

رابطه‌ای برای پیش‌بینی ساعت به ساعت دمای پانل‌های فلزی با دمای متغیر تطبیقی در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی

مهدی معرفت^{۱*}، امیر امیدوار^۲

۱- دانشیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳ - ۱۴۱۱۵

Maerefat@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

چکیده - شرایط محیط داخل ساختمان و بار بروی اعمال شده به آن، به شدت به شرایط محیط خارج وابسته است. شرایط محیط خارج ساختمان نیز در طول شبانه‌روز دائماً در حال تغییر است؛ لذا فرض وجود شرایط ثابتی برای فضای داخل ساختمان به عنوان شرایط آسایش حرارتی چندان قابل توجیه نیست. به نظر می‌رسد که با تغییر شرایط عملکرد سیستم، متناسب با تغییرات محیط خارج بتوان با حفظ شرایط آسایش حرارتی، در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی کرد. در این مقاله تأثیر استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی در عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی بررسی، با عملکرد پانل‌های دما ثابت مقایسه شده است. نتایج بررسی‌های ساعت به ساعت حاکی از آن است که در تهران با بیشینه رطوبت نسبی ۶۵٪، در ساختمانهایی که پنجره و دیوار خارجی شمالی یا جنوبی دارند؛ تقریباً در ۱۰ ساعت از شبانه‌روز به‌هیچ‌گونه وسیله سرمایشی نیاز نیست. در سایر ساعات نیز می‌توان با استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی، در شرایط تهویه طبیعی و بدون نگرانی از احتمال رخداد میعان، شرایط آسایش حرارتی را فراهم کرد. این در حالی است که در ساختمانهایی که جهت غربی یا شرقی دارند، فقط در ۷ ساعت از شبانه‌روز نیاز به سیستم‌های سرمایشی احساس نمی‌شود. در این‌گونه ساختمانها در برخی از ساعات فعالیت سیستم، امکان رخداد میعان وجود دارد. در این بازه‌های زمانی می‌توان به کمک تهویه مکانیکی و افزایش تعداد دفعات تعویض هوا، احتمال رخداد میعان را به حداقل رسانید. بررسی‌های انجام شده روی سیستم‌های سرمایش سقفی با پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی نشان داد که با استفاده از سیستم‌های تطبیقی، بسته به جهت پنجره و دیوار خارجی ساختمان، با حفظ شرایط آسایش حرارتی می‌توان ۲۹ تا ۴۵ درصد نسبت به سیستم‌های دما ثابت در مصرف انرژی اولیه صرفه‌جویی کرد.

کلید واژگان: سرمایش سقفی، تابش، دمای تطبیقی، مصرف انرژی، آسایش حرارتی.

۱- مقدمه

دارند. اغلب سیستم‌های مرسوم بر مبنای انتقال جابه‌جایی حرارت عمل می‌کنند. اینگونه سیستم‌ها مستقیماً هوای داخل ساختمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تمامی

سیستم‌های سرمایش و گرمایش، شرایط آسایش حرارتی را برای ساکنان ساختمان فراهم می‌کنند و انواع مختلفی

سیستم‌های تهویه مطبوع اعم بر مسکونی، اداری یا صنعتی دو وظیفه اصلی را بسته به کاربرد ساختمان بر عهده دارند؛ یکی جبران بارهای حرارتی و برودتی و دیگری تعویض هوا و کنترل آلاینده‌های هوای داخل سیستم‌های سرمایش و گرمایش جابه‌جایی هر دو وظیفه را به‌طور همزمان انجام می‌دهند؛ به‌طوری‌که برای گرمایش، از وزش هوای گرم و برای سرمایش از وزش هوای سرد بهره می‌برند. احساس سرمای موضعی مخصوصاً در ناحیه تحتانی بدن و همچنین گرادیان عمودی دما دو پارامتر عمده در نارضایتی حرارتی ساکنان ساختمان محسوب می‌شوند [۱]. در ساختمانهایی که از سیستم‌های جابه‌جایی استفاده می‌کنند، به‌دلیل اینکه وزش هوا در داخل ساختمان کاملاً محسوس است، ساکنان اغلب از احساس سرمای موضعی در برخی نقاط بدن شکایت دارند. در کنار سیستم‌های جابه‌جایی، سیستم‌های گرمایش و سرمایش دیگری به‌نام سیستم‌های تابشی وجود دارند. عملکرد اینگونه سیستم‌ها بر مبنای انتقال جابه‌جایی حرارت و تابش استوار است؛ البته نقش تابش چشمگیرتر است [۲]. در سیستم‌های تابشی به‌دلیل عدم وزش هوا، نارضایتی حرارتی موضعی کاهش یافته و همچنین عملکرد تابشی اینگونه سیستم‌ها باعث از بین رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل ساختمان می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که سیستم‌های تابشی، شرایط آسایش حرارتی مطلوبتری را در ساختمان فراهم سازند [۱]. امروز سیستم‌های تابشی به شکلهای مختلفی استفاده می‌شوند. مرسوم‌ترین روش، استفاده از پانل‌های فلزی در سقف و یا لوله‌های دفن شده در سقف، دیوارها یا کف ساختمان است. در ایران در سالهای اخیر استفاده از سیستم‌های تابشی رو به افزایش بوده است، به‌طوری‌که در سالهای اخیر سیستم‌های گرمایش تابشی از جمله

سیستم‌های گرمایش از کف هیدرونیک توانسته است جای خود را در زمره سیستم‌های گرمایش ساختمان باز کند و استفاده از پانل‌های سرمایش سقفی به‌تازگی نظر طراحان ساختمان را به خود جلب کرده است. بررسی آمارها و داده‌های هواشناسی در ۵ سال اخیر در تهران نشان می‌دهد که در فصل گرم دمای نقطه شبنم به‌ندرت از 17°C تجاوز می‌کند [۳]. بنابراین به‌نظر می‌رسد که در تهران، پدیده میعان که یکی از عمده‌ترین عوامل محدود کننده در استفاده از سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی است، چندان مشکل‌ساز نیست.

سیستم‌های سرمایش سقفی در ابتدا در شمال اروپا مورد توجه قرار گرفت و حتی در شمال غرب اروپا - که آب و هوایی خشک و ملایم دارد - به‌عنوان یکی از جایگزین‌های سیستم‌های سرمایشی مطرح شد [۴]. اما این سیستم‌ها نتوانستند تا مدتها در بازار امریکا نفوذ پیدا کنند. استقبال نشدن از این سیستم‌ها در امریکا، چند دلیل مهم و اساسی داشت که از آن میان می‌توان به میعان بخار آب بر روی پانل‌ها و محدودیت ظرفیت سرمایشی اشاره کرد. البته قیمت اولیه نسبتاً زیاد این سیستم‌ها نیز چندان بی‌تأثیر نبود [۴].

علی‌رغم تمامی ویژگیهای مثبتی که برای سیستم‌های سرمایش سقفی ذکر شد، میعان یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین معایب این سیستم‌ها است. در برخی از مناطق که رطوبت هوا نسبتاً زیاد است، مانند بخشهایی از امریکا و قسمتهایی از آسیا مانند ژاپن و هنگ‌کنگ، بخار آب موجود در هوا بر روی پانل‌های سرد سقفی میعان یافته و آب از سقف چکه می‌کند. در واقع سیستم‌های سرمایش سقفی، فقط قادر به جبران بار برودتی محسوس هستند و بار نهان را نمی‌توانند منتقل کنند. به‌همین علت میعان یکی از مشکلات عمده اینگونه سیستم‌ها است.

یکی دیگر از معایب پانل‌های سرمایش سقفی، عدم کنترل آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید کربن در محیط داخل است. این محدودیتها محققان را بر آن داشت تا به دنبال روشهایی برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها باشند. تاکنون تحقیقات زیادی در راستای برطرف ساختن این نقایص انجام شده و راهکارهای متعددی نیز پیشنهاد شده است. یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین روشهای پیشنهاد شده، استفاده از سیستم‌های تهویه مجزا در کنار پانل‌های سرمایش سقفی است. در این روش، تهویه و سرمایش به‌طور مستقل از یکدیگر صورت می‌گیرد.

