

تحلیل جریان بخارات گرم در چیلر و شرایط تأمین هوا

علی اکبر جمالی: عضو هیات علمی دانشگاه امام حسین(ع) - گروه مهندسی شیمی

احد عبدی وش: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

چکیده

در تجهیزات انتقال حرارت بویژه سامانه‌های تولید برودت نظیر چیلرها و سایر دستگاه‌های سرماساز و تهویه‌ای تأمین و توزیع هوا و نیز بهره‌برداری از انرژی همراه جزء نیازهای اساسی بشمار می‌روند. در سرمایش به روش جذبی انرژی سیستم به جای الکتریسیته از گرما تأمین می‌شود. این حرارت از بخارات حاصل از گرمای یک مشعل گازسوز یا گازوئیل سوز اتمسفریک که در کانال‌های هوا جاری می‌شوند؛ تأمین می‌گردد. کار حاضر، به دلیل ضرورت بررسی شرایط مطلوب تأمین هوا در کانال‌ها و داکت‌ها، با تمرکز بر ارائه مدلی برای پیش‌بینی عملکرد مجاری به کمک اندازه‌گیری زمان واقعی، مقایسه واقع‌بینانه‌ای با بازده مرتبط با اجزاء یا سیستم‌های مشابه صورت گرفته است. مدل ریاضی ارائه شده برهمکنش تأثیرات مؤلفه‌های مختلف در مجاری تغذیه و بازگشت بویژه برهم‌کنش میان تلفات هدایتی و نشت هوا را لحاظ نموده و اثرات متقابل نشت نامتوازن و نفوذ طبیعی و نگهداشت حرارت از تمامی سطوح داکت‌ها در موقعیت‌های مختلف را مدنظر دارد. در اینجا متناسب با کاربردهای منحصر به تجهیزات برودتی خانگی، ضمن معرفی روش چرخه حرارتی کوتاه مدت سازگار با عملکرد سامانه‌های تهویه‌ای نتایج چندین بررسی تجربی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد؛ خروجی هر دو روند شبیه‌سازی قبل و بعد از آزمایش به دلیل بهبودهای ناشی از عایق‌کاری و جلوگیری از نشت هوا در مجاری نتایج مطلوبی در بردارد.

مقدمه

محاسبه اتلاف انرژی در بخش‌های مختلفی از تجهیزات در صنایع با توجه به ضرورت رعایت ملاحظات مدیریت انرژی در راهبری صنایع دارای اهمیت بوده و اغلب توصیه می‌شود. در اینجا، در مسیر استقرار یک خط چیلری، سامانه ذخیره انرژی کلی شامل ترکیبی از یک چیلر مرکزی و یک هواساز بیرونی جمعاً در نقش یک خنک‌ساز فعال در نظر است. این سامانه حلقه بسته مصرف آب ندارد. مصرف انرژی در مقایسه با سامانه آدیباتیک در صد قابل توجهی کاهش دارد و بازده حرارتی مطلوبی عرضه می‌کند.

در سال‌های اخیر مطالعه تلفات حرارتی در مجاری سیستم‌های توزیع هوا تحت بررسی گسترده‌ای قرار گرفته است. در سیستم‌های توزیع هوا، هوا از طریق مجرای بازگشت به وسیله یک فن مکیده شده، برحسب نیاز توسط اجزایی مانند مقاومت‌های الکتریکی گرم یا سرد شده، بعد از طریق مجرای ورود هوا به فضای داخل مکان مورد نظر (مانند یک خانه) منتقل می‌شود. فن به لحاظ ضرورت ایجاد رانش سیال و هدایت آنها در کانالها، معمولاً در قسمت بالای اجزاء گرم‌کننده یا سردکننده قرار می‌گیرد. در حالت ایده‌آل تمام هوای بازگشتی از طریق مجاری دیگر گرفته می‌شود و تمام هوای تغذیه از طریق شبکه‌های تغذیه تحویل داده می‌شود. وقتی که سیستم کنترل فعال باشد، چرخه هوا به وسیله یک ترموستات جهت ثابت نگه داشتن دمای مطلوب کنترل می‌شود. تلفات در عملکرد مجرا اساساً ناشی از نشت هوا و تلفات رسانشی است. مطالعات متعددی در نمونه‌های کوچک، مقدار این تلفات را تعیین کرده‌اند. مرجع [۱] یک دید کلی از تأثیرات نشت سیستم‌ها را در هر دو حالت نفوذ و ذخیره‌های حرارتی ارائه می‌دهد. در مسیر ارائه شرح فیزیکی آنچه در نظر این کار پژوهشی است، شایسته است مقایسه‌ای با سامانه‌های تهویه‌ای در مصارف خانگی نیز صورت گیرد. مرجع [۲] نشان داده است که حداقل ۵۰ درصد از مجراهای موجود در فضاهای غیرتهویه‌ای به صورت میانگین ۲۹ درصد اتلاف بازده ناشی از نشت و تلفات رسانشی را دارا می‌باشند که با حدود ۲ درصد اتلاف بازده در مجراها قابل مقایسه است. در مرجع [۳] آمده است که ترمیم درزگیری هوایی به دلیل مقدار زیاد نشت خارجی با ۱۶ درصد بهبود بازده و با کاهش تلفات بازده حدود ۴۴ درصد همراه بوده است. در اینجا نشت به خارج حدود ۷۰ درصد کاهش داشت. آنچه در مجاری تهویه‌ای حائز توجه است، همرفت اجباری می‌باشد که خود با دسته‌ای از مفاهیم چون نشت و تغییرات دمایی مرتبط موجودیت می‌یابد.

بنا به مطالعه انجام شده [۴]، در مورد درزگیری و عایق‌بندی مجاری تهویه‌ای، میانگین کاهش مصرف انرژی حدود ۱۸ درصد را بدنبال داشته است. همچنین در مرجع [۵] با انجام ترمیم درزگیری هوایی با حداقل ۲۵۰ فوت مکعب در دقیقه برای نشت مجاری خارجی، ذخیره انرژی حدود ۱۶ درصد و کاهش نشت در حدود ۸۰ درصد گزارش شده است.

تاکنون هیچ مدل ریاضی ساده‌ای برای تخمین بازده حرارتی سیستم‌های توزیع هوا که شامل برهم‌کنش بین مجاری تغذیه و بازگشت در سامانه‌های تهویه‌ای در حاشیه چیلرها، برهم‌کنش بین تلفات رسانش و تلفات نشت هوا، برهم‌کنش بین نشت نامتوازن و نفوذ طبیعی و نیز بازیافت وجود نداشته است. این انرژی که توسط مجاری تلف می‌شود؛ در فضای تهویه، به عنوان انرژی تهویه‌ای مفید بازیافت می‌شود. چنین مدلی اگر بتواند بازده یک سیستم را براساس اندازه‌گیری نمونه کوچکی تخمین زند، می‌توان آن را برای تعداد زیادی از مجراها بکار برد. یکی از کاربردهای اولیه چنین مدلی پیش‌بینی تغییر در انرژی مورد استفاده در شرایط متنوع مانند افزایش میزان عایق کاری یا درزگیری هوا در سامانه‌های تهویه‌ای برای مصارف حرارتی و برودتی خانگی است.

