانه‌ها با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در یک زمان، امکان استفاده از انرژی در زمان دیگر در همان شکل و یا اشکال دیگر انرژی را مهیا می‌کنند [۷ و ۸]. یکی از انواع سامانه‌های رایج و توسعه‌یافته ذخیره‌ساز حرارتی، ذخیره‌ساز یخ است که مشخصا جهت پیک‌سایی در زمان پیک بار در فصول گرم سال به منظور مدیریت بارهای سرمایشی به کار می‌روند [۹]. صنایع و حکمتیان [۱۰]، به بررسی سیستم تهویه مطبوع با سیستم ذخیره یخ از جنبه‌های انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی در دو راهبرد کامل و جزئی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد جابجایی مصرف برق از ساعت‌های پیک به غیر پیک باعث کاهش هزینه مصرف برق به میزان ۳۲/۶۵ ٪ برای راهبرد کامل و ۱۳/۴۵ ٪ برای راهبرد جزئی شد. در مطالعه دیگری سربندی فراهانی [۱۱] امکان بکارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما در ۱۲ ساختمان نمونه واقع در شهرهای تهران، شیراز، اهواز و بندرعباس را بررسی کرد. نتایج نشان داد که پتانسیل قابل توجهی در جابجایی بار تا ۳۳ درصد و کاهش تقاضا تا ۵۰ درصد به کمک سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما (یخ و آب سرد) وجود دارد. در راستای مدیریت بارهای سرمایشی در پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان که توسط کمیته تخصصی مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان تهیه و در اواسط سال ۱۳۹۸ منتشر گردید [۱۲]، ساختمان‌های دارای بار سرمایشی بالاتر از یک آستانه مشخص ملزم به بهره‌گیری از سامانه‌های ذخیره‌سازی یخ شده‌اند. در جدول ۱ آستانه بار سرمایشی ساختمان‌های ملزم به استفاده از سیستم ذخیره‌سازی یخ مطابق پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان آورده شده است.

در مطالعه حاضر بار اقتصادی ناشی از اجرای این قانون در صورت تصویب نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور بار سرمایشی یک ساختمان نمونه با کاربری آموزشی توسط نرم‌افزار کریر شبیه‌سازی و ارزیابی شده و متناسب با آن سامانه تراکمی تأمین کننده این بار سرمایش با و بدون سامانه ذخیره‌ساز یخ انتخاب شده است. بر اساس میزان سرمایه‌گذاری اولیه و میزان صرفه‌جویی حاصل از بکارگیری ذخیره‌ساز، نتایج اجرای این قانون مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفته است.

جدول ۱- حداقل بار سرمایشی ساختمان‌های ملزم به استفاده از ذخیره‌ساز یخ مطابق پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان.

نوع ساختمان	بار سرمایشی (kW)
منطبق بر مقررات مبحث ۱۹	۹۱۰
کم‌انرژی	۶۳۰
بسیار کم‌انرژی	۴۵۵

۲-شبیه‌سازی بارهای سرمایشی ساختمان نمونه

اطلاعات ورودی جهت شبیه‌سازی بارهای سرمایشی ساختمان نمونه و نتایج شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار کریر در ادامه معرفی شده است.

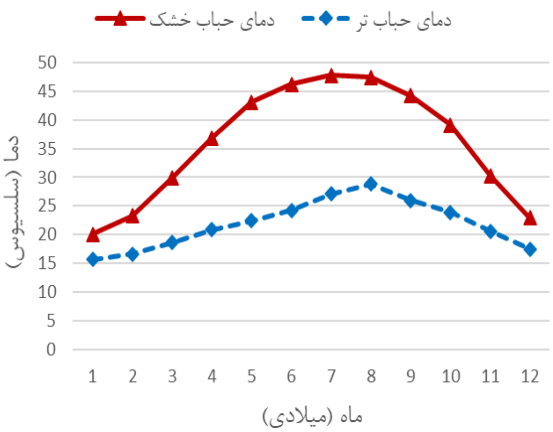
۲-۱-مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان نمونه در نظر گرفته شده در این مطالعه یک ساختمان ۴ طبقه شمالی-جنوبی با کاربری آموزشی در اقلیم شهر اهواز است. مشخصات ابعادی و تعداد افراد حاضر در ساختمان در جدول ۲ آورده شده است. برنامه حضور افراد در ساختمان به صورتی تعریف شده است که این حضور در ساعات ۸ تا ۱۳ به صورت ۱۰۰ درصد و پس از آن به صورت تدریجی کاهش پیدا می‌کند به نحوی که در ساعت پایانی فعالیت (ساعت ۱۶ تا ۱۷) به ۶۰٪ خواهد رسید. اطلاعات آب و هوایی ورودی به نرم‌افزار بر اساس استاندارد اشری[۱] وارد شده است. دمای بیشینه حباب خشک و تر در ماه‌های مختلف مربوط به شهر اهواز بر اساس این استاندارد در شکل (۱) نشان داده شده است. ضرایب انتقال حرارت سطحی برای جدارهای نورگذر، در، سقف و دیوارها به ترتیب ۵/۷، ۵/۸، ۱/۸۶ و ۲/۲۱ $W/(m^2K)$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات ساختمان نمونه