تحقیقات انجام شده توسط فیتزner^۱ حاکی از آن است که با استفاده از پانل‌های سرمایش سقفی همراه با سیستم‌های تهویه جانشینی (D.V)^۲، می‌توان بدون ایجاد سرمایش موضعی^۳، شرایط آسایش حرارتی مطلوب را فراهم کرد [۱]. در این روش به دلیل اینکه بار سرمایشی از طریق پانل‌های سقفی تحمل می‌شود، لازم نیست دمای هوای ورودی ساختمان خیلی کم باشد. زیرا ورود هوای تازه به داخل ساختمان، تنها ناشی از تعویض هوا و کاهش آلاینده است و نقشی در سرمایش ساختمان و جبران بار برودتی اعمال شده به آن ندارد. در مواردی که تهویه ساختمان به‌صورت مکانیکی صورت می‌گیرد وزش در داخل ساختمان نسبت به حالت تهویه طبیعی محسوس‌تر است. اما در حالتی که تهویه مکانیکی و پانل‌های سرمایش سقفی به‌طور ترکیبی استفاده می‌شود، دمای هوای وزشی به اندازه سیستم‌های سرمایش جابه‌جایی پایین نیست. لذا آثار سرمایش موضعی در این موارد نسبت به حالت سرمایش جابه‌جایی بسیار اندک است.

به‌منظور کاهش احتمال رخداد میعان بر روی پانل‌های سرمایش سقفی، نوریکو^۴ و همکاران در ژاپن تحقیقات گسترده‌ای را انجام دادند [۱]. آنها دریافتند که با ایجاد جریان اندک هوا در داخل ساختمان، علاوه بر حفظ شرایط آسایش حرارتی می‌توان در رطوبتهای نسبتاً زیاد نیز از ایجاد میعان جلوگیری کرد. در مورد استفاده از پانل‌های سرمایش سقفی در مناطق گرم و مرطوب نیز بررسیهایی انجام شده و تحقیقات نشان داده است که استفاده از پانل‌های سرمایش تابشی سقفی در کنار سیستم‌های سرمایش خشک‌کننده^۵ در این مناطق عملکرد بسیار مطلوبی دارد [۵]. در این موارد کنترل رطوبت نسبی و کنترل دما به‌طور مستقل صورت می‌گیرد، رطوبت نسبی به کمک چرخ انتالپی و دما به کمک پانل‌های سقفی کنترل می‌شود. بررسیهای انجام شده در هنگ‌کنگ با تابستانهای طولانی، گرم و مرطوب که دمای نقطه شبنم اغلب به بالاتر از ۲۲°C می‌رسد، نشان داده است که استفاده از پانل‌های سرمایش سقفی همراه با سیستم‌های سرمایش خشک‌کننده، مصرف اولیه انرژی را نسبت به سیستم‌های سنتی سرمایش جابه‌جایی به اندازه ۴۴٪ کاهش می‌دهد [۵].

مجموعه‌ای از بررسیهای تجربی و عملی نیز در زمینه تأثیر نحوه تهویه ساختمان اعم بر تهویه اختلاطی^۶ و تهویه جانشینی، بر عملکرد سیستم‌های سرمایش سقفی و مزایا و معایب هر یک از این روشها انجام شده است [۶]. میومما^۷ و همکاران تحقیقاتی را در مورد تأثیر تهویه مکانیکی ساختمان بر افزایش ظرفیت سرمایشی پانل‌های سرمایش سقفی فلزی انجام دادند [۷]. آنان در سال ۲۰۰۴ میلادی نیز روش تحلیلی و ساده‌ای را برای تخمین ظرفیت سرمایشی پانل‌های سرمایش سقفی فلزی ارائه

4. Noriko

5. Desiccant Cooling

6. Mixing Ventilation

7. Mumma

1. Fitzner

2. Displacement Ventilation

3. Draft

کردند [۴]. تحقیقات میریل^۱ و همکاران حاکی از آن است که پانل‌های سرمایش سقفی، در حالت گرمایشی نیز عملکرد نسبتاً مطلوبی دارند و از این سیستم‌ها می‌توان در زمستان به‌عنوان سیستم‌های گرم‌کننده استفاده کرد [۸]. همانطور که دیده می‌شود استفاده از پانل‌های سرمایش تابشی از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی عملکرد نسبتاً خوبی دارند. در بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه، شرایط آسایش حرارتی در کنار مطالعه و تحلیل مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. اما در تمامی این تحقیقات شرایط ثابت و مشخصی به‌عنوان شرایط آسایش حرارتی بر محیط داخل حکمفرما بوده است. از آنجاکه شرایط محیط خارج ساختمان همواره در حال تغییر است، لذا اعمال شرایط ثابتی در فضای داخل ساختمان در مدت شبانه‌روز چندان معقول نیست. به‌نظر می‌رسد که اگر سیستم‌های تهویه مطبوع به‌گونه‌ای طراحی شوند که خود را با تغییر شرایط محیط خارج و به‌تبع آن تغییر بار حرارتی و بروودی اعمال شده به فضا تطبیق دهند، بتوان تا حد زیادی از مصرف انرژی در ساختمان کاست. برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه آسایش حرارتی تطبیقی حاکی از این است که استفاده از این روش می‌تواند مصرف انرژی در ساختمان را تا حد زیادی کاهش دهد [۹]. به‌منظور دستیابی به شرایط آسایش حرارتی تطبیقی لازم است ارتباطی بین دمای عملکرد سیستم و دمای محیط خارج برقرار شود. ASHRAE-55 برای سیستم‌های جابه‌جایی رابطه بین دمای آسایش حرارتی و دمای هوای محیط خارج را به‌صورت معادله (۱) بیان کرده است [۱۰، ۱۱].

$$T_{\text{comf}} = 0.31T_{\text{out}} + 17/8 \quad (1)$$

1. Miriel

حیدری در ناحیه ایلان در زمینه رابطه دمای آسایش و دمای محیط خارج در ساختمانهایی که به‌طور طبیعی تهویه می‌شوند و از سیستم‌های سنتی جابه‌جایی استفاده می‌کنند، تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده است [۱۱]. وی رابطه مشابهی را ارائه کرده است.

$$T_{\text{comf}} = 0.36T_{\text{out}} + 17/3 \quad (2)$$

تحقیقات نشان داده است که تهویه طبیعی می‌تواند به‌نوعی، رابطه‌ای خطی را بین دمای کارکرد^۲ و دمای محیط خارج ساختمان فراهم سازد [۱۰]. اما در مورد سیستم‌های سرمایش تابشی، توجه به دو نکته لازم و ضروری است، یکی اینکه در مواردی که از این سیستم‌ها استفاده می‌شود به‌دلیل جلوگیری از میعان و همچنین افزایش عملکرد این سیستم‌ها اغلب لازم است که از تهویه مکانیکی استفاده شود و دوم اینکه در فضاهایی که سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی به‌کار گرفته می‌شوند، دمای عملکرد، بیشتر از آنکه متأثر از دمای هوای داخل ساختمان باشد، تحت تأثیر دمای متوسط تابش قرار می‌گیرد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که در چنین شرایطی با کنترل دمای پانل‌های سقفی بتوان شرایط تطبیقی را فراهم ساخت.

هدف اصلی در این مقاله بررسی تأثیر استفاده از پانل‌های سرمایش تابشی سقفی فلزی با دمای متغیر، بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی است. بدین‌منظور با بررسیهای ساعت به ساعت، دمای مناسب برای پانل‌های فلزی سقفی به‌منظور ایجاد شرایط آسایش حرارتی مطلوب در کل ساعتهای شبانه‌روز محاسبه شده است. پارامتر ثابت زمانی در پانل‌های فلزی بسیار کوچک است (کمتر از ۵ دقیقه) [۴]. کوچک بودن ثابت زمانی در این‌گونه سیستم‌ها ایجاد شرایط دمای متغیر و تطبیقی را

2. Operative Temperature

برای پانل‌ها امکان‌پذیر می‌سازد. از سوی دیگر مدل‌های مرسوم آسایش حرارتی که در محاسبات و بررسی‌ها استفاده می‌شوند اغلب در شرایط دائم یا شبه‌دائم معتبرند [۱۲]. کوچک بودن ثابت زمانی پانل‌های فلزی و عکس‌العمل سریع این‌گونه سیستم‌ها به تحریک‌های حرارتی محیطی، ایجاد شرایط دائم و یا شبه‌دائم را در مطالعه ساعت به ساعت تضمین می‌کند.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- مدلسازی فرایندهای تبادل حرارتی

بررسی تأثیر استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی در سیستم‌های سرمایش سقفی تابشی از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی بدون شناخت فرایندهای تبادل حرارتی در داخل ساختمان میسر نمی‌شود. بدین‌منظور از مدل انتقال حرارت چندگانه^۱ استفاده شده است. فضای داخل اتاق به‌صورت محیطی محصور^۲ شامل سیال غیرفعال (هوا) در نظر گرفته شده است. تحلیل فرایندهای انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی در داخل محیط محصور، از طریق نوشتن معادلات موازنه انرژی بر روی هر یک از سطوح داخلی و همچنین محیط غیرفعال انجام می‌شود. بدین‌ترتیب می‌توان معادلات تعادل انرژی را برای هر یک از سطوح داخلی اتاق به شکل زیر نوشت [۱۳]:

$$h_i A_i (T_{air} - T_i) + \varepsilon \sigma A_i \times \left\{ \sum_{j=1}^n F_{ij} (T_j^t - T_i^t) \right\} = Q_i \quad (3)$$

h_i ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر روی سطوح داخلی اتاق است. A_i مساحت سطوح داخلی، T_{air}