یک مدل ساده که توسط پالمیتر و فرانسیسکو در مرجع [۶] توسعه داده شد، برهم‌کنش‌های ترکیبی اشاره شده در بالا را توضیح داده و همچنین دماهای مختلفی را برای نواحی سمت بازگشت و تغذیه ممکن می‌سازد. مدل مشابه دیگری برای استفاده در نسخه پیش‌نویس استاندارد ASHRAE/152P پیشنهاد شده است [۷]. آنالیز حساسیت انجام شده بر روی

این مدل نشان می‌دهد که تلفات تغذیه تأثیر شدیدتری بر بازده کل دارد که نسبت به تلفات بازگشت در همان نوع (رسانش یا نشت) و نیز تلفات رسانشی، تأثیر عمیق‌تری بر تلفات نشتی در همان اندازه دارد [۶]. نکته قابل توجه در این مدل بارهای پنهان محاسبه نشده‌ای هستند که می‌توانند در موقعیت و مقاصد برودتی مهم باشند. آنالیز حساسیت برای بارهای قابل پیش‌بینی، با فرض آنکه هیچ تلفات رسانشی موجود نباشد، نشان می‌دهد که دما در فضاهایی که مجاری بازگشت واقع شده‌اند باید بیشتر از مجموع دمای خارجی و دمایی که در امتداد تجهیزات برای نشت بازگشت تغییر می‌کند، و ایضاً بیشتر از مقدار نشت تغذیه باشد.

این مقاله نتایجی از کاربرد مدل پالمیتر و فرانسیسکو را برای سامانه‌های با گرمایش گاز ارائه می‌کند و این نتایج را با داده‌های بازده اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند [۸ و ۱۳]. نتایج مزبور براساس یک دسته از اندازه‌گیری‌ها به تفصیل ارائه شده‌اند [۱۳]. لازم به ذکر است که در تبیین مدل و نتایج متعاقب، از اطلاعات مندرج در مرجع [۱۳] به خوبی بهره‌برداری شده است.

مدل فیزیکی

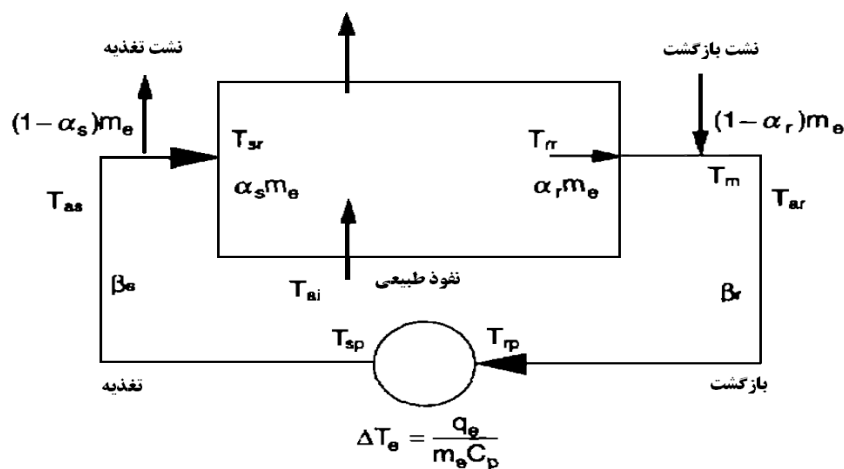
چیلرهای تراکمی دارای سه بخش اصلی کمپرسور (متراکم کننده)، کندانسور (تقطیر کننده) و اواپراتور (تبخیر کننده) هستند. در چیلرهای تراکمی ماده مبرد در اثر عمل پمپ گونه کمپرسور متراکم می‌شود و پس از افزایش فشار و دما به سمت کندانسور جریان می‌یابد. گاز داغ ضمن تبادل حرارت با آب ارسالی از سوی برج خنک‌کن یا هوای خنک در کندانسور تقطیر شده و به صورت مایع داغ، کندانسور را به سمت شیر انبساطی در ورودی اواپراتور ترک می‌کند. عبور مایع مبرد از شیر انبساطی توام با افت فشار است، از این رو مایع آمادگی لازم برای تبخیر را در داخل اواپراتور کسب می‌کند و پس از ورود به فضای اواپراتور با جذب حرارت از لوله‌های آب سیستم (آب تغذیه کننده وسائل تبادل حرارت نظیر فن کوئل‌ها) تبخیر شده و به صورت گاز از طریق لوله مکش به کمپرسور باز می‌گردد و چرخه سرمایش بار دیگر از سر گرفته می‌شود. سیستم‌های تهویه‌ای در حاشیه چیلرها کارکردهای تهویه مطبوع را چندبرابر می‌کند. لذا در اینجا شکل یک نمایش شماتیک یک سری مجاری مرتبط و ساده شده می‌باشد. در این شکل، T_{sr} و T_{rr} درجه حرارت عمومی تغذیه و بازگشت هستند، T_{ar} و T_{as} دمای پیرامون مجراهای تغذیه و بازگشت، T_m دمای مخلوط هوا در مجرای بازگشت بعد از نشت بازگشت است، T_{ai} دمای هوای نفوذی طبیعی از خارج، ΔT_e صعود دما در امتداد تجهیزات، Q_e انرژی تولید شده به وسیله تجهیزات، و m_e نرخ جریان جرم هوا از طریق تجهیزات است. دو مکانیزم اولیه رسانش و نشت برای اتلاف گرما از مجاری سامانه‌های تهویه‌ای برای مصارف حرارتی و برودتی خانگی، مطرح می‌باشند.

با استفاده از تئوری تبادل گرمای استاندارد برای جریان حالت پایا در سراسر کانال‌ها با یک دمای پیرامونی ثابت، بازده رسانش β را می‌تواند به این صورت تعریف کرد [۱۳]:

$$\beta = \frac{T_{out} - T_a}{T_{in} - T_a} = \exp\left(-\frac{UA}{mC_p}\right) \quad (1)$$

که T_{out} دمای خارجی کانال؛ T_{in} دمای داخلی کانال؛ T_a دمای پیرامون کانال؛ U ضریب انتقال گرما؛ A سطح مقطع کانال؛ m نرخ جریان هوا در کانال؛ C_p گرمای ویژه هوا است.

