

تکنولوژی‌های مبتکرانه برای بهبود انرژی ساختمان‌های تاریخی:

یک صحت‌سنجی آزمایشگاهی

چکیده

بازده انرژی^۱ ساختمان‌های بازسازی شده^۲ نیز باید مطابق با آیین‌نامه‌های موجود افزایش یابند؛ اگر چه در مورد ساختمان‌های تاریخی، ضوابط محافظتی به منظور جلوگیری از تداخلات موثر معمول انرژی در بخش پوشش^۳ ساختمان، بسیار سخت‌گیرانه است. در نتیجه، باید سیستم‌های گرمایشی، هوارسانی و تهویه مطبوع^۴ و راهکارهای کنترلی در ساختمان‌های تاریخی بیش‌تر بهبود یابند؛ زیرا آن‌ها تنها وسایل مناسب برای بازده انرژی هستند. این مقاله، مجموعه‌ای از تکنولوژی‌های به کار گرفته شده را در قالب مربوط به بازسازی یک ساختمان تاریخی در مرکز ونیز^۵ با هدف کاهش اتلاف انرژی و افزایش راحتی ساکنین ارائه می‌نماید. بازسازی معمولاً شامل استفاده از تکنولوژی‌های پمپ حرارتی آب سطحی^۶، هوارسانی مورد نیاز کنترل شده^۷ و تولید سه‌گانه^۸ می‌باشد. به علاوه، این مقاله مقادیر انرژی ذخیره شده را با مقایسه‌ی اتلاف انرژی واقعی در مقابل شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌های مجهز برای پیکربندی‌های سیستم مبنای HVAC نشان می‌دهد. برای این منظور، نویسنده از نصب سیستم پر کاربرد مدیریت ساختمان بهره برده‌اند. این سیستم قادر است تا اطلاعات دقیق در مورد سرعت‌های جریان (هوا و آب)، دما و رطوبت را برای تمام ابزار کلیدی سیستم HVAC ضبط و ثبت نماید. ساختمان مورد استفاده به عنوان نمونه‌ی مطالعاتی به دلیل مصرف شدید مورد انتظار انرژی و نیز ضوابط محافظتی سخت‌گیرانه حاکم بر آن، بسیار قابل توجه است. مقادیر ذخیره شده‌ی انرژی عمده‌ی کلی در حالت خاص برابر با ۳۶ درصد در مقایسه با یک سیستم مبنای سنتی HVAC محاسبه شده است.

۱. هدف تحقیق

این تحقیق سعی دارد تا با یک بازسازی دلپذیر و خوشایند که تنها از تداخلات بین سیستم‌های گرمایشی/سرمایشی و انرژی و بدون اصلاح پوشش ساختمان استفاده می‌کند، سبب ذخیره‌ی انرژی در یک ساختمان تاریخ مرتبط در مرکز ونیز گردد. مجموعه‌ی تکنولوژی‌های مورد استفاده در این بازسازی ممکن است در بسیاری از موارد دیگر نیز به طور موثری استفاده شود و این امکان را برای مدیران انرژی ساختمان فراهم آورد.

¹ Energy efficiency

² Refurbished buildings

³ Envelope

⁴ Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC)

⁵ Venice

⁶ Surface Water Heat Pump (SWHP)

⁷ Demand Controlled Ventilation (DCV)

⁸ Trigeneneration

تا به مقادیر عمده ذخیره‌ی انرژی مرتبط دست یابند، که در نمونه‌ی موجود به ۳۶ درصد رسید. همچنین نمونه‌ی موجود، به دلیل سیستم پر کاربرد مدیریت ساختمان، یک مرجع مرتبط است. این سیستم به نویسندگان اجازه می‌دهد تا یک توصیف کامل را از رفتار واقعی هر وسیله‌ی موجود در زنجیره‌ی تولید/ توزیع/ استفاده از انرژی داشته باشند.

۲. مقدمه

امروزه، دستیابی به یک کاهش قابل توجه در اتلاف انرژی ساختمان، یک چالش بزرگ است که شرایط اضطراری واقعی جهانی برای مراقبت از منابع طبیعی و محافظت از محیط با آن روبه‌رو هستند. ساختمان‌ها موجب ۴۸ درصد از انرژی مصرفی در مقیاس جهانی هستند و از طریق انرژی مصرفی در انتشار ۱۹ درصد از گاز کربن دی اکسید مشارکت می‌نمایند (۶/۴ درصد انتشار مستقیم و ۱۲ درصد انتشار غیر مستقیم) [۱ و ۲]. در دسامبر سال ۲۰۰۹ میلادی، اتحادیه‌ی اروپا با وضع اهداف قانون ۲۰-۲۰-۲۰، کاهش ۲۰ درصدی مصرف سوخت‌های فسیلی را تا سال ۲۰۲۰ میلادی از طریق فعالیت‌های کارآمد انرژی، افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر تا ۲۰ درصد و کاهش اثر گلخانه‌ای انتشار گاز (به ویژه گاز دی اکسید کربن) تا ۲۰ درصد، الزام کرد [۳].

به منظور دستیابی به این نتایج، کار بر روی ساختمان‌های موجود دارای اهمیت است. در حالت خاص استفاده‌ی دوباره از ساختمان‌های موجود در صورتی که هیچ روش هدفمند و اصولی به منظور در نظر گرفتن مواردی مانند نوع ساختمان (خصوصی یا عمومی)، وجود محدودیت‌های تاریخی، هنری، فرهنگی، اقتصادی و حضور بازیگران به عنوان افراد مشهور، معماران، مورخان معماری، طراحان و مالکان مورد استفاده قرار نگیرد، ممکن است منجر به مشکلاتی گردد [۴-۷]. به همین دلیل، در نظر گرفتن ساختمان‌ها بر اساس ضوابط محافظتی در چارچوب رشد پایدار^۹ دشوار می‌باشد. مداخلات در این نوع خاص از ساختمان‌ها باید الزامات جدید را بدون تغییر ارزش تاریخی خاص سازه، ارضا نماید [۸-۱۱].

امروزه راهکارهای انرژی پایدار در مورد بازسازی ساختمان معمولاً شامل عایق‌بندی، کنترل تغییر هوا، روشنایی و کارکردهای سیستم HVAC می‌باشد. اما کسی که در مورد محله‌های تاریخی یا در شهرهایی با تعداد قابل توجه از ساختمان‌های تاریخی مانند ونیز کار می‌کند؛ می‌داند که معمولاً تغییر مشخصات پوششی و ظاهری برای توصیه‌های محافظتی غیر ممکن است [۱۲]. در نتیجه، مقدار انرژی مورد نیاز با توجه به نشت از طریق پوشش به صورت تصاعدی رشد می‌کند و مصرف فصلی در مقایسه با توصیه‌ی مدرن برای ذخیره‌ی انرژی، به شدت افزایش می‌یابد [۱۳ و ۱۴]. در این حالت، قانون معمولاً در مورد کاربرد واقعی مقررات انرژی امکان استثنا قائل شدن را می‌دهد [۱۵]. راهنماهای استاندارد EN16883 اروپا، یک هدف اساسی با عنوان "کاهش انرژی مورد نیاز و انتشار گاز گلخانه‌ای بدون اثرات غیر قابل قبول بر میراث محیط ساخت موجود به