دمای هوای داخل، T_i دمای هر یک از سطوح داخلی، ε ضریب صدور تابشی سطوح داخلی، σ ثابت استفان - بولتزمان و Q_i بار برودتی اعمال شده به ساختمان از طریق سطح i ام است. Q_i شامل بار برودتی ناشی از جابه‌جایی و تابش به سطوح خارجی ساختمان است. این بار از طریق هدایت حرارتی به سطح داخلی دیوار منتقل شده است. مقادیر Q_i با توجه به جهت ساختمان، طول و عرض جغرافیایی محل، جنس مصالح ساختمانی به‌کار رفته در سطوح جانبی ساختمان، اندازه و نوع پنجره (دارای شیشه تک‌جدار یا دوجدار یا اینکه در پشت پنجره پرده وجود دارد) قابل محاسبه است. در این مقاله در محاسبه Q_i به‌صورت ساعت به ساعت از نرم‌افزار Carrier استفاده شده است. لازم است ذکر شود که در معادله (۳) فرض بر این است که سطوح داخلی اتاق سطوح پخش‌کننده خاکستری هستند. ضرایب F_{ij} در معادله (۳) از طریق روابط تحلیلی و همچنین نمودارهای مربوط قابل محاسبه است [۱۲، ۱۵].

در رابطه (۳)، h_i به نوع تهویه ساختمان بستگی دارد. در حالتی که تهویه ساختمان به‌طور طبیعی انجام می‌شود، انتقال حرارت جابه‌جایی در داخل ساختمان به‌صورت جابه‌جایی آزاد انجام می‌شود. در این نوع جابه‌جایی ضریب انتقال حرارت به دما وابسته است. در چنین مواردی h_i از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است [۱۴].

$$h_i = n \times (T_i - T_{air})^{1/4} \quad (4)$$

n برای سطوح افقی برابر ۱/۵۲ و برای سطوح عمودی برابر ۱/۳۱ است [۱۴]. لازم است ذکر شود که در این رابطه، h بر حسب (W/m^2K) به‌دست می‌آید. در شرایطی که تهویه ساختمان به‌صورت مکانیکی انجام می‌شود، مبادله انرژی بین سطوح داخلی اتاق و هوا از

1. Multimodal Heat Transfer
2. Enclosure

$$T = 0.5(T_{air} + T_{inf}) \quad (8)$$

\dot{V} دبی حجمی جریان هوای نفوذی به اتاق، V حجم اتاق، P فشار هوای محلی است. n تعداد دفعات تعویض هوای اتاق در ساعت است که بسته به کاربرد ساختمان (مسکونی، اداری و ...) متفاوت است. برای ساختمانهای مسکونی اغلب $n=1$ فرض می‌شود.

از حل دستگاه معادلات غیرخطی بالا، دمای هوا و دمای سطوح داخلی اتاق قابل محاسبه است. این دماها برای محاسبه شرایط آسایش حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که دمای پانل‌های فلزی همواره باید بیشتر از دمای نقطه شبنم باشد؛ در غیر این صورت پدیده میعان رخ می‌دهد. دمای نقطه شبنم به سهولت قابل محاسبه است [۱۶].

$$T_{dp} = T_{sat} @ P_v \quad (9)$$

$$P_v = (RH) \times \exp\left(18.7 - \frac{4030}{T_{air} + 235}\right) \quad (10)$$

$$T_{sat} @ P = 14.892 \times \ln(P) + 7.1445 \quad (11)$$

۲-۲- پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی بر مبنای مدل آسایش حرارتی فنگر

شرایط آسایش حرارتی عبارت است از شرایطی که بیشتر ساکنان ساختمان نسبت به آن احساس رضایت دارند. بدیهی است که به علت تفاوت‌های بیولوژیکی امکان ندارد که کلیه ساکنان به طور همزمان از شرایط محیط داخل احساس یکسانی داشته باشند. هدف اصلی، ایجاد بهینه‌ترین شرایط است به طوری که نارضایتی حرارتی افراد به حداقل برسد. به همین دلیل پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهترین و در عین حال کاربردی‌ترین

طریق جابه‌جایی ترکیبی صورت می‌شود، در چنین شرایطی h_i از طریق روابط (۵) محاسبه می‌شود [۷].

$$h_i = (h_{ni}^{r/2} + h_{fi}^{r/2})^{1/2} \quad (5-الف)$$

$$h_{ni} = \frac{2/175}{D_e^{0.796}} (T_{air} - T_i)^{0.8} \quad (5-ب)$$

$$h_{fi} = 4/25 W^{0.575} V^{0.557} \quad (5-ج)$$

که h_{ni} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد، h_{fi} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، D_e قطر هیدرولیکی اتاق، W عرض دیوار و V سرعت هوای داخل اتاق است.

در اغلب موارد وزش بر روی پانل‌ها محسوس‌تر است، لذا در چنین شرایطی جابه‌جایی ترکیبی فقط بر روی پانل‌های سقفی رخ می‌دهد و بر روی دیوارها و سایر سطوح داخلی اتاق همچنان جابه‌جایی به صورت آزاد انجام می‌شود.

به منظور بسته شدن دستگاه معادلات لازم است معادله تعادل انرژی برای هوا نیز نوشته شود:

$$\sum_{i=1}^7 h_i A_i (T_i - T_{air}) = \dot{m}_{inf} \times C_{p,air} (T_{air} - T_{inf}) \quad (6)$$

که \dot{m}_{inf} و T_{inf} به ترتیب دبی جرمی و دمای هوای نفوذی به ساختمان است. $C_{p,air}$ ظرفیت گرمایی ویژه هوا و T_{inf} دمای هوای نفوذی به اتاق است. معمولاً دمای هوای نفوذی به اتاق را با دمای هوای خارج ساختمان برابر فرض می‌کنند:

$$\dot{m}_{inf} = \rho \dot{V} = \frac{1}{3600} \rho n V = \frac{P}{RT} \frac{nV}{3600} \quad (7)$$

$$t_{cl} = 35/5 - 0.28(M - W) - 0.155I_{cl} \\ (3/96 \times 10^{-8} \times f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 \\ - (t_{mrt} + 273)^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)) \quad (13)$$

و

$$t_{mrt} = t_1 F_{p-1} + t_2 F_{p-2} + \dots + t_N F_{p-N} \quad (14)$$

F_{p-1} تا F_{p-N} ضرایب دید بدن انسان با هر یک از سطوح جانبی است. این مقادیر با توجه به موقعیت اشخاص در اتاق و وضعیت افراد (نشسته یا ایستاده) قابل محاسبه است [۱۲، ۱۵، ۱۸].

M نرخ متابولیک، t_a دمای هوا و t_{mrt} دمای متوسط تابش است.

f_{cl} ضریب تأثیر لباس نامیده می‌شود. هدف از کاربرد f_{cl} ، در نظر گرفتن افزایش سطح تبادل حرارتی به دلیل ضخامت لباس است. f_{cl} از طریق رابطه (۱۴) بر حسب عایق لباس قابل محاسبه است [۱۷]:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0.2I_{cl} : I_{cl} < 0.5Clo \\ 1/0.5 + 0.1I_{cl} : I_{cl} > 0.5Clo \end{cases} \quad (15)$$

I_{cl} مقاومت حرارتی لباس است که اغلب بر حسب Clo بیان می‌شود. هر Clo تقریباً معادل (m^2KW^{-1}) ۰/۱۵۵ است. h_c از طریق رابطه (۱۵) قابل محاسبه است.

$$h_c = 12/\sqrt{v} \quad (16)$$

v سرعت جریان هوا بر حسب (m/s) است. t_a نیز دمای هوا بر حسب $(^\circ C)$ است [۱۷].

معادلات فنجر در حالتی که فعالیت افراد اندک است، جوابهای خوبی را نسبت به آزمایشهای تجربی ارائه می‌کند. اما وقتی فعالیت افراد زیاد است، استفاده از این معادلات با خطا همراه است.

روش امروزی برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی، استفاده از مدل فنجر است. این روش که شیوه‌ای کاملاً تحلیلی است، بر مبنای مبادله انرژی بین بدن و محیط بنا شده است. به کمک این معادله می‌توان بر مبنای هفت پارامتر مهم و مؤثر بر آسایش حرارتی، میانگین احساس حرارتی^۱ (PMV) ساکنان ساختمان را تخمین زد [۱۷]. این پارامترها عبارتند از:

نرخ متابولیک، دمای خشک (dry bulb) رطوبت نسبی، میزان لباس، دمای متوسط تابش، میزان فعالیت و سرعت جریان هوا.