شکل ۱. طرح کلی از نمایش موقعیتها و تلفات داکت



برای محاسبه بازده با توجه به نشت هوا، فرض می‌شود که درصد اتلاف ثابت و در مکانی در طول سیستم تهویه متمرکز شده است. بازده نشت هوا α می‌تواند به صورت زیر تعریف شود [۱۳]:

$$\alpha = \frac{m_{out}}{m_{in}} = 1 - \text{کسر نشت یافته} \quad (۲)$$

که m_{out} نرخ جریان جرم خروجی از کانال؛ m_{in} نرخ جریان جرم ورودی به کانال و کسر نشت (Leak fraction) نسبت نشت به خروجی ها برای نرخ جریان کل تولید شده به وسیله پمپ هوا می‌باشد.

بازده تحویل

با استفاده از این تعاریف، بازده تحویل η_0 ، که به صورت کسری از انرژی مهیا شده توسط تجهیزات است که به وسیله عملکرد مجاری پوشش داده شده در طی شرایط حالت پایا تحویل داده می‌شود، می‌توان به این صورت بیان کرد:

$$\eta_0 = \alpha_s \beta_s - \alpha_r \beta_r (1 - \alpha_r \beta_r) \frac{\Delta T_r}{\Delta T_e} - \alpha_s (1 - \beta_s) \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \quad (۳)$$

که ΔT_r ، اختلاف دمای بین رجیستر بازگشت و هوای پیرامون مجرای بازگشت می‌باشد؛ ΔT_s اختلاف دمای بین رجیستر بازگشت و هوای پیرامون مجرای تغذیه می‌باشد و ΔT_e تغییرات دما در امتداد تجهیزات تهویه می‌باشد.

در این تعاریف دمای رجیستر بازگشت با دمای یک خانه مشخص شده است. این بیان از بازده تحویل شامل خصوصیات از جمله بدون بعد بودن و مستقل و خطی بودن اختلاف دمای بازگشت و تغذیه برای هر قسمت است. به علاوه تنها اندازه‌گیری‌های دمایی مورد نیاز آنهایی هستند که در رجیستر بازگشت و در نواحی مجاری تغذیه و بازگشت واقع شده‌اند. معادله ۳ با آنچه که مطابق با استاندارد ۱۵۲p برای تأثیر تحویل بدست آمده است؛ تعریف مشابهی با بازده تحویل دارد. دقت کنید که این تعریف از بازده تحویل که در مرجع [۹] آمده با آنچه که در هندبوک اشری [۷] وجود دارد، متفاوت است و بیان می‌کند که بازده تحویل نسبت انرژی تحویلی از طریق رجیسترها به ظرفیت خروجی تجهیزات است. معادله ۳ به مفاهیم مهم مختلفی اشاره دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

• بازده تحویل صرف نظر از اختلافات دما، نمی‌تواند بهتر از محصول نشت تغذیه جانبی و راندمان‌های رسانش باشد.

• دمای پیرامون مجرای بازگشت جانبی مانند دما در رجیستر بازگشت، صرفنظر از بزرگی نشت، تأثیری روی بازده تحویل مجرای بازگشت ندارد.

بعلاوه همزمان با کاهش تغییرات دما در سراسر تجهیزات، بازده تحویل نیز کاهش می‌یابد. این موضوع نگرانی درباره فن‌ها را که وظیفه دارند تغییرات دمای سایر تجهیزات را در کمترین مقدار نگه دارند؛ افزایش می‌دهد. معادله ۳ همچنین پیشنهاد می‌کند که اگر بقیه موارد ثابت نگه داشته شوند با کاهشی در ظرفیت تجهیزات، افزایشی در نرخ جریان پمپ هوا ایجاد می‌گردد که منجر به کاهشی در بازده تحویل خواهد شد.

مدل توصیف شده در بالا فرض می‌کند که تمامی نشت‌ها در انتهای پوشش مجاری هستند. اما این نشت می‌تواند به موقعیتی که یک کسر ϕ از نشت در انتهای اشغال شده از مجرا باشد، امتداد یابد. گرچه معادلات ۲ و ۳ یکسان هستند، لیکن معادله بازده هدایتی به شرح زیر می‌باشد:

$$\beta = \exp\left(-UA/(\phi + (1-\phi)\alpha) m C_p\right) \quad (4)$$

تنها در حالتی که هر دو تلفات رسانشی و نشتی بزرگ هستند، با فرض اینکه تمام نشت‌ها در پوشش کانال‌ها و یا در فضای اشغال شده باشند، تفاوت بین این دو مقدار کمتر از یک یا دو رقم اعشار در راندمان خواهد بود.

بازده توزیع

کسری از انرژی تغذیه تحویلی، گرمای مفیدی است که بازده توزیع نامیده می‌شود. نفوذ طبیعی و اثر بازیافت دوفاکتور اولیه هستند که نتیجه بازده توزیع و متفاوت از بازده تحویل می‌باشند. بازیافت، بخش از انرژی دریافتی از مجاری عایق‌بندی نشده‌ای است که عملاً در فضاها تلف شده و هم‌اکنون در نقش انرژی مفید در ساختمان بکار آمده است. بازده تحویل و بازده توزیع شامل تأثیرات مجاری تهویه‌ای بر حرارت مورد نیاز قسمت‌های مختلف سیستم است. هیچیک از این دو بازده اندازه‌گیری شده شامل بازده دستگاه‌هایی مانند بازده احتراق یک کوره گاز یا بازده کمپرسور یک تهویه هوا یا پمپ حرارتی یا دیگر اجزاء چیلرها، نمی‌باشند.

برهمکنش نشت مجاری تهویه‌ای نامتوازن با نفوذ طبیعی

اثر برهمکنش نشت مجاری تهویه‌ای نامتوازن با نفوذ طبیعی جهت تغییر بار حرارتی مکان تحت آزمایش (نظیر یک ساختمان) است. هنگامی که در اثر این برهم‌کنش، تغییر در بار حرارتی ساختمان خیلی بیشتر از تغییر در کارایی حرارتی خود مجاری تهویه‌ای باشد، این مورد به جای یک ضرب به صورت یک انحراف، از بازده کم می‌شود. انحراف، η_{in} ، به عنوان اتلاف در مسیر برهمکنش با نفوذ طبیعی می‌تواند با استفاده از مدل هواکش توسعه یافته بوسیله پالمیتر و بوند تخمین زده شود [۱۰-۱۲].