^۹ Sustainable growth

وسیله‌ی روش اصولی" دارند و تاکید می‌نمایند که "نیاز به بهبودهای انرژی در تمام ساختمان‌های تاریخی از قبل در نظر گرفته نمی‌شود". به نظر می‌رسد پاسخ به یک سوال بسیار ضروری است: تغییر عملکردهای ساختمان‌های تاریخی به شکل‌های مدرن (موزه‌ها، مدارس و منازل مسکونی) ارزش دارد یا با توجه به ارزش تاریخی بی‌همتای آن‌ها، بهتر است این ساختمان‌ها را بدون تغییر و به همان شکل باقی بگذاریم؟ [۱۷ و ۱۸]. به نظر می‌رسد راه‌حل دوم می‌تواند ساده‌ترین راه باشد اما عدم استفاده از یک ساختمان، پیامدهای منفی به دنبال دارد: احتمال متروکه شدن زوال مورد انتظار، با توجه به هزینه‌های زیاد تعمیرات [۱۹ و ۲۰]. در عوض افزایش طول عمر ساختمان با تغییر کاربری آن‌ها از طریق کاهش آلودگی و مصرف انرژی ناشی از تولید مصالح، حمل و نقل و استفاده در مقایسه با ساختن یک ساختمان جدید، سهم قابل توجهی در پایداری خواهد داشت [۲۱ و ۲۲]. برای دستیابی به استفاده‌ی مجدد با پایداری بیشتر، طراحی صحیح سیستم کارگاه ساختمانی به معنی یافتن راه‌حلهایی که به منظور کاهش احتمال بیشتر شدن نیاز انرژی نسبت به ساختمان‌های جدید، قادر به حل شرایط بحرانی هستند، مهم است [۲۳ و ۲۴]. یک تمرکز ویژه باید بر روی بازده سیستم HVAC در میان راه‌حل‌های سازگار با توصیه‌های محافظتی در نظر گرفته شود [۲۵-۲۷].

این مطالعه، معرفی تکنولوژی‌های مبتکرانه‌ی HVAC را مورد تحلیل قرار می‌دهد. این تکنولوژی‌ها با وجود مشخصات بازده انرژی بالا، برای نصب در ساختمان‌های تاریخی نیز مناسب هستند. مشخصات و کارایی آن‌ها از طریق اشاره به یک نمونه‌ی مطالعاتی واقعی توصیف شده‌اند.

۳. روش کار

۳.۱. صحت‌سنجی آزمایشگاهی در یک بافت تاریخی نمونه

سیستم‌های جدید HVAC معمولاً برای بهسازی^{۱۰} ساختمان توصیه می‌شوند. طراحی معمولاً با پیش‌بینی‌های عملکردی تنها بر اساس مدل‌سازی و شبیه‌سازی با سطوح مختلف دقت همراه است اما ارزیابی‌های دقیق درباره‌ی رفتار سیستم بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی در طی مدیریت ساختمان به ندرت انجام یافته است. اگر چه تنها این نوع از تحلیلی آزمایشگاهی می‌تواند صحت سیستم توصیه شده را تایید کند. بنابراین در این مقاله، یک رویکرد روش‌شناختی^{۱۱} شامل ارائه‌ی تکنولوژی‌های منتخب با ذکر کاربری واقعی آن‌ها به صورت دقیق می‌باشد. همراهی این ارائه با توصیف انتخاب‌های طراحی به کار گرفته شده برای نصب آن‌ها و بیش‌تر با استفاده از نتیجه‌ی بررسی و نظارت طولانی مدت می‌تواند عملکرد انرژی واقعی به دست آمده را بسنجد.

¹⁰ Retrofit

¹¹ Methodological

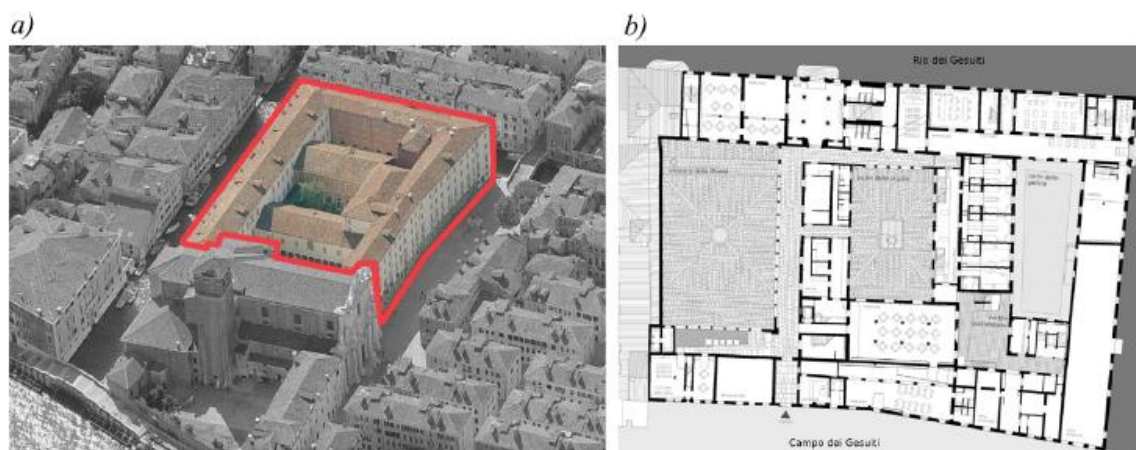
نمونه‌ی مطالعاتی، بازسازی قسمت جنوبی صومعه‌ی پیشین حاملان صلیب^{۱۲} به وسیله‌ی دانشگاه Iuav ونیز به منظور تحقق محوطه‌ی دانشگاه با ماحت حدود ۱۰۰۰۰ متر مربع می‌باشد.

همانطور که در شکل (a۱) نشان داده شده است؛ این مجموعه در منطقه‌ی کانارجیوی شهر ونیز قرار گرفته است و از غرب به Campo dei Gesuiti، از شرق به کانال Rio dei Gesuiti (شکل (b۱))، از شمال به کلیسای سانتا ماریا^{۱۳} و از جنوب به یک کانال کوچک‌تر مجاور است.

از زمان ساخت آن در سال ۱۱۵۰ تا روزهای اخیر، این صومعه سرنوشت‌های مختلفی داشته است.

این تغییرات از زمان استفاده‌ی اولیه به دستور حاملان صلیب در نظر گرفته شد: یک مکان ترکیبی برای برادری مذهبی^{۱۴} و پناهگاهی برای مسیحیان و جنگجویان صلیبی در راهشان به سرزمین مقدس^{۱۵}. پس از تملک یسوعیان^{۱۶} در سال ۱۶۵۷، صومعه تا دستور منع مذهبی در سال ۱۷۷۳ به عنوان کالج/ مدرسه مورد استفاده قرار گرفته است. تا دوره‌ی مربوط به ناپلئون، قسمت جنوبی این ساختمان مذهبی تا سال ۱۹۹۰ به عنوان سربازخانه‌ها استفاده و به طور کامل از کلیسا جدا شده است.

این فعل و انفعالات هرگز سازه‌ی اصلی را تحریف نکرده است (شکل (۲)). خوابگاه‌های مذهبی قبلی به اتاق‌خواب‌های سربازان و فضاهای عمومی صومعه در طبقه‌ی هم‌کف به فضاهای عمومی و خدمات برای قفسه‌های نوشیدنی‌ها تبدیل شدند. بنابراین، با توجه به نیازهای توصیه‌های محافظتی، این مشخصات فضایی در طرح بازسازی حفظ شده است: خدمات کمکی در طبقه‌ی هم‌کف، محل‌های مسکونی در طبقات بالاتر.