ASHRAE رابطه بین پارامتر (PMV) و احساس حرارتی ساکنان ساختمان را در قالب جدول (۱) توصیف کرده است.

جدول ۱ رابطه بین پارامتر (PMV) و احساس حرارتی ساکنان

ساختمان

PMV	-۳	-۲	-۱	۰	۱	۲	۳

رابطه معروف فنجر عبارت است از [۱۷]:

$$PMV = (0.33e^{-0.36M} + 0.28) \\ ((M - W) - 3/0.5 \times 10^{-3} \times (5733 \\ - 6/99(M - W) - P_a) - 0.42((M \\ - W) - 58/15) - 1/7 \times 10^{-5} \times M \\ (5867 - P_a) - 0.014M(34 - t_a) \\ - 3/96 \times 10^{-8} \times f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 \\ - (t_{mer} + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)) \quad (17)$$

که در آن:

1. Predicted Mean Vote

استاندارد آسایش حرارتی ایزو ۷۷۳۰، محدوده $PMV < +0.5$ را به عنوان محدوده قابل قبول برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند [۱۲، ۱۷].

۳- فضای نمونه

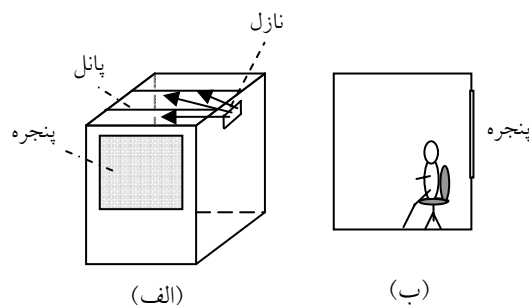
به منظور بررسی عملکرد سیستم سرمایش سقفی به کمک پانل‌های فلزی با دمای متغیر از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی، معادلات و مدل‌های مذکور بر یک فضای نمونه اعمال شده است. در این تحقیق فرض شده که پانل‌های فلزی با دمای متغیر در سقف اتاقی با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ متر نصب و ناحیه بالای پانل‌ها عایق‌بندی شده است. اتاق دارای یک دیوار خارجی و دو دیوار داخلی است. همچنین یک دیوار به فضای تهویه نشده مانند راهرو مرتبط است. سطوح جانبی ساختمان عایق‌کاری نسبتاً مطلوبی دارند ($2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) و همچنین فرض بر این است که ساختمان در تهران در عرض جغرافیایی $35/6$ درجه قرار گرفته است. دیوار خارجی دارای پنجره‌ای با ابعاد $2 \times 1/5$ متر است. شیشه پنجره تک‌جدار بوده و از داخل دارای پرده است. در حالتی که محاسبات بر مبنای تهویه مکانیکی انجام می‌شود، فرض بر این است که جریان اجباری هوا از طریق نازل دیفیوزر با ابعاد 0.3×0.05 متر - که در نزدیکی سقف قرار دارد - انجام می‌شود.

در کلیه موارد، شرایط آسایش حرارتی برای فردی که در فاصله 0.5 متری از پنجره در حالت استراحت بر روی صندلی نشسته، محاسبه می‌شود. در اغلب موارد فرض بر این است که شخص لباس تابستانی معمولی به تن دارد (مگر در مواردی که لباس شخص به طور مشخص ذکر شده است).

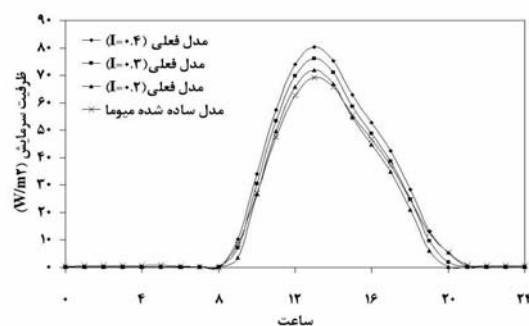
۴- اعتبار و صحت مدل‌های ریاضی

قبل از اینکه به کمک روابط و معادلات بخش ۲، تأثیر پانل‌های با دمای متغیر بر عملکرد سیستم‌های سرمایش

سقفی بررسی شود، لازم است از اعتبار و صحت عملکرد مدل‌ها اطمینان حاصل شود. بدین منظور معادلات مذکور بر فضای نمونه اعمال شده است. محاسبات برای روز تابستانی در تیر ماه به صورت ساعت به ساعت انجام و بار برودتی اعمال شده به پانل‌های سرمایشی محاسبه شده است. البته دیوار خارجی به صورت دیوار جنوبی فرض شده است. نتایج با آنچه مدل ساده شده میوما برای تخمین ظرفیت سرمایشی پانل‌های فلزی سقفی بیان کرده [۴]، مقایسه شده است (شکل ۲).



شکل ۱ نمایش کلی از شرایط فضای نمونه، محل قرار گرفتن نازل، پنجره و محل نشستن افراد



شکل ۲ مقایسه بار برودتی پیش‌بینی شده توسط مدل حاضر با مدل ساده شده میوما با تغییر لباس ساکنان ساختمان

در شکل ۲ ظرفیت سرمایشی پانل‌های فلزی برای سه نوع پوشش لباس متفاوت به کمک مدل فعلی محاسبه و ترسیم شده است. نتایج با آنچه مدل ساده شده پیشنهادی میوما پیش‌بینی می‌کند، مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت سرمایشی پیش‌بینی شده برای پانل‌های فلزی سقفی توسط مدل مذکور، با مدل میوما هماهنگی و تطابق خوبی دارد؛ فقط در ساعتهای بیشینه بار، نتایج دو مدل کمی با یکدیگر متفاوت است. این تفاوت در ساعتهای بیشینه بار و در حالتی که افراد لباس معمولی تابستانی ($0.4/Clo$) به تن دارند، به حداکثر می‌رسد. در چنین شرایطی در گرمترین ساعتهای روز، نتایج این دو مدل ۱۷٪ تفاوت دارند. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، با کاهش لباس ساکنان ساختمان، نتایج مدل فعلی با مدل میوما تطابق بهتری نشان می‌دهد. وقتی پوشش افراد به ($0.2/Clo$) تقلیل می‌یابد، هر دو مدل نتایج تقریباً یکسانی را ارائه می‌کنند. لازم است ذکر شود که این اختلاف جزئی ممکن است ناشی از سادگی مدل میوما باشد؛ زیرا در مدل او، محاسبات دقیق تابش خورشیدی و تحلیل آسایش حرارتی با دقت انجام نشده است. اما این موضوع از ارزش کار او نمی‌کاهد زیرا مدل ساده میوما می‌تواند بدون انجام محاسبات سنگین، ظرفیت سرمایشی پانل‌های فلزی سقفی را با تقریب قابل‌قبولی تخمین بزند. ذکر این نکته لازم است که در ایران، افراد به دلایل فردی و نیز برخی باورهای اعتقادی، حاضر به کاهش زیاد در لباس نیستند بنابراین برخی از پارامترهای اجتماعی و اعتقادی نیز می‌تواند بر تفاوت جزئی نتایج این مدلها مؤثر باشد.

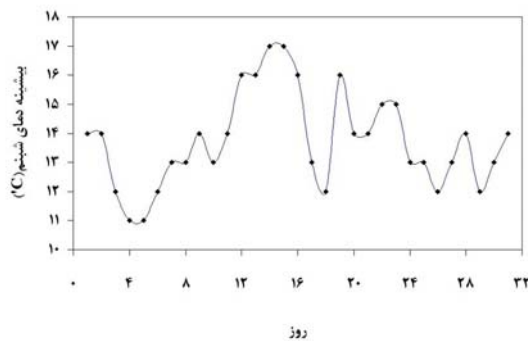
تحقیقاتی که تاکنون بر روی تأثیر مقدار لباس بر مصرف انرژی انجام شده، نشان داده است که کاهش

($0.1/Clo$) مقدار لباس، ۶ تا ۷ درصد از مصرف انرژی را کاهش می‌دهد [۲]. همانطور که در شکل ۲ نیز دیده می‌شود، کاهش اندک لباس ($0.1/Clo$) مصرف انرژی را به‌طور محسوسی کاهش داده است. بررسیهای کمی نشان داد که با کاهش اندک مقدار لباس ($0.1/Clo$)، مصرف انرژی در طول شبانه‌روز ۷/۵ درصد کاهش می‌یابد که این با آنچه تاکنون گزارش شده مطابقت دارد. با توجه به آنچه بیان شد، تا حد زیادی به اعتبار و صحت عملکرد مدلهای ریاضی به‌کار گرفته شده می‌توان اطمینان پیدا کرد.