از خصوصیات انحراف در مورد نشت بازگشت کنترل شده ($\alpha_s > \alpha_r$) این است که بازده توزیع با چشم پوشی از شرایط برهم‌کنشی نفوذ، با افزایش نشت بازگشت افزایش می‌یابد. در موارد شدیدتر مانند نشت بازگشت در یک فصل گرم، افزایش بازده توزیع می‌تواند دیگر نشت‌ها را منحرف کرده و منجر به یک بازده توزیع بزرگتر از یک شود. بطور مشابه اگر نشت تغذیه به اندازه کافی کنترل شده باشد، نفوذ اضافی می‌تواند بار حرارتی بزرگتری را ایجاد کند و به این ترتیب قسمت‌های مختلف سیستم تهویه به بازده توزیع کمتر از صفر دست یابند.

دو نوع نشت نامتوازن وجود دارد. نشت نامتوازن کوچک، که در آن نشت نامتوازن کمتر یا مساوی دوبرابر نسبت نفوذ طبیعی به نرخ جریان ایجاد شده توسط قسمت‌های مختلف سیستم تهویه است و نشت نامتوازن بزرگ، که نشت نامتوازن بزرگتر از دو برابر نرخ نفوذ طبیعی است. شایان ذکر است که نفوذ فقط شامل هوایی است که از طریق فضای اطراف داکت‌ها (کانال‌ها) وارد می‌شود، نه سوراخ‌هایی که در مسیر مجاری تهویه‌ای وجود دارند.

نشت نامتوازن کوچک

زمانی که دستگاه تهویه خاموش است؛ نرخ جریان جرم نفوذ طبیعی در نظر گرفته می‌شود، ΔT اختلاف دمای بین ساختمان و فضای خارج از آن است و η_1 اختلاف بین بازده تحویل و انحراف برهم‌کنش نفوذ است. اگر

$$\eta_{in} = 0.5(\alpha_r - \alpha_s) \Delta T / \Delta T_e \quad (5)$$

$$0.5(\alpha_r - \alpha_s) \leq [m_{nat} / m_e] \quad (6)$$

$$\eta_1 = \alpha_s \beta_s - \alpha_s \beta_s (1 - \alpha_r \beta_r) \Delta T_r / \Delta T_e - \alpha_s (1 - \beta_s) \Delta T_s / \Delta T_e - 0.5(\alpha_r - \alpha_s) \Delta T / \Delta T_e \quad (7)$$

نشت نامتوازن بزرگ

مجدداً مادام که دستگاه تهویه خاموش است؛ نرخ جریان جرم نفوذ طبیعی، ΔT اختلاف دمای بین ساختمان و فضای خارج از آن و η_1 اختلاف بین بازده تحویل و انحراف برهم‌کنش نفوذ است. اگر

$$0.5(\alpha_{max} - \alpha_{min}) > m_{nat} / m_e, \alpha_{max} = \max(\alpha_s, \alpha_r), \alpha_{min} = \min(\alpha_s, \alpha_r) \quad (8)$$

سپس

$$\eta_{in} = [\alpha_{max} - \alpha_s - m_{nat} / m_e] \Delta T / \Delta T_e \quad (9)$$

و

$$\eta_1 = \alpha_s \beta_s - \alpha_s \beta_s (1 - \alpha_r \beta_r) \Delta T_r / \Delta T_e - \alpha_s (1 - \beta_s) \Delta T_s / \Delta T_e - [\alpha_{max} - \alpha_s - m_{nat} / m_e] \Delta T / \Delta T_e \quad (10)$$

بازیابی مجدد

مقدار تلفات بازیابی شده توسط مجرای تهویه از طریق تغییرات بازیافت انرژی، شدیداً به طبیعت فیزیکی مکانی که تلفات اتفاق می‌افتد، وابسته می‌باشد. به عنوان نمونه، اتلاف حرارت بیشتر از طریق فضای بدون عایق کاری کف ساختمان در مقایسه با فضای کف به خوبی عایق کاری شده می‌باشد. فاکتور بازیافت f می‌تواند به این صورت بیان شود:

$$f = (UA)_h / (UA)_h + (UA)_{out} \quad (11)$$

که $(UA)_h$ ضریب هدایت از فضای حائل به خانه (یا سایر فضاهای تهویه)؛ $(UA)_{out}$ ضریب هدایت از فضای حائل از طریق نفوذ از فضای حائل به خارج خانه شامل زمین و محیط اطراف می‌باشد.

این ضرائب هدایت باید براساس زمانی که تجهیزات در حین فعالیت هستند، شامل هرگونه برهم‌کنش بین نشت نامتوازن کانال و نفوذ از طریق فضای حائل، تعیین گردند. اگر مقدار اندازه‌گیری شده برای این ضرائب در دسترس نباشد، برای توضیحی مفصل از چگونگی محاسبه این ضرائب و نیز چگونگی محاسبه دمای فضای حائل می‌توان از مرجع [۶] بهره برد. به دلیل اینکه بازیافت برای کسری از انرژی تلف شده به فضاهای حائل به کار می‌رود؛ به عنوان یک مضرب در این اتلاف

نشان داده شده است. اما تلفات بازده ناشی از نشت سمت بازگشت، شامل تلفات انرژی فضای حائل نمی‌باشند. جهت تعیین چگونگی قرار دادن فاکتور بازیافت در مدل، یک بیان برای انرژی تلف شده در فضای حائل مورد نیاز است. در سمت تغذیه، انرژی تلف شده در فضای حائل، q_{LS} ، بدین صورت است:

$$q_{LS} = [(1 - \alpha_s \beta_s) (\Delta T_e - (1 - \alpha_r \beta_r) \Delta T_r) + \alpha_s (1 - \beta_s) \Delta T_s] m_c C_p \quad (12)$$

و در سمت بازگشت، انرژی تلف شده در فضای حائل، q_{LR} ، به صورت زیر است:

$$q_{LR} = (1 - \beta_r) \Delta T_r m_e C_p \quad (13)$$

اگر داکت‌های تغذیه و بازگشت همگی در همان فضای حائل باشند [۶]، بازده توزیع بدین صورت می‌تواند بیان شود:

$$\eta = \eta_0 + f (1 - \eta_0 - \beta_r (1 - \alpha_r) \Delta T_r / \Delta T_e) - \eta_{in} \quad (14)$$

اگر چنانچه داکت‌های تغذیه و بازگشت در نواحی متفاوتی واقع شوند، جدایی فاکتورهای بازیافت تغذیه و بازگشت مورد نیاز می‌باشند. با محاسبه فاکتورهای بازیافت تغذیه و بازگشت به ترتیب f_r و f_s ، و به کاربرد آنها برای تلفات متناظر q_{LR} و q_{LS} ، بازده توزیع می‌تواند به این صورت بیان شود:

$$\eta = \eta_0 + f_s (1 - \eta_0 + (f_r / f_s - 1 - \beta_r (f_r / f_s - \alpha_r)) \Delta T_r / \Delta T_e) - \eta_{in} \quad (15)$$