شکل ۱ نماهای مجموعه‌ی صومعه a: یک تصویر هوایی از قسمت جنوبی (با رنگ قرمز مشخص شده است)

b: نمای پلان طبقه‌ی هم‌کف

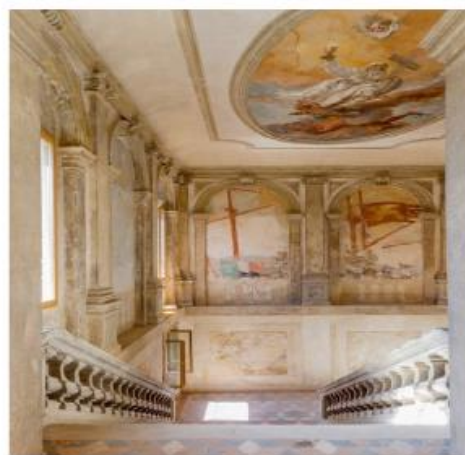
¹² Crucifer Convent

¹³ Santa Maria

¹⁴ Devotional confraternity

¹⁵ Holy Land

¹⁶ Jesuits



شکل ۲ خانقاه اصلی و یک راه پله به طبقه اول

در دیتیل، ۱۷۷ آپارتمان ۲ تخته همراه با حمام و دستشویی، آشپزخانه و فضای مطالعاتی مستقل برای دانشجویان فراهم شده بود. گاهی، آن‌ها نیم‌آشکوب^{۱۷} نیز داشتند. ۳۲ واحد اضافی بزرگ‌تر برای اساتید میهمان اختصاص یافته‌اند.

در این پروژه، توجه ویژه بر فضاهای مشخص که به وسیله‌ی نواحی اختصاص یافته که به صورت عمومی و از بیرون به صورت مستقیم قابل دسترسی هستند (مانند کافه، رستوران، اتاق ویدئو، اتاق بازی) متمرکز شده است. به علاوه، امکاناتی از جمله اتاق جلسه^{۱۸}، اتاق‌های مطالعه، کتابخانه، باشگاه ورزشی و رختشویی به میهمانان اختصاص یافته است [۲۸].

۲.۳. ترکیب معماری سیستم گرمایشی، هوارسانی و تهویه مطبوع (HVAC)

همانطور که در شکل (b۱) نشان داده شده است، در این مجموعه، دو خانگاه در سمت چپ وجود دارد که هر دو با وجود یک چاه^{۱۹} در وسط متصل به یک آب‌انبار^{۲۰} زیرزمینی جمع‌کننده‌ی آب باران از حیاط خانگاه، مشخص شده‌اند. این سیستم قدیمی در یک شرایط مناسب است؛ لذا هیچ شبکه‌ی هیدرولیکی یا سیستم HVAC نمی‌تواند در زیرزمین در خانگاه نصب شود. در عوض در دو حیاط کوچک‌تر در سمت راست، عدم وجود بقایای تاریخی، امکان نصب وسایل تکنیکی را فراهم آورده است. در این حالت، یک اتاق زیرزمینی که تمام مساحت عریض‌ترین قسمت این دو حیاط را دربرمی‌گیرد، ساخته شد و پمپ حرارتی، اجزای جانبی مختلف و سیستم دفع فاضلاب^{۲۱} در آن قرار گرفته‌اند. همچنین تنها اتاق‌های فنی در برج بین دو حیاط

¹⁷ Mezzanine

¹⁸ Meeting room

¹⁹ Well

²⁰ Cistern

²¹ Sewage

مشاهده شدند (شکل (b۱)) که در طبقات مختلف، سایر سیستم‌های تولید انرژی نصب شده اند: جوشاننده‌ها و سیستم تولید سه گانه که در زیر همانند سیستم پمپاژ معمولی توصیف شده‌اند.

تمامی انتخاب‌های طرح توسط سرپرستی میراث معماری^{۲۲} تایید شده‌اند و حفاری^{۲۳}‌ها نیازمند یک نقشه‌برداری مقدماتی باستان‌شناسی^{۲۴} است. به لطف این نقشه‌برداری، یک بازشوی قدیمی (شکل (a۳)) در زیرزمین به سمت Rio dei Gesuitiwas کشف شد که تهیه‌ی محل آب‌گیری را برای پمپ حرارتی امکان‌پذیر کرد و در نتیجه مشکل منع ایجاد سوراخ‌ها در پوشش را برطرف نمود. در شکل (b۳)، یک طرح خلاصه از محفظه‌ای که نزدیک این سوراخ در دیوار پیرامونی برای ته‌نشینی^{۲۵} آب مخزن ساخته شده است، نشان داده شده است.

مداخله‌ی معماری به وسیله‌ی المان‌ها (دیوارها، فضاها یا فنی یا اضافی) که همواره به عنوان المان‌های اضافه قرار می‌گیرند و با توجه به تکنولوژی و مصالح و رنگ، قابل از سازه‌ی تاریخی متمایز هستند؛ مشخص می‌شود (شکل (۴)).

معیارهای ساختمان مسکونی، یک طراحی خطی ساده و مدرن دارد که با سبک قدیمی سازه‌ی تاریخی در تداخل نیست. ارتفاع هر طبقه معمولاً بیش از ۵ متر است که اجازه‌ی ایجاد نیم‌آشکوب‌ها را در محل‌های قرارگیری کابینت‌ها می‌دهد (شکل (۵)).

واحدهای پایانی HVAC از فن‌کوئل^{۲۶}‌ها و دمنده^{۲۷}‌های هوا تشکیل می‌شود که صحت تهویه‌ی مطبوع را تضمین می‌نمایند. واحدهای هواسازی در نواحی مختلف مجموعه توزیع و هر کدام از آن‌ها در اتاق زیرشیروانی^{۲۸} ساختمان مورد بحث نصب شده‌اند.

لوله کشی اصلی با بیش‌ترین تعداد فن‌کوئل‌های خدمت‌رسان آپارتمان‌ها در مبلمان‌های موجود در طول دیوارهای پیرامونی جاسازی شده‌اند (شکل (۵)). لوله‌کشی ثانویه برای اتاق‌های داخلی در سازه‌های جدید مانند دیوارهای تیغه‌بندی^{۲۹} داخلی یا طبقات نیم‌آشکوب‌ها وارد شده‌اند.