۵- استفاده از پانل‌های فلزی با دمای متغیر تطبیقی و تأثیر آن بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی

از آنجاکه بار برودتی اعمال شده به فضای داخل ساختمان به شرایط آب و هوایی محیط خارج بستگی دارد که در طول شبانه‌روز متغیر است؛ لذا با کنترل دمای پانل‌های سقفی می‌توان عملکرد آنها را بر مبنای تغییرات ساعت به ساعت بار برودتی تغییر داد. لازم است ذکر شود که در چنین شرایطی باید از پانل‌های فلزی در سقف استفاده کرد. زیرا این نوع پانل‌ها ثابت زمانی اندکی داشته و به سرعت به تحریکهای حرارتی محیطی پاسخ می‌دهند. پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی بتوان با حفظ شرایط آسایش حرارتی، مصرف انرژی را تا حد زیادی کاهش داد.

در این بخش، بررسی کمی عملکرد پانل‌های سرمایش سقفی فلزی انجام شده است. بدین‌منظور در یک روز گرم تابستان در تیر ماه، بار برودتی اعمال شده به فضای نمونه در ساعتهای مختلف شبانه‌روز محاسبه و با تغییر دمای پانل‌های سقفی سعی شده



شکل ۳ حداکثر دمای نقطه شب‌نیم در روزهای مختلف ماه جولای ۲۰۰۵ در تهران

در ادامه عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی با در نظر گرفتن جهت پنجره و دیوارهای خارجی در ساختمان به صورت ساعت به ساعت محاسبه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور کلیه محاسبات برای فضایی کاملاً مشابه با فضای نمونه انجام شده است.

محاسبات برای حالت‌های مختلفی که دیوار خارجی به سمت شمال، جنوب، شرق و غرب باشد، به طور مجزا انجام شده است. در کلیه موارد در ابتدا فرض بر این است که تهویه ساختمان به صورت طبیعی باشد. در مواردی که امکان رخداد میعان وجود دارد، محاسبات برای حالت تهویه مکانیکی تکرار شده است. در تحقیق حاضر سعی شده با تغییر دمای پانل‌های سقفی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز، شرایط آسایش حرارتی در داخل ساختمان فراهم شود. نتایج در شکل‌های ۴ تا ۷ آورده شده است. در تمامی نمودارهای مذکور، تغییرات ساعت به ساعت دمای محیط خارج، دمای پانل‌های فلزی و دمای هوای محیط داخل ترسیم شده است. با در نظر گرفتن درصد رطوبت نسبی ۶۰٪، بیشینه دمای نقطه شب‌نیم در هر یک از ساعت‌های شبانه‌روز نیز ترسیم شده است. بدیهی است که دمای پانل‌های فلزی نباید از ماکزیمم دمای شب‌نیم کمتر شود؛ زیرا در

است که شرایط آسایش حرارتی در فضای داخل فراهم شود. لازم است یادآوری شود که در تمامی حالت‌های محاسبه شده، دمای پانل‌های فلزی نباید از بیشینه دمای نقطه شب‌نیم کمتر باشد. آمارهای گزارش شده توسط سازمان هواشناسی در سال‌های اخیر حاکی از این است که در تهران در ماه‌های گرم سال، حداکثر رطوبت نسبی در طول شبانه‌روز به ندرت از ۶۰٪ تجاوز می‌کند [۳]. البته در بیشتر ساعت‌های شبانه‌روز رطوبت نسبی کمتر از ۵۵٪ است [۳]. متوسط ماهیانه حداکثر درصد رطوبت نسبی در ماه‌های گرم سال در تهران در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که متوسط ماهیانه حداکثر رطوبت نسبی در تیر ماه کمتر از ۵۰٪ است.

جدول ۲ متوسط ماهیانه حداکثر درصد رطوبت نسبی در

ماه‌های گرم سال در تهران

شهریور	مرداد	تیر	
۴۱	۴۷	۴۲	۲۰۰۲
۴۰	۳۹	۳۵	۲۰۰۳
۴۰	۴۲	۴۰	۲۰۰۴

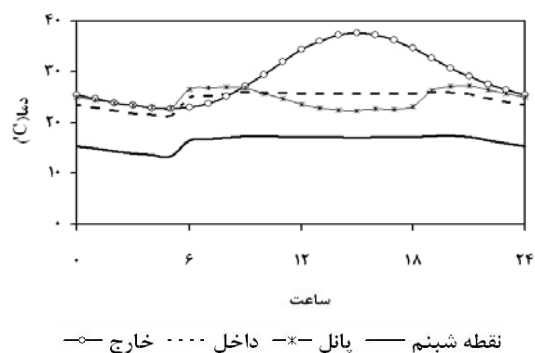
همچنین بنا بر گزارش‌های سازمان هواشناسی حداکثر دمای نقطه شب‌نیم در روزهای مختلف تیر ماه ۲۰۰۵ در تهران به صورت شکل ۳ بوده است [۳]. همانطور که دیده می‌شود، بیشینه دمای نقطه شب‌نیم از ۱۷ درجه سانتی‌گراد تجاوز نکرده است. با توجه به اطلاعات و آمارهای مذکور، در کلیه محاسبات انجام شده در این بخش به منظور پیش‌بینی احتمال رخداد میعان بر روی پانل‌های سرمایش سقفی و همچنین محاسبه شرایط آسایش حرارتی، مقدار رطوبت نسبی ۶۰٪ در نظر گرفته شده است.

در هر مورد نیز شار برودتی اعمال شده به پانل‌های سقفی در طول شبانه‌روز ترسیم شده است.

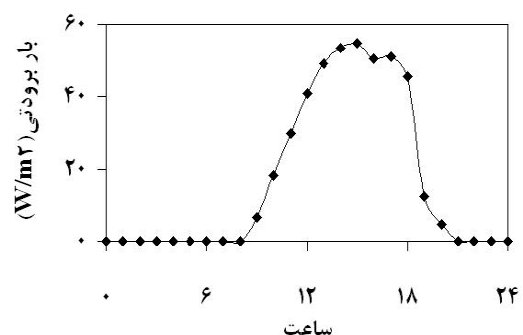
در شکل ۴ نتایج برای ساختمانی که دیوار خارجی آن به سمت شمال است و به صورت طبیعی تهویه می‌شود، نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، در این حالت، دمای پانل‌ها در طول شبانه‌روز از حداکثر دمای شبنم کمتر نمی‌شود. این بدان معنا است که در تهران، در ساختمانهایی که دیوار خارجی شمالی دارند، حتی در حالت تهویه طبیعی نیز سیستم‌های سرمایش سقفی به راحتی می‌توانند بدون رخداد پدیده میعان، شرایط آسایش حرارتی مطلوب را در داخل فراهم سازند. در شکل ۴-ب بار سرمایشی اعمال شده به پانل‌های فلزی در طول شبانه‌روز ترسیم شده است. دیده می‌شود که در ساعتهای اولیه بامداد و ساعتهای پایانی شبانه‌روز، بدون آنکه باری بر پانل‌ها اعمال شود، شرایط آسایش حرارتی فراهم شده است. این نمودار بیانگر این حقیقت است که در ساختمانهایی با عایقکاری حرارتی نسبتاً مطلوب، $2 (m^2K/W)$ ، با شرایط تهویه طبیعی و دیوار خارجی شمالی، تقریباً در ۱۱ ساعت از شبانه‌روز بدون نیاز به هیچگونه سیستم سرمایشی، شرایط آسایش حرارتی فراهم می‌شود. در چنین شرایطی، تنها بین ساعتهای ۸ تا ۲۱ لازم است پانل‌های سرمایشی فعال باشند. ملاحظه می‌شود که در ساعتهای فعالیت سیستم، دمای هوای داخل ساختمان تقریباً ثابت بوده و مقدار آن به متوسط مقادیر پیشنهادی توسط حیدری برای سیستم‌های جابه‌جایی بسیار نزدیک است.

در شکلهای ۵ تا ۷، نمودارهای مشابهی برای ساختمانهایی با دیوار خارجی جنوبی، شرقی و غربی در حالت تهویه طبیعی ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، در حالتی که دیوار خارجی ساختمان به سمت جنوب است، تقریباً در ۱۰ ساعت از شبانه‌روز، بدون نیاز به هیچگونه سیستم سرمایشی می‌توان شرایط آسایش حرارتی را فراهم ساخت.

این حالت احتمال رخداد میعان وجود دارد. در این نمودارها نتایج روابط پیشنهادی توسط ASHRAE و همچنین رابطه اصلاح شده پیشنهادی توسط حیدری برای دمای آسایش در سیستم‌های سرمایش جابه‌جایی با تهویه طبیعی در ایران ترسیم شده است. به کمک این نمودارها می‌توان دمای هوا را در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های فلزی با دمای متغیر تطبیقی با نتایج ASHRAE و حیدری برای سیستم‌های جابه‌جایی مقایسه کرد. تمامی نمودارها برای ساختمانهایی که دیوار خارجی آنها جهت شمالی، جنوبی، شرقی و یا غربی دارند به طور جداگانه ترسیم شده است.