مشخصات	مقادیر
تعداد طبقات	۴
مساحت هر طبقه (متر مربع)	۱۳۲۰
مساحت ضلع شمالی / جنوبی (مترمربع)	۷۲۰
مساحت ضلع شرقی / غربی (مترمربع)	۲۶۴
مساحت پنجره ضلع شمالی و جنوبی (٪)	۵۳
مساحت پنجره ضلع شرقی و غربی (٪)	۰
تعداد افراد (مترمربع بر نفر)	۵/۶

[۱] ASHRAE



شکل ۱- دمای بیشینه حباب خشک و تر در ماه‌های مختلف سال در شهر اهواز.

۲-۲-معادلات حاکم

بار سرمایشی ساختمان با استفاده از اطلاعات ورودی بخش ۲-۱ و بهره‌گیری از نرم‌افزار کریر از مجموع بارهای سرمایشی زیر محاسبه شده است:

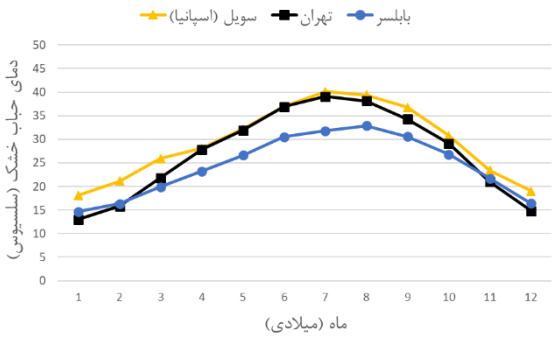
۱) تابش و هدایت حرارتی از پنجره‌ها، درب‌ها و جداره‌های نورگذر، ۲) تابش و هدایت حرارتی از جداره‌های خارجی غیر نورگذر، ۳) هدایت حرارتی جداره‌ها، پنجره‌ها و درب‌های داخلی، ۴) بار محسوس و نهان ناشی از هوای خارجی، ۵) بار محسوس و نهان ناشی از ساکنین و وسایل گرمازای داخلی.

به جهت حفظ اختصار از تکرار روابط و معادلات متعدد جهت محاسبه بارهای مختلف یاد شده خودداری شده است. جزئیات روابط در مرجع [۱۳] به تفصیل قابل دسترسی است.

۲-۳-صحت‌سنجی شبیه‌سازی

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، ابتدا محاسبه بار سرمایش برای یکی از نزدیک‌ترین شهرهای اروپایی به اقلیم کشور، شهر سویل در کشور اسپانیا انجام شد. در شبیه‌سازی بار سرمایش شهر سویل از اطلاعات آب و هوایی طراحی مطابق استاندارد اشری و دیگر اطلاعات ورودی از مرجع معتبر [۱۴] استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار کریر با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه و تطبیق در بازه ۱۰٪ را نشان داد.