²² Superintendence of Architectural Heritage

²³ Excavation

²⁴ Archaeological

²⁵ Sedimentation

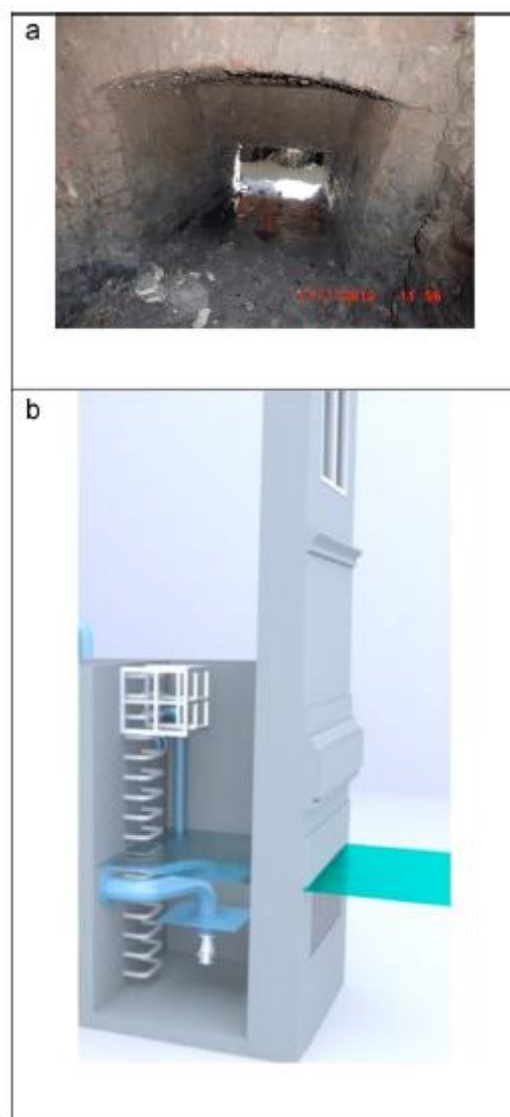
²⁶ Fan coil

²⁷ Diffuser

²⁸ Garret

²⁹ Partitions

حالت مشابه برای داکت^{۳۰}های ثانویه تهویه مطبوع وجود دارد که در آن داکت‌های اصلی با پنل‌های پوششی پنهان می‌گردند. در غیاب توصیه‌ی محافظتی در برخی نواحی از طبقه‌ی هم‌کف، لوله‌کشی و داکت‌های اصلی هوا در زیر کف‌سازی^{۳۱} نصب می‌گردند.



شکل ۳ مکش آب‌مخزن برای پمپ حرارتی a : بازشوی قدیمی b : یک تصویر خلاصه از مخزن ته‌نشینی

³⁰ Duct

³¹ Flooring



شکل ۴ یک راهروی داخلی

۳,۳. سیستم مدیریت ساختمان (BMS)

سطوح ساختمان و سیستم HVAC به طور کامل به وسیله‌ی سیستم مدیریت ساختمان تحت نظر قرار می‌گیرند. این سیستم یک واسط آسان را بین کنترل‌ها و مطابقت‌ها برقرار می‌نماید. علاوه بر این، سیستم مدیریت ساختمان تمام اطلاعات لازم برای ارزیابی عملکردی سایت ساختمان را همانند اطلاعات آب و هوا و نمودار مشخصه‌ی انرژی موردنیاز را در گام زمانی ۵ دقیقه‌ای ثبت و ضبط می‌نماید.

۴,۳. پمپ حرارتی آب سطحی (SWHP)

پمپ حرارتی وسیله‌ای است که می‌تواند گرما را در دمای پایین (منبع سرد) جذب کند و آن را به سطوحی با دمای بیش‌تر که برای کاربردهای حرارتی مناسب است، می‌رساند. سطوح حرارتی مطلوب، امکان ذخیره‌ی انرژی را در مقایسه با دیگ بخارهای سنتی فراهم می‌آورد. علاوه بر این وقتی که منبع سرد محیط بیرون از ساختمان (هوا، آب، زمین) است، حرارت به دست آمده بر اساس آیین نامه‌های بین‌المللی و به خصوص توصیه‌های اتحادیه‌ی اروپا به عنوان انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شود [۳]. بنابراین، پمپ حرارتی تبدیل به یک تکنولوژی انرژی تجدیدپذیر می‌شود که می‌تواند سهم قابل توجهی در بهره‌مندی از منابع این نوع از انرژی داشته باشد.

به همین دلیل نصب پمپ حرارتی با توجه به امکان موجود از طریق وجود آب سطحی به عنوان منبع سرد در آغاز مورد توجه قرار گرفت.

به منظور افزایش عملکرد پمپ حرارتی نصب شده به صورت تبادل حرارتی با آب مخزن از طریق ورودی/خروجی آب که در محل کانال مجاور با قسمت پشتی ساختمان قرار دارد (شکل b۱)، واحدهای پایانی HAVC به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که آب با دمای پایین بتواند آن را تامین کند (۴۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد در حالت حرارتی). پمپ حرارتی الکتریکی برگشت‌پذیر با منبع آب، دارای ظرفیت اسمی ۶۱۰ کیلو وات در حالت گرمایش و ۵۸۰ کیلو وات در حالت سرمایش هستند. سیستم مدیریت ساختمان، حالت عملگر فیلتر خودپاک‌کنندگی را که برای تصفیه‌ی اولیه^{۳۲}ی آب مخزن نصب می‌گردد، کنترل می‌کند. این فیلتر از مبدل‌های حرارتی دو صفحه‌ای تشکیل شده است که به منظور فراهم آوردن امکان تعمیر که به صورت متناوب کار می‌کنند و برای قطع جریان^{۳۳} آب مخزن از جریان پمپ حرارتی استفاده می‌شوند؛ در نتیجه از خطای مبدل‌های حرارتی درون پمپ جلوگیری می‌نمایند. در زمستان، حداقل دمای مورد قبول آب ورودی مخزن ۸ درجه سانتی‌گراد (خروجی: ۵ درجه سانتی‌گراد) با افت مناسب ۷ تا ۴ درجه سانتی‌گرادی به عنوان حداقل اختلاف دما در تبخیرکننده^{۳۴} است. این حالت از سطوح حرارتی بالا در تبخیرکننده، بازده پمپ حرارتی را افزایش می‌دهد و لزوم استفاده از مخلوط‌های ضد یخ که عملکرد پمپ حرارتی را با مشکل روبه‌رو می‌سازد؛ از بین می‌برد. در نهایت، وقتی که دمای آب مخزن کمتر از ۸ درجه سانتی‌گراد باشد، دیگ‌های بخار کمکی در نظر گرفته شده، انرژی گرمایی مورد نیاز را تامین می‌نمایند.

در حالت سرمایشی، حداکثر دمای قابل قبول آب مخزون ورودی مطابق با سطوح دمایی ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در دستگاه خنک‌کننده^{۳۵}، ۲۷ درجه سانتی‌گراد (خروجی: ۳۰ درجه سانتی‌گراد) است. در حقیقت، قوانین آیین‌نامه‌ای در مورد استفاده از آب سطحی، حداکثر افزایش دما را برابر با ۳ کلوین و حداکثر دمای خروجی را برابر ۳۰ درجه سانتی‌گراد در نظر می‌گیرد. در تابستان، وقتی این مقادیر بیش‌تر از حد گفته شده شوند، لازم است تا استفاده از آب مخزن متوقف گردد. در این رخداد، یک برج خنک‌کننده عملکرد مناسب چیلر^{۳۶}ها را تضمین می‌کند. پمپ حرارتی برگشت‌پذیر به منظور تامین نیاز منحصر به گرمایش/سرمایش طراحی می‌شود؛ با در نظر گرفتن این که نیاز آب گرم خانگی به وسیله‌ی بازگشت حرارت از CHP به کمک دیگ‌های بخار متراکم کننده تامین شده است.