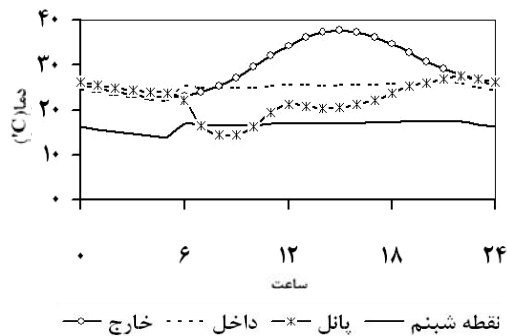
(الف)



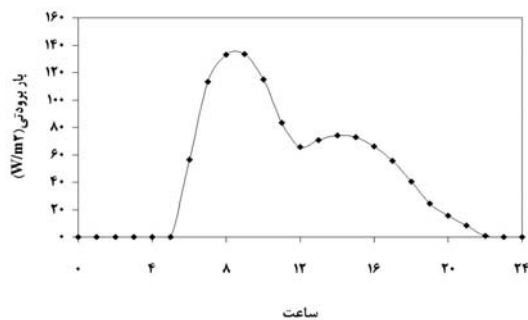
(ب)

شکل ۴ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی شمالی در شرایط تهویه طبیعی

دمای شب‌نم کمتر می‌شود و این به معنی احتمال رخداد میعان در چنین ساعت‌هایی است. به‌نظر می‌رسد که با افزایش تعداد دفعات تعویض هوا به بیشتر از یک‌بار در ساعت یا به‌عبارتی، افزایش اندک سرعت جریان هوا در داخل اتاق در بازه‌های زمانی که احتمال رخداد میعان وجود دارد، بتوان این نقیصه را برطرف ساخت. بدین‌منظور در ساعت‌هایی که احتمال رخداد میعان وجود دارد، سعی شده با ایجاد شرایط تهویه مکانیکی و افزایش نسبی سرعت جریان هوا در فضای داخل، از ایجاد میعان احتمالی جلوگیری شود.

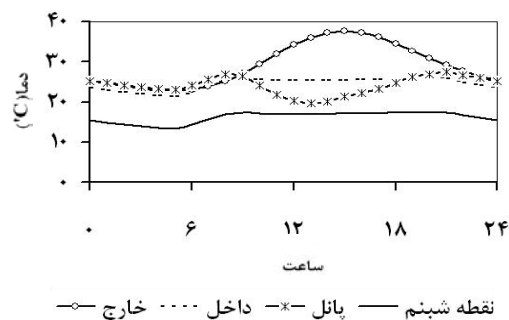


(الف)

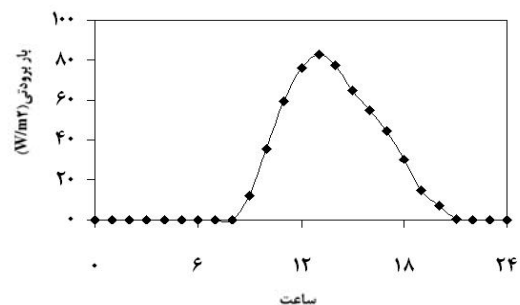


(ب)

شکل ۶ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی شرقی در شرایط تهویه طبیعی



(الف)

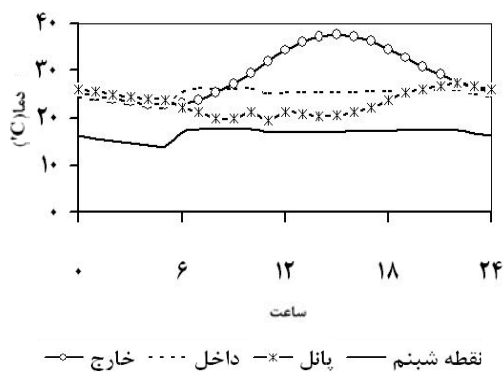


(ب)

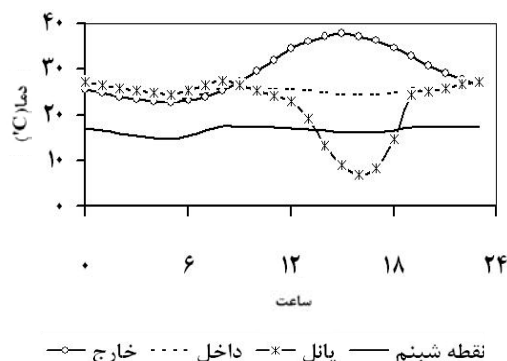
شکل ۵ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی جنوبی در شرایط تهویه طبیعی

در چنین ساختمان‌هایی بدون نگرانی درباره احتمال رخداد میعان بر روی پانل‌های فلزی می‌توان از سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های فلزی در حالت تهویه طبیعی استفاده کرد.

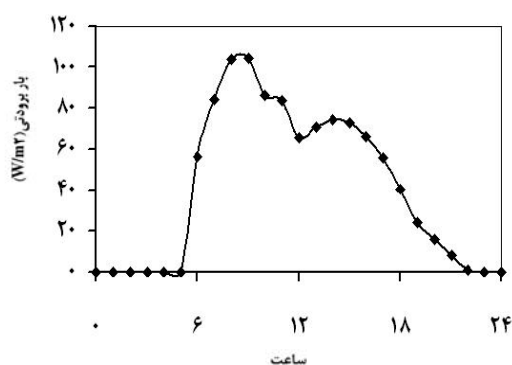
در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج برای ساختمان‌هایی با تهویه طبیعی و در حات‌هایی که دیوار خارجی شرقی یا غربی باشد ترسیم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در چنین ساختمان‌هایی تقریباً در ۷ تا ۸ ساعت از شبانه‌روز به‌هیچ سیستم سرمایشی نیازی نیست. با کمی دقت در شکل‌های ۶-الف و ۷-الف ملاحظه می‌شود که در برخی از ساعت‌های شبانه‌روز، دمای پانل‌های فلزی از بیشینه



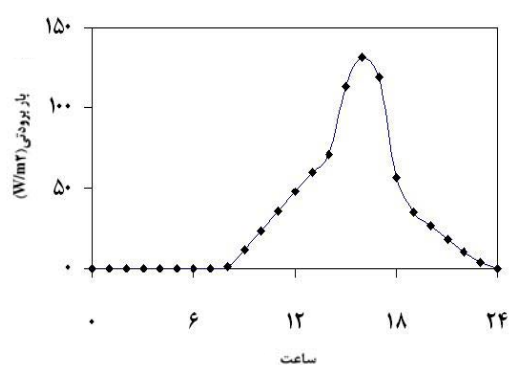
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

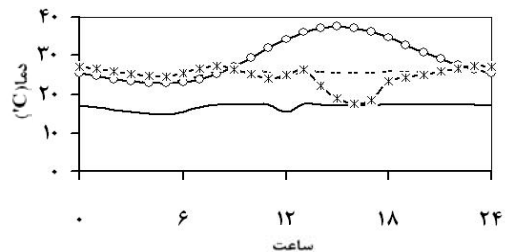
شکل ۸ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی شرقی در شرایط تهویه مکانیکی در ساعتهایی که احتمال رخداد میعان وجود دارد

با دقت در نمودارها مشخص می‌شود که در کلیه حالت‌های مذکور محدوده تغییرات دمای پانل‌های فلزی به گونه‌ای است که برای تأمین آن نیاز نیست که آب ورودی سیستم دمای بسیار کمی داشته باشد؛ به طوری که با آب‌های زیرزمینی یا چاه‌ها می‌توان چنین شرایطی را فراهم ساخت. در مواردی که لازم است آب تغذیه‌کننده سیستم، در مدار بسته‌ای

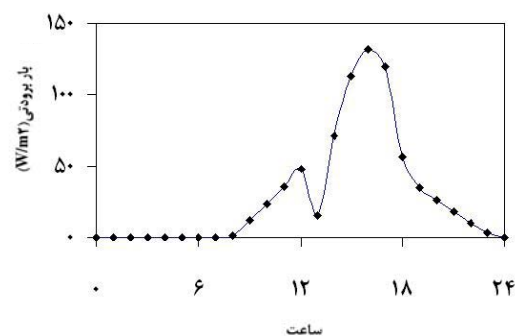
شکل ۷ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی غربی در شرایط تهویه طبیعی

بررسی‌ها نشان داد که در حالتی که دیوار خارجی به سمت شرق است با $1/2$ بار تعویض هوا در ساعت می‌توان احتمال رخداد میعان را به حداقل رسانید. این در حالی است که در ساختمانهایی که پنجره و دیوار خارجی آنها غربی است، با $1/8$ بار تعویض هوا در ساعت، این مشکل برطرف می‌شود. نتایج برای این دو حالت در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است.