اندازه‌گیری

یک سری آزمایشات تهویه‌ای چرخه کوتاه در چندین مجتمع که مجهز به تأسیسات تهویه‌ای حرارتی و برودتی کویل شده به کوره‌های گازی یا چیلرهای جذبی بوده، در دست است. هریک از این خانه‌ها قبل و بعد از تأثیر شرایط درزگیری هوایی و در بعضی موارد، عایق کاری داکت‌ها بررسی شدند. یک سری تست‌های نشت اولیه برای ارزیابی سهولت انجام تست‌های تهویه‌ای در هر خانه انجام شدند. بر مبنای تحلیل این تست‌های اولیه، خانه‌های با بزرگترین نسبت از نشت داکت به خارج در سمت تغذیه به جریان پمپ هوا برای دریافت تست‌های تهویه‌ای انتخاب شدند. جدول یک بعضی از داده‌های آماری مربوط به شش خانه را ارائه می‌کند. از آنجا که تلفات تغذیه تأثیر بیشتری روی بازده نسبت به تلفات بازگشت اندازه‌گیری شده دارد، تنها اطلاعات داکت تغذیه ارائه شده‌اند.

جدول ۱: داده‌های آماری و مشخصات داکت‌های تغذیه

مکان	داکت‌های تغذیه خانه		داکت‌های تغذیه			
	مساحت کف (m^2)	حجم (m^3)	طبقات	مساحت سطح (m^2)	% فضاهای غیر تهویه	تعداد رجیسترهای باز
۱	۲۰۵	۵۹۱	۲	۶۴	۶۸	۱۶
۲	۱۲۴	۳۰۱	۱	۱۶	۱۰۰	۵
۳	۱۲۵	۳۰۴	۱	۳۳	۱۰۰	۹
۴	۱۶۲	۳۸۷	۱	۴۰	۱۰۰	۸
۵	۱۷۱	۴۱۶	۲	۳۷	۸۲	۱۳
۶	۱۲۹	۳۰۸	۱	۳۶	۱۰۰	۱۰
میانگین	۱۵۳	۳۴۲	-	۳۸	۹۲	۱۰

روش ترکیبی

در آزمایش گرمایش ترکیبی چرخه کوتاه که در مورد یک مجتمع انجام می‌شود، خانه مرتباً به وسیله کوره و گرم‌کننده‌های مقاومت الکتریکی با شیفتهای ثابت ۲/۵ ساعت گرم می‌شود. آمپراژ برای نشان دادن اینکه چه زمانی فن تغذیه هوا و یا شیرگاز روشن یا خاموش هستند، اندازه‌گیری شده است. توان‌سنج‌های دقیق برای ثبت مصرف انرژی در کانال‌های اصلی قرار داده شده‌اند. زمان برای کنتور گاز خانه جهت تعیین نرخ مصرف گاز، اندازه‌گیری شده است. طی زمان‌هایی که گرمایش با کوره انجام شده است، ترموکوپل‌هایی که در هر ناحیه واقع شده‌اند (ترجیحاً ترموکوپل‌های کنترل) دماهای نواحی گرمایشی را اندازه می‌گیرند. دمای میانگین این دوره که در هر منطقه ثبت شده بر مبنای قرائت‌های هر ۱۰ ثانیه می‌باشد. جهت کوچک کردن آسیب ناشی از گرم شدن داکت‌ها، وقتی که کوره برای اولین بار خاموش می‌گردد، دماهای کنترل میانگین بعد از گذشت حداقل ۱/۵ ساعت از گرم‌شدن توسط کوره مجدداً راه‌اندازی می‌شود. کوره به گرم کردن خانه برای حداقل یک ساعت ادامه می‌دهد و در طول این مدت دماهای متوسط در ناحیه گرمایش ثبت شده‌اند. نسبت مصرف انرژی گرم‌کننده‌های ترکیبی به گرمای تغذیه شده توسط کوره مقدار بازده توزیع است. در پایان هر تست گرمایش ترکیبی یک تست در حالت پایا اجرا می‌شود. در این تست ترموستات به گونه‌ای تنظیم می‌شود که کوره بطور ثابت برای یک دوره زمانی طولانی راه‌اندازی شود. داده‌های دمایی نیز طی این تست ثبت می‌شوند. انجام این تست تخمینی از افزایش دمای حالت پایا در امتداد کوره فراهم می‌کند که می‌تواند جهت بدست‌آوردن تخمینی از جریان در سیستم تهویه هوا استفاده شود. دماهای رجیستر تغذیه در این تست با نرخ جریان رجیستر اندازه‌گیری شده ترکیب شده و در صورتی که همه داکت‌ها خارج از فضای تهویه باشند؛ می‌توانند جهت بدست‌آوردن تخمینی از بازده تحویل حالت پایا بکار روند. این اطلاعات همچنین می‌توانند در رفع اشکال سایر اندازه‌گیری‌ها، مخصوصاً دماهای محیط تغذیه، بکار روند.

علاوه بر تست‌های گرمایش ترکیبی، سایر اندازه‌گیری‌ها در تست هر یک از خانه‌ها برای کمک به تحلیل داده‌ها و نیز مجاز بودن برای کاربرد مستقیم و مقایسه مدل بازده داکت‌ها انجام شدند. این اندازه‌گیری‌ها شامل نشست محیط با استفاده از طرف دمنده در حالت کاهش فشار (در دو حالت رجیستر درزگیری شده و درزگیری نشده)، نشست داکت با استفاده از یک افزایش دهنده فشار داکت و غیره می‌باشند.