۵.۳. سیستم هوا رسانی کنترل شده‌ی مورد نیاز (DCV)

در آپارتمان‌ها (شکل ۵)، واحدهای پایانی HVAC از فن‌کویل‌های جاساز شده در مبلمان و یک سیستم تهویه‌ی مطبوع کنترل شده با ورودی در اتاق اصلی و خروجی از سرویس‌های بهداشتی و حمام‌ها تشکیل می‌شود. سیستم مرکزی تهویه‌ی مطبوع، حرارت را از هوای خارج شده به منظور تصفیه‌ی اولیه‌ی هوای تازه

³² Pretreatment

³³ Circuit

³⁴ Evaporator

³⁵ Condenser

³⁶ Chiller

باز می‌یابد. در هر واحد مسکونی، شبکه‌ی تهویه‌ی مطبوع در غیاب افراد اتاق به صورت اتوماتیک به وسیله‌ی درپچه‌های دو موتوره مرتبط با تامین هوا و داکت‌های اصلی بازگشتی غیرفعال می‌شود. سرعت کلی جریان هوا به وسیله‌ی متناوب‌ساز^{۳۷}های محرک موتورهای فن واحدهای بازیابی مرکزی کنترل می‌شود. واحدهای بازیابی در نواحی مختلف مجموعه توزیع و هر کدام از آن‌ها در زیرشیروانی ساختمان موردنظر نصب شده‌اند.

در اتاق‌های بزرگ در سطح هم‌کف، واحدهای پایانی HVAC، از فن‌کویل‌ها و داکت‌های اصلی توزیع هوا تشکیل می‌شود. سالن نوشیدنی‌ها و رستوران (شکل (۶)) با واحدهای هواساز^{۳۸} مربوط به خودشان تجهیز شده‌اند. هر دو واحد هواساز دارای حس‌گرهای کربن دی اکسید در داکت بازگشتی هستند تا سرعت جریان تهویه‌ی مطبوع را بر اساس اشغال واقعی توسط متناوب‌سازهای محرک فن‌ها تغییر دهد.

اطلاعات ثبت شده توسط سیستم مدیریت ساختمان، مقادیر تمام پارامترهای بیان‌گر انرژی موردنیاز DCV شامل رطوبت نسبی و دمای هوای جریان بالادستی و پایین دستی هر کویل را نظیر شرایط هوایی بیرون به منظور محاسبه‌ی اختلاف آنتالپی^{۳۹} هوای عبوری از هر جزء AHU، تعیین می‌کند. به علاوه، سیگنال‌ها به منظور تعیین نرخ سرعت موتور برای ایجاد امکان محاسبه‌ی سرعت‌های جریان هوا به متناوب‌سازهای فن‌ها فرستاده می‌شوند [۲۲]. ظرفیت گرمایشی / سرمایشی تامین شده برای AHU می‌تواند در هر گام زمانی کنترل، توسط ضرب کردن سرعت جریان هوا در اختلاف آنتالپی رخ داده در عرض هر کویل محاسبه و از این طریق، مصرف الکتریکی فن مستقیماً اندازه‌گیری شود.

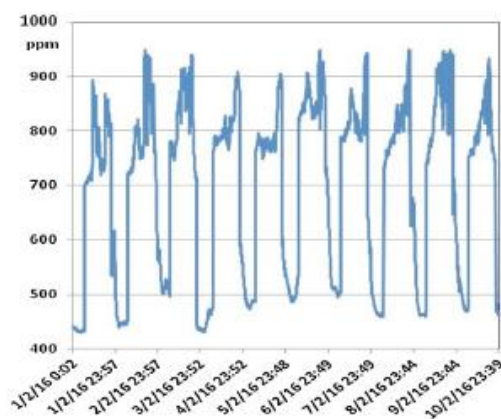


شکل ۵ نماهایی از آپارتمان : راه‌پله به نیم‌آشکوب و میز کار در طول دیوارهای پیرامونی شامل لوله‌کشی و فن‌کویل

³⁷ Inverter

³⁸ Air Handling Unit (AHU)

³⁹ Enthalpy



شکل ۶ نمایی از اتاق رستوران و غلظت اندازه‌گیری شده‌ی کربن دی اکسید (ppm) در فوریه ۲۰۱۶

۶.۳. سیستم تولید سه‌گانه

سیستم تولید سه‌گانه با واحد ترکیبی حرارت و قدرت^{۴۰} با یک توربین با ظرفیت الکتریکی ۱۰۰ کیلو وات با سوخت گاز طبیعی تجهیز شده است. در زمستان، این حرارت برای تولید آب گرم خانگی^{۴۱} و مشارکت در تامین حرارت استفاده می‌شود. در تابستان، تولید انرژی سرمایشی نیز با استفاده از یک ماشین جذب با ظرفیت سرمایشی ۱۰۰ کیلو وات امکان‌پذیر است. واحد CHP نیاز حرارتی یا به عبارت دیگر نیاز الکتریکی را تامین می‌کند. گاز خارج شده ممکن است به وسیله‌ی یک میراگر^{۴۲} تنظیم‌شده از مسیر فرعی واحد بازیابی حرارت عبور می‌نماید تا حرارت اضافی تلف شود؛ زیرا برق اضافی تولید شده می‌تواند به شبکه‌ی ملی بازگردد. انرژی حرارتی ناشی از واحد بازیابی حرارت در ۴ مخزن آب (ظرفیت کلی ۲۰ مترمکعب) که به صورت سری متصل می‌شوند، ذخیره می‌گردد تا لایه‌بندی^{۴۳} حرارتی را بهبود ببخشد. در بخش تقاضا، سه جریان فرعی تولید آب گرم خانگی، واحدهای پایانی HVAC حرارتی (در زمستان) و چیلرهای جذب (در تابستان) برای تامین انرژی سرمایشی واحدهای پایانی HVAC مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمستان، ذخیره‌ی حرارتی دمای میزانی بین ۸۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد دارد؛ در حالی که در تابستان به منظور عملکرد بالای چیلر جذب، ذخیره‌ی آب تا دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود و با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تخلیه می‌گردد. بازیابی حرارت به منظور بالا بردن ذخیره‌ی گرمایی از سطح پایین‌تر گرمایی تا سطح بالاتر آن عمل می‌کند. به لطف ذخیره‌ی ۲۰ متر مکعبی آب، حتی با عدم نیاز گرمایشی/ سرمایشی، تداخل زمان عملکرد واحد CHP هیچ‌گاه کم‌تر از ۱/۵ ساعت نیست، بنابراین تعداد روشن/ خاموش کردن کاهش می‌یابد و واحد CHP با بازده متوسط بالاتری کار می‌کند. عملکرد واحد CHP معمولاً بر اساس اولویت نیاز گرمایشی است، اما با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی، راهکارهای جایگزین با استفاده از شبیه‌سازی بررسی شدند:

⁴⁰ Combined Heat and Power (CHP)

⁴¹ Domestic Hot Water (DHW)