بچرخد نیز می‌توان با فرایندهای سرمایش تبخیری ساده، انتالپی منتقل شده به آب را بازیافت کرد و به چیلر و وسایل سرمایشی گران قیمت نیازی نیست.



(الف)



(ب)

شکل ۹ عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با کمک پانل‌های دمای تطبیقی در حالت پنجره و دیوار خارجی غربی در شرایط تهویه مکانیکی در ساعتهایی که احتمال رخداد میعان وجود دارد

۶- پیش‌بینی تغییرات دمای پانل‌های فلزی در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی در ساعتهای مختلف شبانه‌روز

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، به‌منظور ایجاد شرایط عملکرد تطبیقی برای سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با

پانل‌های فلزی لازم است دمای پانل‌ها در ساعتهای مختلف شبانه‌روز، متناسب با تغییر شرایط محیط خارج تغییر کند. به‌منظور اعمال شرایط عملکرد تطبیقی از نظر کاربردی، لازم است معادلات زمانی تغییر دمای پانل‌های فلزی مشخص شود. در این بخش از مقاله با بررسی ساعت به ساعت عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با پانل‌های فلزی دمای تطبیقی در ساختمانهایی با جهات شمالی، جنوبی، شرقی و غربی در دو حالت $PMV = 0/5$ و $PMV = 0/0$ ، سعی شده است تغییرات دمای پانل‌ها در طول شبانه‌روز در قالب یک معادله تحلیلی و صریح بیان شود. لازم است ذکر شود که در فصل گرم، محدوده آسایش حرارتی بر طبق استاندارد بین‌المللی ایزو، $0/5 < PMV < 0/0$ است. به‌همین دلیل کلیه محاسبات در این محدوده انجام شده است. بررسیها نشان داد که تغییرات زمانی دمای پانل‌های فلزی را می‌توان در روابط زیر خلاصه کرد:

برای ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی شمالی:

$$t_{panel} = 24/2 + 2/75 \times \cos(0/42 \times hr - 3/07) \quad (18)$$

برای ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی جنوبی:

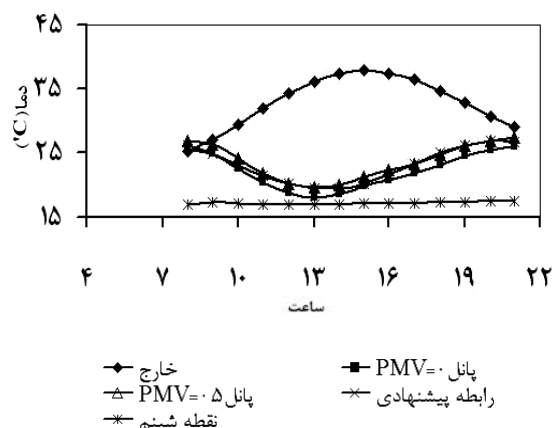
$$t_{panel} = 23/1 + 3/74 \times \cos(0/46 \times hr - 3/043) \quad (19)$$

برای ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی شرقی:

$$t_{panel} = 26/15 + 6/9 \times \cos(0/16 \times hr + 1/35) \quad (20)$$

و برای ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی غربی:

$$t_{panel} = 23/18 + 4/089 \times \cos(0/42 \times hr - 3/26) \quad (21)$$

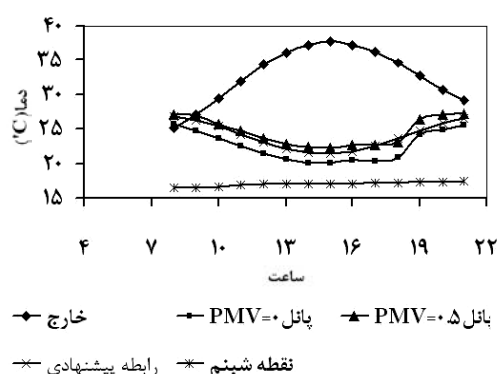


شکل ۱۱ پیش‌بینی تغییرات دمای پانل‌های فلزی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز با توجه به محدوده آسایش حرارتی در ساختمان‌هایی با پنجره و دیوار خارجی جنوبی

همانطور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ دیده می‌شود، معادلات ۱۸ تا ۲۱ می‌توانند تغییرات دمای پانل‌های فلزی را در محدوده قابل قبول آسایش حرارتی پیش‌بینی کنند. در شکل ۱۳ در برخی از ساعت‌های، نتایج توابع تحلیلی پیشنهادی، اندکی از محدوده آسایش حرارتی تجاوز کرده است. تحقیقات انجام شده در زمینه استانداردهای آسایش حرارتی بیانگر این حقیقت است که دامنه کارکرد این استانداردها و محدوده‌های پیشنهاد شده توسط آنها چندان دقیق نیست؛ به‌طوری‌که استاندارد ASHRAE رواداری $\pm 2^\circ\text{C}$ را در استفاده از استانداردهای آسایش حرارتی را مجاز می‌داند [۱۹، ۲۰]. بنابراین می‌توان انحرافات اندک نتایج به‌دست آمده از روابط تحلیلی پیشنهادی را از محدوده آسایش حرارتی با توجه به عدم دقت استانداردهای آسایش حرارتی قابل قبول دانست.

روابط (۱۸) تا (۲۱) برای ساعت‌های ۱۸ تا ۲۱ ($8 < hr < 21$) به‌دست آمده است. لازم است ذکر شود که در ساختمان‌هایی با دیوار خارجی شمالی یا جنوبی، تهویه ساختمان در کلبه ساعت‌ها می‌تواند به‌طور طبیعی انجام شود. اما در ساختمان‌هایی که دیوار خارجی آنها شرقی یا غربی است، لازم است در برخی ساعت‌ها کارکرد دستگاه، تهویه ساختمان به‌صورت مکانیکی انجام شود. به‌عنوان مثال در ساختمان‌های شرقی در ساعت‌های ۷ تا ۱۰ و در ساختمان‌های غربی در ساعت‌های ۱۳ تا ۱۸ لازم است تهویه به‌صورت مکانیکی انجام شود.

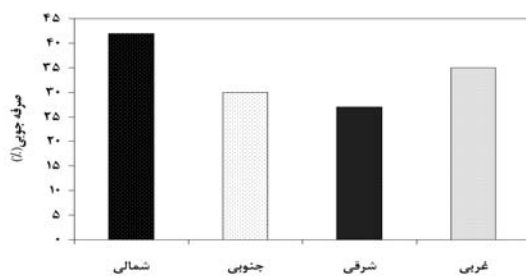
تغییرات دمای محیط خارج و همچنین تغییرات دمای پانل‌های فلزی در طول ساعت‌های فعالیت سیستم در ساختمان‌هایی با جهات مختلف در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ ترسیم شده است. در هر حالت سعی شده است دمای پانل‌های فلزی در محدوده آسایش حرارتی با یک رابطه تحلیلی (معادلات ۱۸ تا ۲۱) توصیف شود. کلبه نمودارها برای شرایط اقلیمی تهران ترسیم شده است.



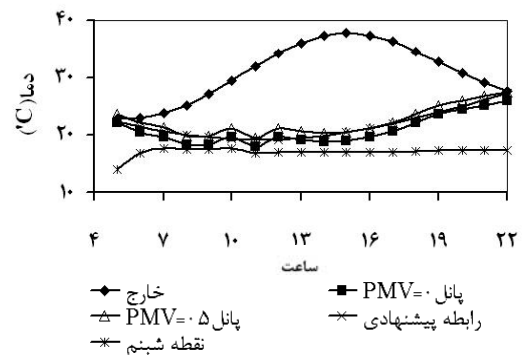
شکل ۱۰ پیش‌بینی تغییرات دمای پانل‌های فلزی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز با توجه به محدوده آسایش حرارتی در ساختمان‌هایی با پنجره و دیوار خارجی شمالی

است که شرایط محیط داخل و به تبع آن دمای عملکرد سیستم نیز باید متأثر از تغییرات شرایط محیط خارج باشد. بدین‌منظور در بررسیهای حاضر سعی شده است با تغییر دمای پانل‌های فلزی سقفی در طول شبانه‌روز، شرایط آسایش حرارتی متناظر ایجاد شود.