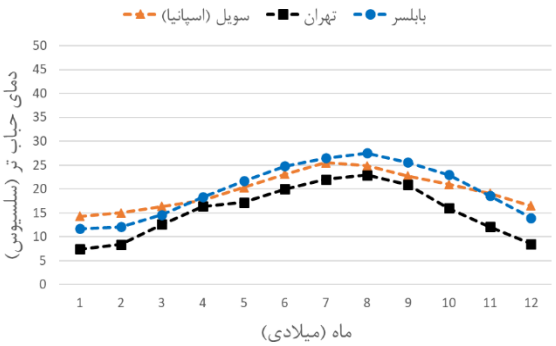
شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب دمای طراحی حباب خشک و تر بین شهرهای سویل، بابلسر و تهران را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود دماهای خشک نزدیک به شهر تهران و دمای تر نزدیک به شرایط اقلیمی بابلسر است.



شکل ۲- مقایسه دمای طراحی حباب خشک بین سویل، بابلسر و تهران.

۲-۴-نتایج شبیه‌سازی

با توجه به اطلاعات ورودی، بار سرمایشی در ساعات مختلف ماه‌های گرم سال محاسبه گردید. شکل (۴) بار سرمایشی بیشینه که در ماه آگوست (مرداد-شهریور) اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. بر این اساس بیشینه بار در ساعت ۱۵ به میزان ۱۰۷۵ کیلووات معادل ۳۰۵ تن تبرید محاسبه شد. کل انرژی سرمایشی مورد نیاز در یک روز معادل سطح زیر نمودار شکل ۴ و به میزان ۸۸۰۰ کیلووات ساعت می‌باشد. با فرض این‌که بارهای سرمایشی نیمی از مصارف سالانه این ساختمان را تشکیل می‌دهند، رده مصرف انرژی این ساختمان بر اساس استاندارد ملی ۱۴۲۵۴، C برای ساختمان خصوصی و E برای ساختمان دولتی است. لازم به ذکر است گرچه آمار دقیقی در دسترس نمی‌باشد اما در منابع مختلف [۱۵ و ۱۶]، سهم بارهای سرمایشی به کل مصارف سالیانه در اقلیم‌های گرم و بسیار گرم از ۳۰ تا ۷۰ درصد برآورد شده است.



شکل ۳- مقایسه دمای طراحی حباب تر بین سویل، بابلسر و تهران.

۳-انتخاب سامانه ذخیره‌ساز یخ

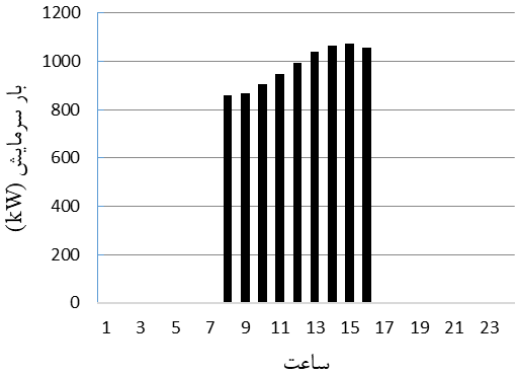
بر اساس بار سرمایشی برآورد شده در بخش‌های پیشین سیستم ذخیره‌سازی یخ انتخاب خواهد شد. در سیستم

ذخیره‌سازی یخ، ظرفیت شبانه (زمان یخ‌سازی) ۶۵٪ مقدار روزانه (سرمایش مستقیم) در نظر گرفته شده است. در سامانه بدون ذخیره‌سازی یخ ظرفیت چیلر باید برای تأمین بار سرمایش بیشینه طراحی (شکل ۴) انتخاب گردد. در صورتی که از سیستم ذخیره‌سازی یخ استفاده شود، طراحی ظرفیت چیلر باید به نحوی باشد که با اعمال ضریب ظرفیت شبانه بر اساس راهبرد استفاده شده برای ذخیره‌سازی، بار سرمایشی کل شبانه روز تأمین گردد.

راهبردهای متعددی برای استفاده از سیستم ذخیره‌سازی یخ قابل اعمال است. در مطالعه حاضر دو راهبرد رایج کامل و جزئی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در ادامه این راهبردها معرفی می‌گردند.