⁴² Damper

⁴³ Stratification

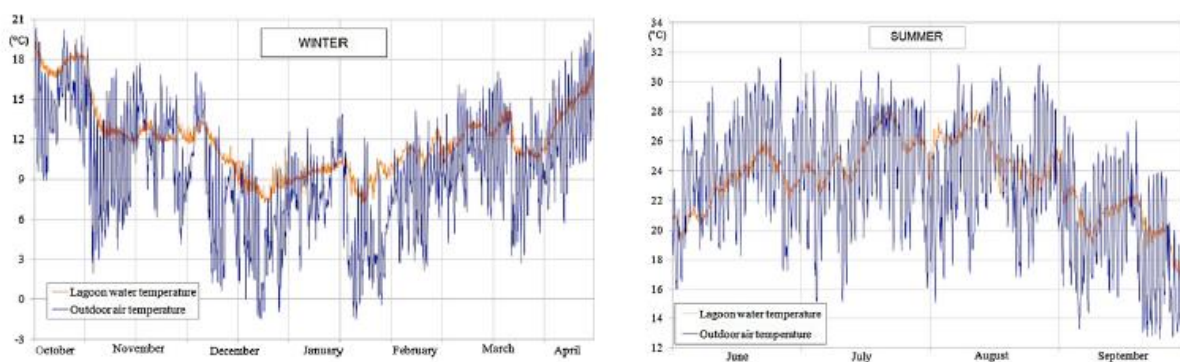
- تولید الکتریکی کامل در طول سال
 - اولویت نیاز الکتریکی
 - حالت عملکردی تمام بار؛ یعنی CHP تنها وقتی کار می‌کند که نیاز الکتریکی ساختمان از ظرفیت اسمی (۱۰۰ کیلو وات) فراتر رود، که گاهی به منظور جلوگیری از کاهش بازده در حالت عملکردی با اولویت نیاز الکتریکی وجود دارد.
- نتایج این تحلیل در بخش بعدی ارائه شده است.

۴. نتایج

۱.۴. عملکرد پمپ حرارتی با منبع هوا (ASHP)

با شروع یک رشته نظارت طولانی مدت و جزئی، تحلیل عملکرد فصلی سیستم‌های نصب شده توسعه یافته است. در حالت خاص، پمپ حرارتی با منبع آب سطحی (SEHP) با پمپ حرارتی سنتی با منبع هوا (ASHP) سازگار با ظرفیت، حال کنترل و مشخصه‌های یکسان دیگر، مقایسه شده است.

عملکرد بار کامل ASHP بر اساس منحنی‌های ظرفیت و بازده (ضریب عملکرد^{۴۴} و ضریب بازده انرژی^{۴۵}) ارائه شده توسط سازنده به عنوان تابعی از میانگین ساعتی مقادیر اندازه‌گیری شده از دمای هوای بیرون و آب (گرم یا سرد) تامین شده برای سیستم توزیع HVAC محاسبه شده‌اند. سپس بازده واقعی بار جزئی از طریق ضرب بازده بار کامل در یک ضریب اصلاح مربوط به ضریب بار جزئی به دست می‌آید [۲۳]. این تحلیل مربوط به بازه‌ی زمانی از ۱۵ اکتبر تا ۱۵ آوریل (به دلیل مقررات ملی) است که بازه‌ی سرمایش از اوایل ژوئن تا پایان سپتامبر ۲۰۱۴ به طول انجامید. به طور کلی، این بازه‌ی زمانی با استفاده از شرایط آب و هوایی متوسط هم در زمستان و هم در تابستان مشخص شد. شکل (۷) نمودارهای دماهای آب مخزن و هوای بیرون را در طول زمان کنترل نمایش می‌دهد.



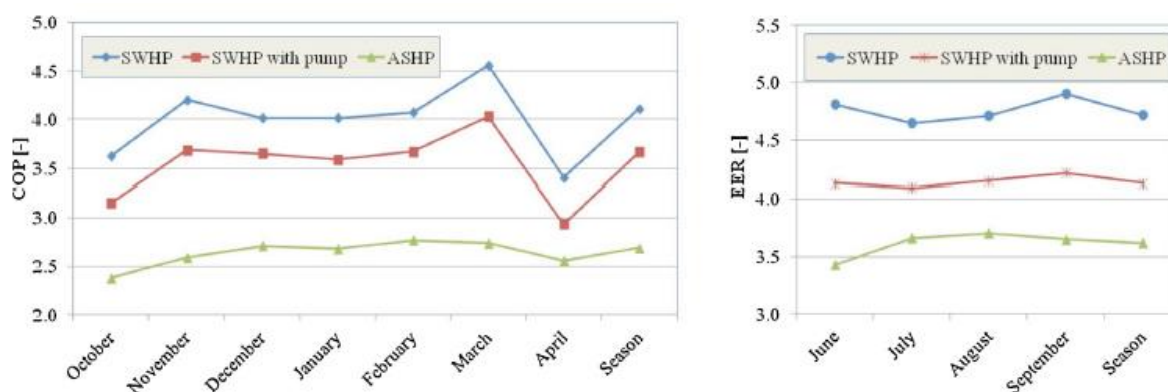
شکل ۷ دماهای هوای بیرون و آب مخزن در طول زمان کنترل

⁴⁴ Coefficient Of Performance (COP)

⁴⁵ Energy Efficiency Ratio (EER)

شکل (۸)، مقادیر بازده متوسط ماهانه و فصلی گرمایشی و سرمایشی را از اطلاعات کنترلی برای SWHP و شبیه‌سازی شده برای سیستم مبنای ASHP نشان می‌دهد. در مقادیر بازده هر دو سیستم باید مصرف برق بر اساس پمپ‌ها/ فن‌ها با سیال^{۴۶} خارجی (آب/ هوا) در حال گردش در نظر گرفته شود. از این رو، مقادیر بازده SWHP با در نظر گرفتن مصرف برق پمپ‌های هیدرولیکی با جریان آب مخزن نیز گزارش شده‌اند. در حالت خاص، مکش آب با توجه به کنترل آن به وسیله‌ی متناوب‌سازها به طور پیوسته اندازه‌گیری شده است.

بر اساس شکل‌ها، بازده SWHP در زمستان به مقدار ۳۶ درصد (مقدار COP متوسط ۳/۶۶ برای SWHP در مقابل ۲/۶۹ برای ASHP) و در زمستان به مقدار ۱۴ درصد (مقدار ERR متوسط ۴/۱۳ برای SWHP در مقابل ۳/۶۲ برای ASHP) بالاتر بوده است. این مقایسه، سهم منابع انرژی تجدیدپذیر برداشت شده توسط دو پمپ حرارتی را در نظر گرفته است. این سهم‌ها به نیاز انرژی سالانه برای HVAC (گرمایش و جریان هوا) اشاره می‌کند. هر دو سهم بالا هستند و این موضوع صحت تکنولوژی پمپ حرارتی را تایید می‌نماید. اگر چه این سهم‌ها برای SWHP (۴۲٪) بهتر از ASHP (۳۵٪) است.