نتایج

مقاله حاضر الزاماً تمامی اطلاعات مندرج در مرجع [۱۳] را مورد توجه قرار نداده است. دسته کاملی از نتایج را می‌توان در مرجع [۸] یافت. در جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج مرتبط با بازده توزیعی تست‌های ترکیبی ارائه شده است. ستون اول بازده احتراق برای هر کوره را نشان می‌دهد. بهر حال بازده احتراق از قبل از بروزرسانی سیستم تا بعد از بروزرسانی سیستم در بسیاری از موارد دچار تغییر می‌شود که این تغییر عموماً کوچک بوده و به صورت یک تک مقدار برای هر دو مورد استفاده شده است. چهار ستون بعدی جدول به نتایج قبل و بعد از بروزرسانی بازده کلی سیستم و بازده توزیع داکت تفکیک شده‌اند. ستون آخر ذخائر تخمین زده شده ناشی از بروزرسانی است. ذخائر که به صورت کاهش در خروجی کوره تعریف شده‌اند به این صورت محاسبه می‌شوند:

$$100 \times (\text{بازده توزیع پس از بروزرسانی}) / (\text{بازده توزیع پیش از بروزرسانی}) - 1 \quad (16)$$

جدول ۲: نتایج بازده اندازه‌گیری شده

ذخیره ها (%)	بازده پس از بروز رسائی (%)		بازده پیش از بروز رسائی (%)		بازده احتراق (%)	مکان
	توزیع	سیستم	توزیع	سیستم		
۱۳.۷	۷۰.۶	۵۵.۹	۶۰.۹	۴۷.۹	۷۷.۶	۱
۱۰.۵	۷۷.۱	۵۹.۷	۶۹.۰	۵۳.۶	۷۴.۵	۲
۱۴.۶	۷۷.۳	۵۵.۱	۶۶.۰	۴۶.۹	۷۰.۰	۳
۲۳.۳	۷۸.۵	۶۱.۳	۶۰.۲	۴۶.۶	۷۶.۰	۴
۲۵.۱	۸۷.۳	۶۸.۰	۶۵.۴	۵۰.۷	۷۴.۵	۵
۹.۴	۷۳.۴	۵۶.۷	۶۶.۵	۵۱.۱	۷۶.۰	۶
۱۶.۱	۷۷.۴	۵۹.۴	۶۴.۷	۴۹.۵	۷۵.۴	میانگین

اختلاف دماهای مورد نیاز مدل در جدول ۳ نمایش داده شده است. در مواردی که داکت‌های تغذیه و یا بازگشت از بیش از یک فضا عبور می‌کنند (به عنوان مثال فضای خزشی، در حفره‌های دیوار خارجی، و مابین طبقات) اختلاف دما بر مبنای دمای منطقه مؤثر داکت محاسبه شده است. دماها میانگین‌هایی از دوره‌های چرخه کوره که در محاسبات راندمان‌ها در جدول ۲ استفاده شده‌اند، می‌باشند.

جدول ۳: اختلاف دماهای وابسته

مکان	اختلافات دمای پس از بروز رسائی (°C)				اختلافات دمای پیش از بروز رسائی (°C)			
	ΔT_e	ΔT	ΔT_r	ΔT_g	ΔT_e	ΔT	ΔT_r	ΔT_g
۱	۲۷.۴۷	۱۶.۷۴	۶.۲۸	۷.۳۶	۲۷.۷۰	۱۹.۱۱	۵.۷۷	۴.۷۸
۲	۲۸.۴۳	۱۶.۸۰	۱۰.۵۲	۱۰.۵۲	۲۸.۰۱	۱۳.۹۵	۸.۷۸	۷.۷۸
۳	۲۸.۶۹	۲۳.۷۶	۱۲.۸۸	۱۲.۸۸	۲۸.۰۹	۲۲.۹۸	۱۲.۱۰	۱۲.۱۰
۴	۲۸.۴۴	۱۴.۰۴	۱۶.۹۵	۱۴.۰۵	۲۸.۵۰	۱۴.۲۹	۱۴.۴۶	۶.۲۰
۵	۴۴.۰۸	۱۵.۶۳	۵.۵۹	۷.۱۶	۴۱.۴۶	۱۷.۲۶	۵.۰۸	۷.۷۴
۶	۳۶.۳۹	۱۵.۶۴	۱۲.۴۱	۱۲.۴۷	۳۶.۶۷	۱۷.۸۲	۱۴.۵۹	۱۲.۹۴
میانگین	۳۳.۹۲	۱۷.۱۰	۱۰.۷۷	۱۰.۷۴	۳۳.۴۰	۱۷.۵۷	۱۰.۱۳	۸.۵۹

نتایج مدل‌سازی شده

اهمیت اصلی تلاش برای مدل‌سازی، بدست آوردن تخمین‌هایی از بازده توزیع برای هر مورد پیش از بروز رسائی و پس از آن است. علاوه بر اختلافات دمای ذکر شده در جدول ۳، پارامترهای مورد نیاز برای اندازه‌گیری بازده توزیع، بازده‌های نشت α_s و α_r و بازده‌های رسانش β_s و β_r هستند. جدول ۴، نشت تغذیه و بازگشت و بازده رسانشی و نیز بازده تحویل مدل شده η_0 در طول چرخه را در هر دو حالت قبل و بعد از بروز رسائی نشان می‌دهد.

جدول ۴: بازده‌های رسانش و نشت و بازده تحویل مدل‌سازی شده در طول چرخه

مکان	پیش از بروز رسانی					پس از بروز رسانی				
	$\eta_0 (\%)$	β_r	α_r	β_s	α_s	$\eta_0 (\%)$	β_r	α_r	β_s	α_s
۱	۶۵.۴	۰.۹۷۷	۰.۹۱۵	۰.۸۴۹	۰.۸۴۷	۷۶.۴	۰.۹۷۸	۰.۹۴۹	۰.۸۹۳	۰.۹۱۶
۴	۶۰.۴	۰.۸۲۶	۰.۴۸۵	۰.۸۹۱	۰.۷۸۲	۸۲.۴	۰.۸۶۸	۰.۹۶۸	۰.۹۶۱	۰.۹۰۱
۵	۶۵.۱	۰.۹۷۴	۰.۷۶۳	۰.۹۱۸	۰.۸۲۳	۸۲.۸	۰.۹۷۴	۰.۹۴۶	۰.۹۲۳	۰.۹۵۰
۶	۶۰.۰	۰.۹۴۱	۰.۹۵۹	۰.۸۹۳	۰.۷۲۱	۸۱.۲	۰.۹۴۱	۰.۹۸۰	۰.۹۰۵	۰.۹۵۶
۷	۶۰.۸	۰.۹۶۹	۰.۷۶۵	۰.۸۲۹	۰.۸۲۶	۹۰.۷	۰.۹۶۲	۰.۸۵۱	۰.۹۶۹	۰.۹۸۳
۸	۶۰.۰	۰.۹۱۱	۰.۸۰۵	۰.۸۷۴	۰.۷۹۰	۷۲.۳	۰.۹۱۲	۰.۹۲۷	۰.۸۸۰	۰.۸۹۳
میانگین	۶۲.۰	۰.۹۲۲	۰.۷۸۲	۰.۸۵۶	۰.۷۹۸	۷۹.۳	۰.۹۲۸	۰.۹۳۷	۰.۹۰۱	۰.۹۳۳

در سه مورد از شش خانه مورد بحث در این مقاله (خانه‌های ۳، ۶ و ۸)، به تعداد کافی از دماهای رجیستر تغذیه اندازه گرفته شده و همچنین یک بازده تحویل اندازه‌گیری شده در طول تست حالت پایا بدست آمد. زمانی که دماهای بدست آمده در طول تست حالت پایا با این مقادیر در طول چرخه متفاوت هستند، یک بازده تحویل حالت پایای مدل شده در هریک از این سه مکان برای مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، محاسبه شد. این بازده‌ها در جدول ۵ در طول اختلاف بین مقادیر حالت پایای اندازه‌گیری شده و مدل شده نشان داده شده‌اند.