۳-۱-راهبرد ذخیره‌سازی کامل

ساده‌ترین رویکرد، از لحاظ انتخاب و کاربرد، ذخیره‌سازی کامل است. راهبرد کامل به معنی صفر شدن بار چیلر در بازه زمانی مورد نظر و استفاده کامل از سرمای ذخیره‌سازی شده جهت تأمین سرمایش مورد نیاز است. بنابراین همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است در این راهبرد چیلر زمانی که هیچ بار سرمایشی وجود ندارد (ستون‌های آبی رنگ) جهت تأمین کل سرمایش مورد نیاز در زمان پیک بار (ستون‌های زرد رنگ) یخ‌سازی انجام می دهد. در این راهبرد برای ساختمان مورد مطالعه، لازم است چیلر ساعات غیر کاری (به مدت ۱۵ ساعت) را برای تهیه میزان یخ مورد نیاز برای تأمین بار سرمایش در ساعات کاری تأمین نماید که توان سرمایش مورد نیاز حدود ۶۰۰ کیلووات می‌باشد.

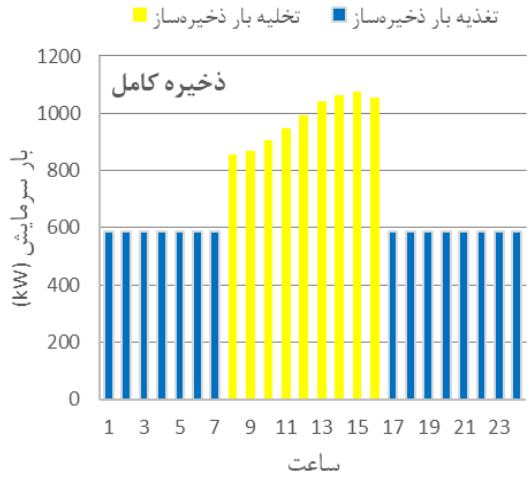


شکل ۴- بار سرمایشی ساختمان مفروض در ماه آگوست.

۳-۲-راهبرد ذخیره‌سازی جزئی

در راهبرد جزئی و به منظور پیک‌سایی، بخشی از بار پیک از طریق سرمای ذخیره شده و مابقی از سیستم متعارف تأمین می‌شود. بر این اساس در راهبرد ذخیره‌سازی جزئی، چیلر در ساعات پیک بار شبکه (یا ساعات مورد نظر جهت کاهش مصرف) با ظرفیت پایین‌تر از توان مورد نیاز کار می کند (ستون‌های سبز در شکل ۶) و مابقی توان از طریق یخ ذخیره‌شده (ستون‌های آبی) تأمین می‌شود.

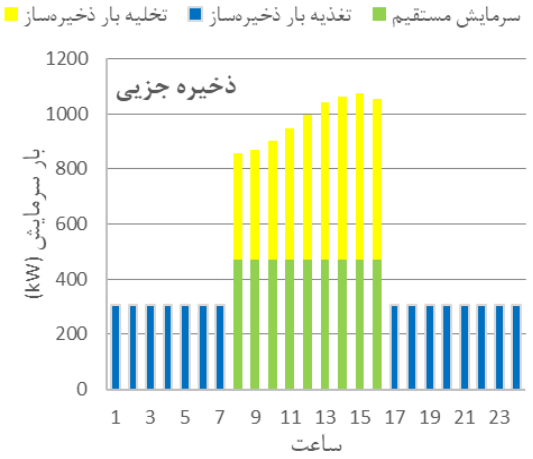
بر مبنای این راهبرد برای ساختمان مورد مطالعه، چیلر در حدود ۴۷۰ کیلووات ظرفیت سرمایش مستقیم داشته و لازم است در ساعات غیرکاری توان سرمایش حدود ۳۰۰ کیلووات را به صورت یخ برای پیک‌سایی ذخیره نماید. بر اساس شکل‌های (۵) و (۶) و با توجه به توضیحات ارائه شده، در جدول ۳ نتایج انتخاب سامانه‌ها بر اساس راهبرد متعارف، ذخیره‌سازی کلی و ذخیره‌سازی جزئی ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین ظرفیت چیلر در حالت متعارف و سپس در حالت ذخیره‌سازی کامل می‌باشد. با این حال لازم به ذکر است که در حالت متعارف نیازی به تانک‌های ذخیره و چیلرهای زیرصفر نمی‌باشد و بنابراین در حالت کلی قیمت سامانه بر واحد ظرفیت کمتر از قیمت سامانه سرمایش با واحد ذخیره‌ساز است. این موضوع در بخش بعدی مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت. علاوه بر این بدیهی است که میزان انرژی سرمایشی ذخیره‌سازی شده در راهبرد ذخیره کامل بسیار بیشتر (نزدیک به ۱۰۰ درصد) از این انرژی در راهبرد ذخیره جزئی است.