شکل ۸ مقایسه‌ی مقادیر ماهانه‌ی ضریب عملکرد (COP) و ضریب بازده انرژی (EER) برای SWHP و ASHP

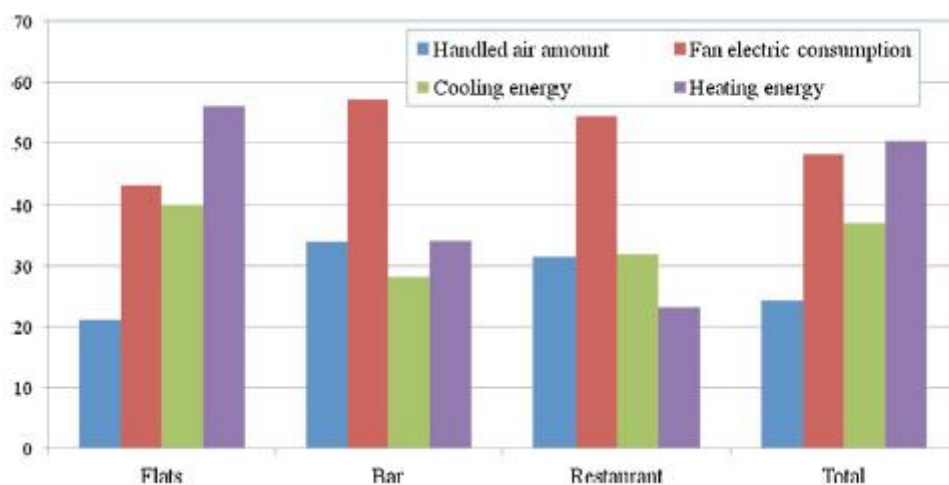
۲.۴. عملکرد سیستم هوارسانی کنترل شده‌ی مورد نیاز (DCV)

سیستم DCV نصب شده در مقابل سیستم مشابه اما با سرعت جرین هوارسانی ثابت در طول ساعات عملکرد سیستم HVAC مقایسه شده است. سرعت جریان هوا برابر با بیش‌ترین مقدار در غیاب DCV است.

در شکل (۹)، کاهش سالانه‌ی مقدار هوای کنترل شده و کاهش انرژی مورد نیاز برای فن‌ها و عملکردهای حرارتی در AHU برای نوع از امکانات با هم به صورت مقادیر کلی نشان داده شده‌اند. این درصدهای کاهش مربوط به مقادیر مرتبط در حالت بدون DCV، یعنی با سرعت جریان ثابت هوا در طول ساعات کارکرد است.

⁴⁶ Fluid

سیستم DCV سبب ذخیره‌ی زیاد انرژی می‌شود. به طور دقیق، ذخیره‌ی مصرف برق فن درصد قابل توجهی است اما کاهش نیاز کلی گرمایش و سرمایش ارزش بالاتری دارد.



شکل ۹ کاهش سالانه‌ی مقدار هوای کنترل شده و نیاز انرژی (٪). این مقادیر ذخیره شده مربوط به نیازهای مربوط برای هوارسانی بدون DCV است.

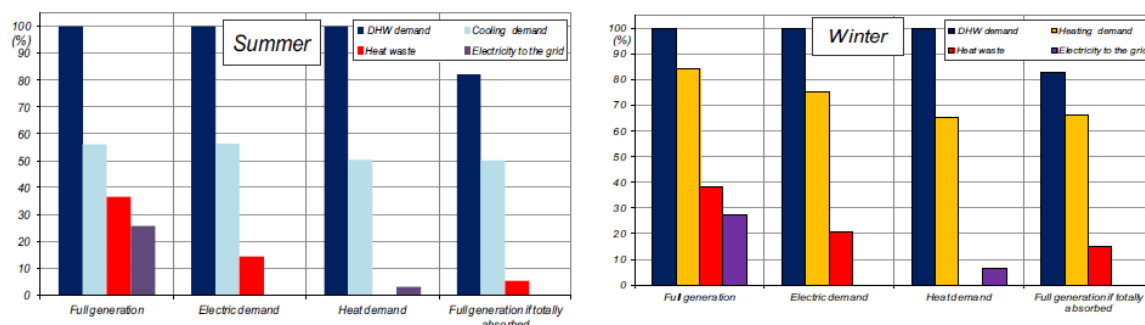
۳.۴. عملکرد سیستم تولید سه‌گانه

بر اساس اطلاعات کنترل، نمودار سالانه از نمودارهای تقاضای خدمات زیر در نظر گرفته شدند:

- برق؛
- تولید آب گرم خانگی
- گرمایش HVAC؛
- انرژی حرارتی برای کار کردن چیلر جذب

برخی از نتایج این تحلیل عملکرد در شکل (۱۰) برای راهکارهای کنترل در نظر گرفته شده، گزارش شده است. اولویت دادن به تولید آب گرم خانگی معمولاً امکان تامین کامل این نیاز را به وسیله‌ی بازیابی حرارت فراهم می‌سازد، در حالی که تولید کامل پیوسته منجر به اتلاف حرارت مربوطه می‌گردد، بنابراین هیچ‌گاه در نظر گرفته نمی‌شود. سه راهکار باقی‌مانده از نظر ذخایر اصلی انرژی مقایسه شدند. این ذخایر مربوط به مصرف انرژی در حالت مبنا شامل گرفتن برق از شبکه‌ی ملی و انرژی گرمایشی از دیگ‌های بخار هستند.

این مقایسه نشان می‌دهد که ذخایر انرژی با اولویت قرار دادن تقاضای گرمایش برابر ۲۵ درصد، با اولویت قرار دادن نیاز برق برابر ۱۲ درصد و با تولید کامل برق اگر به کاملاً مصرف شود، برابر ۲۱ درصد است. بهترین نتیجه‌ی انرژی به طور مشخص مربوط به حالت اولویت قرار دادن نیاز گرمایشی است.



شکل ۱۰ سهم‌های (%) نیاز گرمایشی، سرمایشی و انرژی DHW تامین شده توسط بازیابی حرارتی از واحد CHP با راهکارهای کنترل مختلف. سهم‌های گرمای تلف شده و برق فرستاده شده به شبکه نیز نشان داده شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

تکنولوژی‌ها و راهکارهای مدیریتی نشان داده شده در بالا، امکان استفاده از سیستم HVAC را در ساختمان‌های تاریخی فراهم می‌آورد تا از نظر انرژی مفید باشند و با مفهوم معماری ویژه به طور کامل ترکیب شوند. این موارد به طور کوتاه در زیر خلاصه شده است:

- مدیریت هوشمند ساختمان بر اساس BMS و کنترل پیوسته‌ی عملکردها. در حقیقت، یک سیستم مدیریت ساختمان مورد علاقه‌ی کاربر که برای کنترل بلند مدت در نظر گرفته شده است، نه تنها می‌تواند برای مدیریت و کنترل معمول استفاده شود، بلکه می‌تواند امکان تعریف راهکارهای دقیق انرژی در نمونه‌ی خاص مطالعاتی را فراهم آورد.
- پمپ حرارتی به عنوان سیستم تولید گرمایش با بازده بالا. با این روش، ساختمان‌های تاریخی می‌توانند سهم مناسبی در دستیابی به سهم منبع انرژی تجدیدپذیر موردنیاز بر اساس توصیه‌های اتحادیه‌ی اروپا داشته باشند.
- هوارسانی کنترل شده‌ی موردنیاز می‌تواند ذخیره‌ی انرژی مربوطه را به ویژه در ساختمان‌هایی با تنوع بسیار زیاد سکونت تامین نماید.
- تولید سه‌گانه، به عنوان یک تکنولوژی برای حداکثر بازده در تولید انرژی، می‌تواند ساختمان‌های تاریخی را در میان ساختمان‌های هوشمند مرتبط با شبکه‌های انرژی جدید موردنیاز در توسعه‌ی شهرهای هوشمند، قرار دهد.

در این نمونه‌ی خاص، معرفی این ترکیب از راه‌حل‌های سیستم بازدهی اجازه‌ی ذخیره‌ی اساسی انرژی کلی برابر با ۳۶ درصد را در مقایسه با سایت سنتی بدون آن‌ها می‌دهد. کاهش کلی انتشار کربن دی‌اکسید نیز برابر ۸۶/۹ تن در سال محاسبه شد.