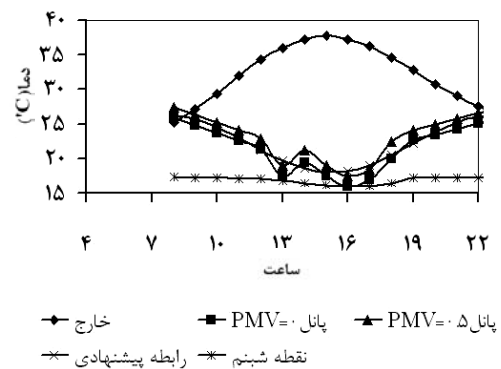
به‌منظور بررسی تأثیر استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی، میزان مصرف انرژی برای چهار حالت متفاوت یعنی وقتی دیوار خارجی شمالی، جنوبی، شرقی و غربی باشد، محاسبه و با حالت پانل فلزی دما ثابت مقایسه شده است. محاسبات در حالت دما ثابت کاملاً شبیه محاسبات انجام شده در حالت دمای متغیر است، با این تفاوت که محاسبات بر مبنای دمای متناظر با شرایط بحرانی یعنی ساعت ۱۵ روز ۲۳ جولای (اول مرداد) انجام شده است. در شکل ۱۴ میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با پانل‌های دما ثابت ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی، می‌توان بسته به جهت پنجره و دیوار خارجی ساختمان، بین ۲۹ تا ۴۶ درصد در مصرف انرژی اولیه صرفه‌جویی کرد. همانطور که در شکل ۱۴ نیز دیده می‌شود، استفاده از پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی به جای پانل‌های دما ثابت در ساختمانهایی که پنجره و دیوار خارجی غربی دارند، تأثیر چشمگیرتری دارد.



شکل ۱۴ مقایسه عملکرد پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی و پانل‌های فلزی دما ثابت، از نظر مصرف انرژی



شکل ۱۲ پیش‌بینی تغییرات دمای پانل‌های فلزی در ساعتهای مختلف شبانه‌روز با توجه به محدوده آسایش حرارتی در ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی شرقی



شکل ۱۳ پیش‌بینی تغییرات دمای پانل‌های فلزی در ساعتهای مختلف شبانه‌روز با توجه به محدوده آسایش حرارتی در ساختمانهایی با پنجره و دیوار خارجی غربی

۷- مقایسه عملکرد پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی و پانل‌های فلزی دما ثابت، از نظر مصرف انرژی

از آنجاکه شرایط محیط خارج ساختمان و بار بردتی اعمال شده به آن در طول شبانه‌روز متغیر است، لذا ایجاد شرایط ثابتی بر فضای داخل تحت عنوان شرایط آسایش حرارتی چندان قابل توجیه نیست. آنچه مسلم است این

۸- بحث و نتیجه گیری

از آنجاکه شرایط محیط خارج ساختمان و بار ورودی اعمال شده به آن در طول شبانه روز متغیر است، لذا ایجاد شرایط ثابتی بر فضای داخل تحت عنوان شرایط آسایش حرارتی چندان قابل توجیه نیست. بنابراین لازم است شرایط محیط داخل و به تبع آن دمای عملکرد سیستم نیز متناسب با تغییر شرایط محیط خارج تغییر کند. بدین منظور در این تحقیق تأثیر استفاده از سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی به کمک پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی بررسی و با عملکرد پانل‌های دما ثابت مقایسه شده است. به طور کلی نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

۱- پارامتر ثابت زمانی در پانل‌های فلزی بسیار کوچک است (کمتر از ۵ دقیقه). کوچک بودن ثابت زمانی در این گونه سیستم‌ها ایجاد شرایط دمای متغیر و تطبیقی را برای پانل‌ها امکان‌پذیر می‌سازد. از سوی دیگر مدلهای مرسوم آسایش حرارتی که در محاسبات و بررسیها مورد استفاده قرار می‌گیرند اغلب در شرایط دائم یا شبه دائم معتبرند. کوچک بودن ثابت زمانی پانل‌های فلزی و عکس‌العمل سریع این‌گونه سیستم‌ها به تحریکهای حرارتی محیطی، ایجاد شرایط دائم و یا شبه دائم را در مطالعه ساعت به ساعت تضمین می‌کند.

۲- با استفاده از پانل‌های فلزی با دمای متغیر تطبیقی بسته به جهت ساختمان، پنجره و دیوارهای خارجی، می‌توان با حفظ شرایط آسایش حرارتی، ۲۹ تا ۴۵ درصد نسبت به حالت پانل‌های دما ثابت در مصرف انرژی اولیه صرفه جویی کرد.

۳- جهت پنجره و دیوار خارجی ساختمان بر عملکرد پانل‌های فلزی با دمای تطبیقی تأثیر به سزایی دارد،

به طوری که در تهران در ساختمانهایی که دیوار خارجی شمالی یا جنوبی دارند، حتی در حالت تهویه طبیعی نیز می‌توان بدون نگرانی از رخداد میعان، از سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با پانل‌های فلزی دما متغیر استفاده کرد. این در حالی است که در ساختمانهایی که پنجره و دیوار خارجی شرقی یا غربی دارند، در ساعتهای محدودی از شبانه روز، احتمال رخداد میعان وجود دارد. در طی این ساعتهای می‌توان با استفاده از تهویه مکانیکی و افزایش دفعات تعویض هوا و به تبع آن افزایش نسبی سرعت جریان هوا در محیط داخل، از رخداد میعان جلوگیری کرد.

۴- بررسیها نشان داد که در تهران در فصل تابستان در ساختمانهایی که عایقکاری حرارتی نسبتاً مطلوبی دارند، بسته به جهت ساختمان، بین ۸ تا ۱۱ ساعت از شبانه روز به هیچگونه وسیله سرمایشی نیاز نیست. بدیهی است در طی این ساعتهای سیستم سرمایش تابشی غیرفعال است. محاسبات نشان داد که در ساعتهای فعالیت سیستم سرمایش تابشی سقفی با پانل‌های دمای تطبیقی، علی‌رغم تغییر دمای پانل‌ها، دمای هوای داخل ساختمان تقریباً ثابت بوده و مقدار آن به متوسط مقادیر پیشنهادی توسط حیدری برای سیستم‌های جابه‌جایی بسیار نزدیک است.

۵- بررسی ساعت به ساعت عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با دمای تطبیقی نشان داد که محدوده تغییرات دمای پانل‌های فلزی به گونه‌ای است که برای تأمین آن نیاز نیست که آب ورودی به سیستم دمای بسیار کمی داشته باشد؛ به طوری که با آبهای زیر زمینی یا چاهها می‌توان چنین شرایطی را فراهم ساخت. در مواردی که لازم است آب تغذیه‌کننده سیستم در مدار بسته‌ای بچرخد نیز می‌توان با فرایندهای سرمایش تبخیری

enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces, *Applied Thermal Engineering*, v23, (2003), 2293-2306.

ساده، انتالپی منتقل شده به آب را بازیافت کرد و به چیلر و وسایل سرمایشی گران‌قیمت نیازی نیست.

۹- منابع

- [8] J. Miriel, et al, Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of performances, thermal comfort and energy consumptions, *Applied Thermal Engineering*, v 22, (2002), 1861-1873.
- [9] J. F. Nicol, M. A. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings*, v34, (2002), 563-572.
- [10] Richard J. de Dear, Gail S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings*, v34, (2002), 549-561.
- [11] Shahin Heidari, Steve Sharples, A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran, *Energy and Buildings*, v34, (2002), 607-614.
- [12] P. O. Fanger; Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, McGraw-Hill, (1970).
- [13] Richard D. Watson, Kirby S. Chapman; Radiant heating and cooling handbook, McGraw-Hill, (2001).
- [1] Koichi Kitagava et al., Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments, *Energy and Buildings*, v30, (1999), 185-193.
- [2] Laszlo J. Banhidi; Radiant heating systems, design and applications, Pergamon Press, London, (1991).
- [3] www.weather.ir.
- [4] Stanly A. Mumma, Jae-Weon Jeong, Simplified cooling capacity estimation model for top insulated metal ceiling radiant cooling panels, *Applied Thermal Engineering*, v24, (2004), 2055-2072.
- [5] J. L. Niu, L. Z. Zhang, H. G. Zuo, Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates, *Energy and Buildings*, v34, (2002), 487-495.
- [6] Martin Behne, Indoor air quality in rooms with cooled ceilings, mixing ventilation or rather displacement ventilation?, *Energy and Buildings*, v30, (1999), 155-166.
- [7] Stanly A. Mumma, Jae-Weon Jeong, Ceiling radiant cooling panel capacity

- parallelepiped environments, Energy and Buildings, v19, (1992), 51-60.
- [19] J. F. Nicol, M. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, Energy and Buildings, 34, (2002), 563-572.
- [20] Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments, Energy and Buildings, 34, (2002), 667-684.
- [14] J. P. Holman, Heat transfer, 8th ed, McGraw-Hill, (1997).
- [15] www.me.utexas.edu/~tablecon.html.
- [16] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Thermodynamics, An engineering approach, 4th ed, McGraw-Hill, New York, (2002).
- [17] H. B. Awbi, Ventilation of Buildings, E&FN Spon, London, (1998).
- [18] G. Cannistraro, et al, Algorithms for the calculation of the view factors between human body and rectangular surfaces in