شکل ۵- بار سرمایش در حالت تغذیه و تخلیه سیستم ذخیره‌ساز یخ در راهبرد ذخیره کامل.

لازم به ذکر است یکی از محاسن انتقال بار از پیک روزانه به شب افزایش کارایی چیلرها به دلیل کاهش دمای محیطی در ساعات شب است. بنابراین در حالت استفاده

شبانه توان واقعی سیستم به توان اسمی آن نزدیک‌تر خواهد بود.



شکل ۶- بار سرمایش در حالت تغذیه و تخلیه سیستم ذخیره‌ساز یخ در راهبرد ذخیره جزئی.

جدول ۳- انتخاب نوع سامانه در راهبردهای مختلف.

نوع سامانه	بار سرمایش طراحی (kW)	مجموع تن نامی چیلر(ها) (RT)	انرژی ذخیره‌سازی (kWh)
متعارف	۱۰۷۵	۵۰۰	۰
ذخیره کامل	۹۰۳	۴۴۰	۸۸۰۸
ذخیره جزئی	۴۷۰	۲۰۰	۴۵۸۰

۴-ارزیابی اقتصادی استفاده از سامانه ذخیره‌سازی یخ

به منظور ارزیابی بار اقتصادی التزام به مقررات جدید مبحث ۱۹ (در صورت تصویب نهایی)، لازم است هزینه مازاد ناشی از اجرای ذخیره‌ساز یخ در برابر صرفه‌جویی ناشی از انتقال بار به ساعات میان‌باری و کم‌باری بررسی و تحلیل شود. بدین منظور متوسط هزینه اجرای سیستم متعارف (بدون واحد ذخیره‌سازی سرمایش) تهویه مطبوع، سیستم با ذخیره‌سازی کامل و سیستم با ذخیره‌سازی جزئی (مطابق مشخصات ذکر شده در جدول ۳) در بهار سال ۱۳۹۹ با استعلام از سازندگان داخلی برآورد گردیده و نتایج در جدول ۴ آورده شده است. همچنین بر اساس نوع چیلر انتخاب شده در جدول ۳ مصارف هر یک از این سیستم‌ها نیز در جدول ۴ آمده است.

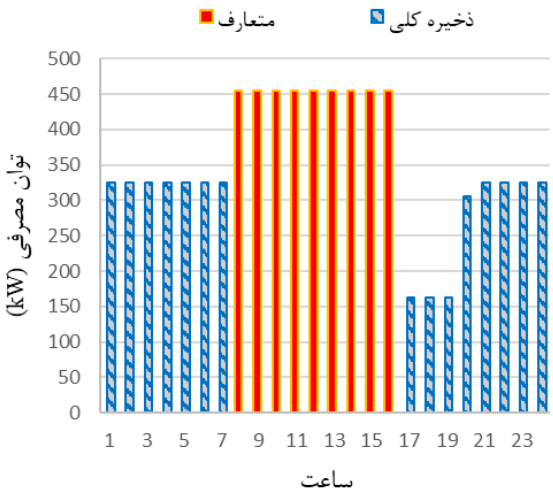
شکل (۷) و شکل (۸) جزئیات توان مصرفی سیستم متعارف، سیستم با ذخیره‌سازی کامل و سیستم با ذخیره‌سازی جزئی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است در سیستم متعارف از ۴ چیلر با توان نامی ۱۲۵ تن، در سیستم با ذخیره‌سازی کامل از ۴ چیلر با توان نامی ۱۱۰ تن و در سیستم ذخیره‌سازی جزئی از چهار چیلر ۵۰ تن استفاده شده است. همچنین فرض شده است که در سیستم متعارف امکان کنترل هوشمند وجود نداشته و بنابراین چیلر همواره با توان حداکثری خود در حال کار است. این در حالی است که در سیستم‌های ذخیره‌سازی کامل امکان پایش هوشمند وجود داشته و چیلرها می‌توانند با ظرفیت ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ نیز عمل کنند. بر این اساس در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که در برخی از ساعت‌ها توان مصرفی برق کمتر از توان بیشینه است. بر اساس نتایج نمایش داده شده در این دو شکل با بکارگیری سامانه ذخیره کامل، مصارف برق در حدود ۷٪ افزایش خواهد یافت، با این حال این مصارف عمدتا در ساعات کم‌باری و میان‌باری خواهد بود. با بکارگیری سامانه ذخیره جزئی مصارف برق در حدود ۱۶ درصد کاهش خواهد یافت.