جدول ۵: بازده تحویل مدل سازی شده در مقابل اندازه‌گیری شده تحت شرایط حالت پایا

مکان	پیش از بروز رسانی					پس از بروز رسانی				
	$\eta_0 (\%)$	β_r	α_r	β_s	α_s	$\eta_0 (\%)$	β_r	α_r	β_s	α_s
۱	۶۵.۴	۰.۹۷۷	۰.۹۱۵	۰.۸۴۹	۰.۸۴۷	۷۶.۴	۰.۹۷۸	۰.۹۴۹	۰.۸۹۳	۰.۹۱۶
۴	۶۰.۴	۰.۸۲۶	۰.۴۸۵	۰.۸۹۱	۰.۷۸۲	۸۲.۴	۰.۸۶۸	۰.۹۶۸	۰.۹۶۱	۰.۹۰۱
۵	۶۵.۱	۰.۹۷۴	۰.۷۶۳	۰.۹۱۸	۰.۸۲۳	۸۲.۸	۰.۹۷۴	۰.۹۴۶	۰.۹۲۳	۰.۹۵۰
۶	۶۰.۰	۰.۹۴۱	۰.۹۵۹	۰.۸۹۳	۰.۷۲۱	۸۱.۲	۰.۹۴۱	۰.۹۸۰	۰.۹۰۵	۰.۹۵۶
۷	۶۰.۸	۰.۹۶۹	۰.۷۶۵	۰.۸۲۹	۰.۸۲۶	۹۰.۷	۰.۹۶۲	۰.۸۵۱	۰.۹۶۹	۰.۹۸۳
۸	۶۰.۰	۰.۹۱۱	۰.۸۰۵	۰.۸۷۴	۰.۷۹۰	۷۲.۳	۰.۹۱۲	۰.۹۲۷	۰.۸۸۰	۰.۸۹۳
میانگین	۶۲.۰	۰.۹۲۲	۰.۷۸۲	۰.۸۵۶	۰.۷۹۸	۷۹.۳	۰.۹۲۸	۰.۹۳۷	۰.۹۰۱	۰.۹۳۳

برای مدل کردن بازده‌های توزیع در هر مکان، تخمین‌هایی از فاکتورهای بازیافت سمت بازگشت و تغذیه همراه با تخمین‌هایی از نفوذ طبیعی مورد نیاز هستند. فاکتورهای بازیافت f_r و f_s بر مبنای بازیابی ویژه از مناطقی که داکت‌ها واقع شده‌اند، تخمین زده شده و به عنوان نسبت نرخ جابجایی گرما از طریق محیط به درون خانه به نرخ جابجایی گرمای کلی تعریف شده‌اند. به داکت‌هایی که در دیوارهای خارجی قرار گرفته‌اند؛ فاکتور بازیافت ۰/۵ اختصاص داده شده است. ملاحظات مهم در تخمین فاکتورهای بازیافت، عایق کاری، مواد ساختمانی بکار رفته، اتلاف حرارت به زمین و نفوذ از طریق فضاهاى حائل مانند فضاهاى خزشی و زیر شیروانی‌ها هستند.

جدول ۶، فاکتورهای بازیافت تخمینی f_r و f_s و نیز شرایطی را که تعیین‌کننده برهمکنش نشت نامتوازن با نفوذ طبیعی η_{in} می‌باشد را نشان می‌دهد. فاکتورهای بازیافت نسبتاً بالا برای مکان ۲ ناشی از عدم عایق کاری کف ساختمان می‌باشد. شرایط برهم‌کنش نفوذ منفی نشان‌دهنده حاکم شدن نشت بازگشت و افزایش بازده مقایسه شده با صرف نظر از شرایط می‌باشد.

جدول ۶: فاکتورهای بازیافت و شرایط برهم‌کنش نفوذ

مکان	پیش از بروزرسانی			پس از بروزرسانی		
	η_m	f_r	f_s	η_m	f_r	f_s
۱	۰.۰۹۳	۰.۰۳۶	۰.۰۹۳	۰.۰۲۳۵	۰.۰۳۶	۰.۰۹۳
۲	۰.۱۷۳	۰.۱۷۳	۰.۱۷۳	-۰.۰۵۴۵	۰.۱۷۳	۰.۱۷۳
۳	۰.۰۴۳	۰.۰۴۳	۰.۰۴۳	-۰.۰۲۴۵	۰.۰۴۳	۰.۰۴۳
۴	۰.۰۵۵	۰.۰۳۵	۰.۰۵۵	۰.۰۵۹۷	۰.۰۳۵	۰.۰۵۵
۵	۰.۰۶۷	۰.۰۳۸	۰.۰۶۷	-۰.۰۱۲۷	۰.۰۳۸	۰.۰۶۷
۶	۰.۰۳۲	۰.۰۶۷	۰.۰۳۲	۰.۰۰۳۶	۰.۰۶۷	۰.۰۳۲
میانگین	۰.۰۷۷	۰.۰۶۵	۰.۰۷۷	-۰.۰۰۰۰۸	۰.۰۶۵	۰.۰۷۷

در مکان‌های ۲ و ۳ که فاکتورهای بازیافت تغذیه و بازگشت یکسان هستند، معادله ۱۴ را می‌توان برای محاسبه بازده توزیع مدل‌سازی شده بکار برد. برای دیگر خانه‌ها، معادله ۱۵ می‌بایست استفاده شود. دو بخش اول از جدول ۷، نتایج بازده توزیع مدل‌سازی شده را با نتایج اندازه‌گیری شده از جدول ۲ مقایسه می‌کند. بخش نهایی از جدول ۷ نیز ذخائر انرژی اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده را همانگونه که با معادله ۱۶ محاسبه شد، مقایسه می‌کند.