به علاوه، به کار گیری سیستم با مشکلات مربوط به توصیه‌های محافظتی رو به رو نمی‌شود. بنابراین، از میان تمام راه‌حل‌های بازدهی بالا، آن‌ها باید همواره در بازسازی ساختمان‌های تاریخی در نظر گرفته شوند. از این طریق، بازسازی ساختمان‌های تاریخی نیز می‌تواند در رسیدن به هدف ۲۰-۲۰-۲۰ تا سال ۲۰۲۰ مطابق با آن‌چه که پارلمان اتحادیه‌ی اروپا مشخ کرده است، مشارکت نماید.

پیوست A. اطلاعات تکمیلی درباره‌ی سیستم HVAC و روش محاسباتی

در زمستان، پمپ حرارتی به منظور تامین گرمایش در سطح حرارتی مناسب به منظور کاربرد گرمایشی استفاده می‌شود. در طول زمان تهویه‌ی مطبوع، پمپ حرارتی به عنوان یک ماشین سردکننده^{۴۷} اثر سرمایشی را ایجاد می‌نماید که منجر به خارج شدن حرارت با دمای کم می‌گردد [۲۹]. برای یک پمپ حرارتی الکتریکی، مصرف انرژی شامل مصرف برق می‌باشد. از آنجایی که بازده انرژی ماشین همواره نسبتی از ظرفیت خروجی مصرف است، عبارت‌های مختلفی با نام ضریب عملکردی (COP) و ضریب بازده انرژی (EER) به ترتیب برای بازده در حالت گرمایشی و سرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور دقیق:

$$COP = \frac{P_h}{P_{el}} \quad (۱)$$

$$EER = \frac{P_c}{P_{el}} \quad (۲)$$

در این روابط P_h و P_c به ترتیب ظرفیت گرمایشی و سرمایشی و P_{el} قدرت الکتریکی ورودی است. این بازده‌ها به شدت تحت تاثیر سطوح حرارتی دو جریان^{۴۸} گرمایشی که به وسیله‌ی ماشین با محیط بیرون تعویض می‌شوند، می‌باشند. به طور دقیق، بازده‌ها در دمای بالاتر در منبع سرد و در دمای پایین‌تر برای گرمایش منتقل شده به بیرون افزایش می‌یابد. در هر دو حالت گرمایشی و سرمایشی، ضرورت سیستم HVAC سطح حرارتی به عنوان نیاز و تقاضا قرار می‌گیرد. هوای بیرون همواره وجود دارد اما با توجه به گردش حرارتی فصلی شدید، منبع سرد در زمستان و چاه گرم در تابستان بهینه نیست. آب‌های سطحی یا زیرزمینی، متغیرهای حرارتی سالانه‌ی محدود را ممکن می‌سازند و از این رو استفاده از آن‌ها مطمئن است. در نمونه‌ی مطالعاتی، عملکرد آب مخزن کنترل و با استفاده از شبیه‌سازی مخزن هوا کنترل شده است.

با توجه به سیستم بیرونی HVAC، راه‌حل فن‌کویل‌ها و توزیع هوای تهویه شده برای کاهش تهاجم مربوط به معماری آن انتخاب شده است [۲۹]. فن‌کویل‌ها با تامین نیاز گرمایشی و سرمایشی، دمای بیرونی را کنترل می‌نمایند. واحد هواسازی (AHU) معمولاً از فن‌های تامین و استخراج تشکیل شده‌اند که مانند واحد بازیابی حرارت امکان تصفیه‌ی اولیه‌ی هوای تامین شده را می‌دهند. سرعت جریان هوا بر اساس مقادیر تغییر هوای

⁴⁷ Refrigeration

⁴⁸ Flux

مورد نیاز محدود می‌شود. تنها در رستوران و سالن نوشیدنی‌ها، یک واحد هواسازی اختصاصی برای کنترل دقیق رطوبت قرار گرفته است. در این حالت هوای بیرونی تحت مراحل تصفیه‌ی کامل قرار می‌گیرد: حرارت دادن اولیه، رطوبت‌دهی و حرارت ثانویه در زمستان؛ سرمایش شدید با رطوبت‌زدایی و حرارت ثانویه در تابستان.

تولید دو انرژی^{۴۹} (ترکیب گرما و قدرت)، تولید همزمان برق و گرماست. در این حالت، گرما از دوده‌های خارج شده از توربین بازیابی می‌گردد. تولید دو انرژی، دستیابی به بازده بسیار بالای جهانی را ممکن می‌سازد اما مزیت اصلی آن مربوط به استفاده‌ی کلی از گرما و برق که به صورت همزمان تولید شده‌اند، است. در تابستان، نیاز گرمایشی معمولاً کاهش می‌یابد. بنابراین، گرمای تولید شده از این طریق می‌تواند برای تامین یک ماشین جذب برای تولید سرمایش استفاده شود. در ماشین جذب، گرما سبب تبخیر سیال خنک‌کننده به منظور ایجاد سرمایش می‌گردد.

از این طریق، تولید دو انرژی به تولید سه‌گانه‌ی گرمایش، سرمایش و برق تبدیل می‌شود.

شبیه‌سازی عملکردی راه‌حل‌های دیگر در مورد سیستم HVAC با در نظر گرفتن اطلاعات دقیق آزمایشگاهی جمع‌آوری شده از طریق سیستم مدیریت ساختمان امکان‌پذیر شد. یک فرآیند محاسباتی بر اساس مدل حالت صفحه‌گسترده^{۵۰} استفاده شده است. در هر گام زمانی ۵ دقیقه‌ای از کنترل، محاسبات مربوط به سهم‌های نمودار نیاز انرژی برای هر تولیدکننده‌ی انرژی مانند دیگ‌های بخار، پمپ حرارتی و سیستم تولید سه‌گانه همانند نیاز کلی انجام شده است. اندازه‌گیری‌های معاصر، ارزیابی بازده‌های مرتبط را ممکن می‌سازد. در نتیجه، در هر گام زمانی سهم‌های جایگزین از تولید انرژی فرض و بررسی شده‌اند.

ثبت همزمان دمای بیرونی و نیاز پمپ حرارتی با منبع آب سطحی (SWHP)، شبیه‌سازی مربوط به یک پمپ حرارتی با منبع هوا (ASHP) را ممکن می‌سازد. بر اساس بارهای واقعی اندازه‌گیری شده، منحنی‌های عملکردی ASHP تعیین شده توسط تولیدکننده، ظرفیت خروجی و بازده بار (COP یا EER) را به عنوان یک تابع از مقادیر دمای بیرونی و دمای آب گرم یا سرد تولید شده که به صورت همزمان اندازه‌گیری شده‌اند، در اختیار قرار می‌دهد. بازده واقعی با ضرب بازده بار کامل در ضریب اصلاح مربوط به در نظر گرفتن اثر شرایط عملی بار جزئی به دست می‌آید [۳۰]. از روابط (۱) و (۲)، مصرف انرژی (P_{el}) از نسبت ظرفیت خروجی به بازده مربوط به آن نتیجه می‌شود. بازده میانگین ماهانه (COP یا EER) نسبت بین انرژی حرارتی (در گرمایش یا سرمایش) تامین شده در یک ماه و مصرف ماهانه‌ی برق است. مقدار میانگین سالانه به صورت قیاسی محاسبه می‌شود.

⁴⁹ Cogeneration

⁵⁰ Spreadsheet