جدول ۴- هزینه و مصارف برق سامانه‌ها با راهبردهای مختلف.

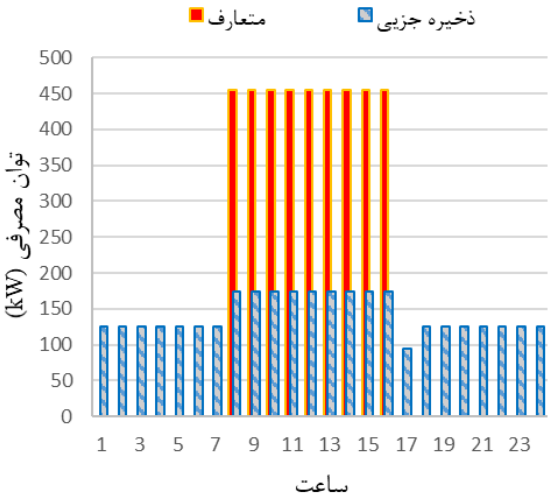
نوع سامانه	برآورد قیمت سامانه (میلیون ریال)	توان بیشینه مصرفی (kW)
متعارف	۲۹۹۰۰	۴۵۵
ذخیره کامل	۴۸۶۰۰	۳۲۵
ذخیره جزئی	۲۷۷۰۰	۱۷۴

به منظور برآورد میزان صرفه‌جویی ناشی از پیک‌سایی سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ، در تمامی ماه‌های گرم سال، مدت ساعات کم‌باری ۷ ساعت در نیمه شب، ساعات اوج‌بار ۶ ساعت از ۱۲ ظهر به بعد و همچنین میان‌باری در ساعات دیگر روز (۱۱ ساعت باقیمانده) فرض شده است. علاوه بر این، فرض شده است که بهای تعرفه پایه ۱۰۰۰ ریال در ساعات میان‌باری، بهای کم‌باری نصف این مبلغ (۵۰۰ ریال) و بهای برق در اوج‌بار دو برابر (۲۰۰۰ ریال) می‌باشد. لازم به ذکر است متوسط تعرفه میان‌باری بخش عمومی در سال ۱۳۹۹ به استناد مصوبه شماره ۹۹/۱۰۹۵۸/۲۰/۱۰۰ وزارت نیرو ۹۲۰ ریال می‌باشد.

با این فرضیات نتایج نشان می‌دهد که علیرغم افزایش ۷٪ مصرف برق در سیستم ذخیره کامل، هزینه انرژی ۴۹٪ کاهش یافته است. در سامانه ذخیره جزئی این کاهش هزینه در حدود ۳۸٪ می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه توان مصرفی سیستم ذخیره‌سازی کامل با سیستم متعارف.



شکل ۸- مقایسه توان مصرفی سیستم ذخیره‌سازی جزئی با سیستم متعارف.

برآورد بار اقتصادی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز در ساختمان نمونه مورد بررسی، مستلزم اطلاع از هزینه اجرای سیستم و میزان صرفه‌جویی سالانه است. اطلاعات مربوط به میزان سرمایه‌گذاری لازم در جدول ۴ آمده است. جهت محاسبه میزان صرفه‌جویی سالانه فرض شده است که تعداد ماه‌هایی که بار سرمایشی قابل توجه است ۵ ماه بوده که از این ۵ ماه، دو ماه بار سرمایشی بیشینه طراحی (۶۰ روز)، دو ماه ۹۰ درصد بار بیشینه و یک ماه ۸۰ درصد بار بیشینه را خواهد داشت. این میزان بار سرمایشی مفروض تقریبا معادل ۸۰٪ کل بار سرمایش بیشینه ماهیانه (حادترین روز ماه) محاسبه شده توسط نرم افزار کریر در بازه ۹ ماهه‌ی مارس تا نوامبر است که با توجه به در مدار نبودن همیشگی سیستم سرماساز در نقطه طراحی یک فرض مهندسی می‌باشد. با این فرضیات، شکل (۹) بازگشت سرمایه مازاد انجام شده بر اساس نرخ تعرفه پایه از ۱۰۰۰ ریال تا ۵۰۰۰ ریال را نشان می‌دهد. زمان بازگشت سرمایه از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$PP = \frac{I}{A} \qquad (۱)$$

در این رابطه **PP** زمان بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه مازاد، I میزان سرمایه‌گذاری مازاد و A میانگین میزان صرفه‌جویی سالیانه ناشی از بکارگیری سامانه ذخیره‌ساز یخ است.