جدول ۷: بازده توزیعی مدل‌سازی شده در مقابل اندازه‌گیری شده

مکان	۱۷٪ پیش از بروزرسانی		۱۷٪ پس از بروزرسانی		ذخیره‌سازی‌ها(٪)	
	مدل‌سازی شده	اندازه‌گیری شده	اختلاف	اختلاف	مدل‌سازی شده	اندازه‌گیری شده
۱	۶۵.۸	۶۰.۹	۴.۹	۷۷.۳	۱۳.۷	۱.۲
۲	۷۱.۳	۶۹.۰	۲.۳	۸۳.۹	۱۰.۵	۴.۵
۳	۶۸.۶	۶۶.۰	۲.۶	۸۲.۸	۱۴.۶	۲.۵
۴	۵۶.۱	۶۰.۲	-۴.۱	۸۱.۶	۲۳.۳	۷.۹
۵	۶۴.۳	۶۵.۴	-۱.۱	۹۳.۴	۲۵.۱	۶.۱
۶	۶۰.۸	۶۶.۵	-۵.۷	۷۲.۴	۹.۴	۶.۶
میانگین	۶۴.۵	۶۴.۷	-۰.۲	۸۱.۹	۱۶.۱	۴.۸

دلیل اینکه چرا فاکتورهای بازیافت ممکن است بطور نادرست تخمین زده شده باشند؛ ناشی از طبیعت تخمین است. زمانی که پیش‌بینی‌ها به بازرسی و ارزیابی بصری وابسته باشند؛ نادیده گرفتن خصوصیات می‌تواند منجر به خطا شود. برای مثال یکی از مهمترین جزئیات در خانه‌های تحت آزمایش، مقدار عایق کاری کف خانه می‌باشد. اگر در بعضی از قسمت‌ها عایق کاری از بین رفته و یا فشرده شده باشد و این نواحی مورد غفلت واقع شوند، تخمین‌های بازیافت ممکن است نادرست باشند. با عنایت به مندرجات موجود در نشریات مختلف مربوط به فاکتورهای بازیافت، می‌توان پذیرفت که بیشتر تخمین‌ها بطور قابل قبولی به مقدار صحیح نزدیک هستند. این موضوع مخصوصاً در مواردی که دیواره داکت به خوبی عایق کاری شده باشد، درست است. چون بخش وسیعی از تلفات داکت از این طریق خارج می‌شود.

نتیجه‌گیری

فناوری تبرید جذبی روشی عالی برای تهویه مطبوع مرکزی در تأسیساتی است که ظرفیت دیگ اضافی داشته و می‌توانند بخار یا آب داغ مورد نیاز برای راه اندازی چیلر را تأمین نمایند. چیلرهای جذبی ظرفیت بین ۲۵ تا ۱۲۰۰ تن برودتی را براحتی تأمین می‌کنند. البته قابل ذکر است که برخی از تولید کنندگان ژاپنی موفق شده اند چیلرهای جذبی



با ظرفیت معادل ۵۰۰۰ تن نیز تولید کنند. در سیستمهای جذبی غالباً از آب به عنوان مبرد استفاده می شود. گرمای مورد نیاز برای کارکرد این چیلرها به طور مستقیم از گاز طبیعی یا گازوئیل تأمین می گردد . منابع غیر مستقیم گرما در چیلرهای جذبی آب داغ بخار پر فشار و کم فشار عبارتند از .بر این اساس تولید کنندگان مختلف در جهان سه نوع اصلی چیلر جذبی شعله مستقیم ، بخار و آب داغ ارائه می نمایند. یک مدل ساده صرفاً برای پیش‌بینی بازده توزیع حالت پایا برای چند مجتمع مجهز به سیستم تهویه بکار برده شده و با نتایج بازده قبل و بعد از برورسانی بدست‌آمده با استفاده از روش ترکیبی دوره کوتاه مقایسه شده است. گزارش‌های مدل برای برهمکنش پیچیده بین سیستم‌های داکت تغذیه و بازگشت، بین تلفات رسانش و نشت و بین نشت داکت نامتوازن و نفوذ طبیعی ارائه شده‌اند. بعلاوه برای پیش‌بینی ذخائر میانگین قابل مقایسه نسبت به مواردی که بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده هستند، مدل با موفقیت بین آن محل‌هایی که بیشترین ذخیره‌سازی و آنهایی که کمترین ذخیره‌سازی را دارند تمیز می‌دهد. در بعضی از موارد یک فضا با اندکی ذخیره‌سازی بیشتر نسبت به فضایی دیگر که ذخیره‌سازی مدل‌سازی شده آن اندکی کمتر است؛ مبنای نتایج اندازه‌گیری شده قرار گرفته است.

مراجع

- [1] M. Modder, Residential duct system leakage: magnitude, impacts and potential for reduction, ASHRAE Transactions, 1989.
- [2] J. Ulson, L. Palmiter, B. Dawis, M. Gefon, T. Bound, Field measurements of the heating efficiency of electric forced-air systems in 24 homes, Prepared for the Washington State Energy Office under contract No. 90-05-12, 1993.
- [3] L. Paulmiter, J.R. Ulson, P.W. Francisco, Measured efficiency improvements from duct retrofits on six electrically heated homes, Electric Power Research Institute report TR-104426, 1995.
- [4] D.A. Jaump, I.S. Walker, M.P. Modera, Field measurements of efficiency and duct retrofit effectiveness in residential forced air distribution systems, Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1996.
- [5] J. Siegel, B. Davis, P. Francisco, L. Paulmiter, Measured heating system efficiency retrofits in eight manufactured (HUD-code) homes, Electric Power Research Institute report TR-107737, 1997.
- [6] L. Paulmiter, P.W. Francisco, Development of a practical method for estimating the thermal efficiency of residential forced-air distribution systems, Electric Power Research Institute report TR-107744, 1997.
- [7] ASHRAE, ASHRAE Standard 152P: method of test for determining the steady-state and seasonal efficiencies of residential thermal distribution systems, American Society of Heating, Refrigerating, and Air- Conditioning Engineers, 1996.
- [8] B. Davis, J. Siegel, P. Francisco, L. Paulmiter, Measured and modeled heating efficiency of eight natural gas-heated homes, Prepared for Puget Sound Energy (formerly Washington Natural Gas) by Ecotope, Seattle, WA, 1998.
- [9] ASHRAE, ASHRAE 1993 Handbook--Fundamentals, Chap. 23, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1993.
- [10] L. Paulmiter, T. Bound, Modeled and measured infiltration: a detailed case study of four electrically heated homes, Electric Power Research Institute report CU-7327, 1991.
- [11] L. Paulmiter, T. Bound, Interaction of mechanical systems and natural infiltration, Proceedings of the AIVC Conference on Air Movement and Ventilation Control Within Buildings, 1991.
- [12] L. Paulmiter, T Bound, Impact of mechanical systems on ventilation and infiltration in homes, Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 1992.

- [13] W. Paul, P.W. Francisco, L. Paulmiter, Bob Davis, Modeling the thermal distribution efficiency of ducts: comparisons to measured results, Energy and Buildings, 28, 1998, 287-297.