از جدول ۴ بدیهی است که با توجه به سرمایه‌گذاری کمتر مورد نیاز برای سامانه ذخیره‌سازی جزئی نسبت به سیستم متعارف در این ساختمان نمونه، اجرای سیستم ذخیره جزئی از نظر اقتصادی حتی از سیستم متعارف نیز مطلوب‌تر است. بنابراین اجرای الزام مبحث ۱۹ هیچگونه هزینه مازادی را برای یک ساختمان در حال ساخت در بر ندارد (زمان بازگشت هزینه مازاد برابر صفر است). بدیهی است که برای یک ساختمان تجهیزشده و در حال بهره‌برداری این موضوع صدق نخواهد کرد.

در صورت بهره‌گیری از ذخیره‌سازی کامل نتایج به صورت قابل توجهی متفاوت خواهد بود. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، با فرض تعرفه پایه ۱۰۰۰ ریال، دوره بازگشت سرمایه بیش از ۵۰ سال خواهد بود. بنابراین راهبرد ذخیره‌سازی تأثیر بسیار تعیین‌کننده‌ای در میزان بار اقتصادی اجرای الزامات پیش‌نویس مبحث ۱۹ خواهد داشت. نکته تأثیرگذار دیگر نوع کاربری ساختمان است. در کاربری مورد مطالعه نیاز سرمایشی محدود به ساعات مشخصی از روز است، به همین خاطر این امکان وجود دارد که در ساعات دیگر شبانه‌روز چیلر واحدی جهت پیک‌سایی به ذخیره‌سازی یخ بپردازد. چنین امری برای کاربری‌هایی با بار سرمایشی شبانه‌روزی و یا بسیار طولانی امکان پذیر نیست. به عنوان مثال در کاربری مسکونی در مناطق بسیار گرم شبیه اقلیم شهر اهواز بارهای سرمایشی شبانه‌روزی مانع استفاده از یک چیلر واحد خواهد شد چرا که در همه ساعات شبانه‌روز نیاز به سرمایش مستقیم وجود دارد. این امر باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و در نتیجه افزایش زمان بازگشت سرمایه خواهد شد. با شبیه‌سازی ساختمان با شرایط کاملا مشابه ساختمان مطالعه شده در این تحقیق و تغییر کاربری آن به مسکونی، زمان بازگشت سرمایه به ۳۷ سال افزایش خواهد یافت (شکل ۹).

شکل ۹- حساسیت زمان بازگشت سرمایه به تغییرات نرخ تعرفه پایه برای سیستم ذخیره‌سازی کامل و جزئی.

شکل (۹) همچنین نشان می‌دهد که با ۵ برابر شدن تعرفه پایه (۵۰۰۰ ریال)، زمان بازگشت سرمایه برای راهبرد ذخیره‌سازی کامل به حدود ۱۰ سال کاهش می‌یابد.

۵-نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور بررسی ابعاد اقتصادی بهره‌گیری از سیستم ذخیره‌سازی یخ مطابق الزامات جدید پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ابتدا بار سرمایشی یک ساختمان نمونه با کاربری آموزشی در اقلیم شهر اهواز توسط نرم‌افزار کریر شبیه‌سازی شد. بر اساس داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی دو نوع راهبرد ذخیره‌سازی کامل و جزئی با سامانه متعارف مقایسه و برای هر سه نوع سیستم، چیلر مربوطه و هزینه‌های اجرا برآورد شد. نتایج نشان داد که در شرایط ساختمان مورد مطالعه، ذخیره‌سازی جزئی سرما کاملا قابل اجرا و اقتصادی است اما استفاده از راهبرد ذخیره کامل، بازگشت سرمایه را به بیش از ۵۰ سال افزایش خواهد داد.

با بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که بار اقتصادی اجرای الزامات جدید در صورت تایید نهایی بسیار به نوع راهبرد ذخیره‌سازی، کاربری و اقلیم وابسته خواهد بود. در اقلیم‌های بسیار گرم و/یا بسیار مرطوب در صورتی که نوع کاربری پیوسته (استفاده شبانه‌روزی) و یا بسیار طولانی را ضروری سازد، در این حالت بدون اعمال مشوق‌های اقتصادی امکان اقتصادی شدن اجرای این الزامات وجود نخواهد داشت و بنابراین این الزامات هزینه ساخت و ساز ساختمان‌ها با حداقل بار سرمایشی عنوان شده در جدول ۱ را افزایش خواهد داد.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای امیر فتاحی و سرکار خانم ساناز اکبرزاده به دلیل همکاری در شبیه‌سازی و آنالیز داده‌ها تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

[1] S. Copiello, "Achieving affordable housing through energy efficiency strategy" Energy Policy ,Vol. 85, pp. 288 – 298, 2015.

[۲] امید گزانه و محمد علی بهشتی‌نیا، "شبیه سازی و تحلیل فنی اقتصادی آبگرمکن خورشیدی برای کاربری مسکونی"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۰۷–۱۱۹.

[۳] کریم مقصودی مهربانی، عبدالله مهرپناهی و رامین علوی، "مدل‌سازی ترکیب سیکل تبرید جذبی آمونیاکی متناوب و پیوسته برای کاربرد در سردخانه با قابلیت استفاده از توان خورشیدی"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۴۱۵–۴۲۸.

[۴] سید علیرضا ذوالفقاری، مهران سعادتی نسب و الهه نوروزی جاجرم، "بررسی تأثیر استفاده از نماهای دوپوسته سبز بر مصرف انرژی ساختمان‌های بلند مرتبه در شرایط اقلیمی تهران"، مدل‌سازی در مهندسی. ۵ دوره ۱۷، شماره ۵۶، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۵۱–۶۱.

[۵] محمد علیزاده، میثم جعفری نوکندی و یامین سلطان مرادی، "مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۱۵–۲۲۶.

[6] S. Pintaldi, C. Perfumo, S. Sethuvenkatraman, S. White and G. Rosengarten, "A review of thermal energy storage technologies and control approaches for solar cooling", Renew Sustain. Energy Rev., Vol. 41, pp. 975 – 995, 2015.

[7] H. Mehling, and L. F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM", Springer, 2008.

[8] L.F. Cabeza, "Thermal Energy Storage", Sayigh, A. (Ed.) Comprehensive Renewable Energy, Elsevier Science and Technology, 2012.

[9] B. Arcuri, C. Spataru, and M. Barrett, "Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil", Sustainable cities and society, Vol. 29, pp. 178-192, 2017.

[10] S. Sanaye, and M. Hekmatian, "Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes", International Journal of Refrigeration, Vol. 66, pp. 181–197, 2016.

[۱۱] محمد ابراهیم سربندی فراهانی، "امکان‌سنجی بکارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما در ایران"، پانزدهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۸.

[۱۲] کمیته تخصصی مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، پیش‌نویس غیر قابل استناد ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۸، http://news.mrud.ir/news/72878/، آخرین دسترسی مرداد ۱۳۹۹.

[۱۳] سید مجتبی طباطبایی، "محاسبات تاسیسات ساختمان"، روزبهان، تهران، ۱۳۸۱.

[14] P. Zangheri, R. Armani, M. Pietrobon, L. Pagliano, J. Kockat, C. Rohde, and F. Isi, "Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU", http://www.entranze.eu (accessed July 18, 2020), 2014. [14]

[۱۵] قمر حلیمی و احمدرضا توکلی، "مطالعه و بررسی تأثیر بار سرمایش در پیک مصرف برق کشور"، اولین کنگره ملی طراحی نوین مهندسی با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست، ۱۳۹۴.

[۱۶] فرشید دانشور و حسین معرفی، "بررسی بار سرمایشی و سهم آن در پیک بار استان هرمزگان"، هشتمین کنفرانس سراسری شبکه‌های توزیع نیروی برق، ۱۳۸۲.