



بهبود عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با طراحی مناسب ارتفاع پانل

قارن درستی^۱، مهدی معرفت^{۲*}، امیر امیدوار^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، maerefat@modares.ac.ir

چکیده- در این تحقیق اثر ارتفاع پانل بر عملکرد سیستم سرمایش تابشی سقفی مطالعه شده است. این تحقیق به روش عددی - شامل مدل‌سازی با تلفیقی از حل معادلات بقا، معادلات تشعشع و معادلات آسایش حرارتی - در شرایط آب و هوایی تهران در گرم‌ترین روز سال انجام شده است. از آنجا که یکی از عیب‌های اصلی این سیستم‌ها، پدیده میعان در پانل سرمایش تابشی است، در این تحقیق با بررسی پارامتری ارتفاع پانل، این موضوع بررسی شده است. بررسی اثر تغییرات ارتفاع پانل در نرخ‌های متنوع و معمول تهویه برای فضای مسکونی انجام و تشکیل میعان و رسیدن به شرایط آسایش حرارتی آزمایش شده است. نتایج حاکی از آن است که با انتخاب مناسب ارتفاع پانل می‌توان تا اندازه قابل ملاحظه‌ای از تشکیل میعان جلوگیری کرد.

کلید واژگان: سیستم سرمایش تابشی سقفی، ارتفاع پانل، میعان، آسایش حرارتی.

Performance Improvement of Ceiling radiant Cooling System by Suitable Design of Panel Height

Q. Dorosti¹, M. Maerefat^{2*}, A. Omidvar³

1- M. Sc., Student, Tarbiat Modarres Univ.

2- Assoc. Prof., Tarbiat Modarres Univ.

3- Assis. Prof. Shiraz, Univ. of Technology Shiraz

*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

Abstract- The effect of panel height on performance of ceiling radiant cooling system has been studied. Investigation has been done by employing solution of conservative equations, together with the radiant and thermal comfort equations. Calculation is performed for the typical hottest day of Tehran. Vapour condensation is one of the most important problems whit these systems. Therefore effect of panel height on condensation has been also studied, in a residential place with several different ranges of ventilation rate. The results show that appropriate design of the panel height can significantly reduce the rate of condensation.

Keywords: Radiant Cooling System, Panel Height, Condensation, Thermal Comfort.

۱- مقدمه

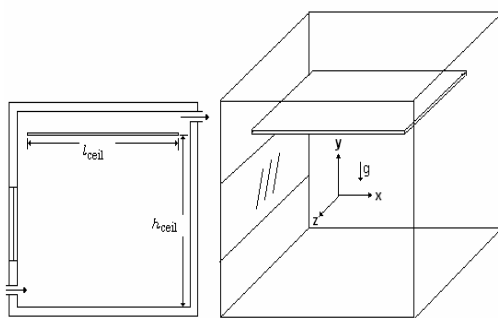
سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی را به طور کلی می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱- سیستم‌های تابشی ۲- سیستم‌های همرفتی. اساس کار سیستم‌های نوع اول، فراهم ساختن سطح وسیع، با اختلاف دمای نه چندان زیاد نسبت به دمای هوای داخل است. سیستم‌های نوع دوم با استفاده از وزش هوای سرد و مطبوع کردن هوای داخل با کنترل آلودگی و تعویض هوا، شرایط لازم را برای جبران بار حرارتی ساختمان فراهم می‌سازند. احساس سرمای موضعی مخصوصاً در ناحیه تحتانی بدن و همچنین گرادیان عمودی دما دو پارامتر عمده در نارضایتی حرارتی ساکنان ساختمان محسوب می‌شود [۱]. در فضاهایی که از سیستم‌های همرفتی استفاده می‌کنند به دلیل اینکه وزش هوا در داخل فضا کاملاً محسوس است، اغلب ساکنان از احساس سرمای موضعی در برخی از نقاط بدن شکایت دارند. اما در سیستم‌های تابشی به دلیل نبود وزش هوا، نارضایتی حرارتی موضعی کاهش یافته و همچنین عملکرد تابشی از میان رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل ساختمان می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که سیستم‌های تابشی شرایط آسایش حرارتی مطلوب‌تری را در ساختمان فراهم سازند [۲]. تأمین شرایط مطلوب از نظر آسایش افراد و مصرف انرژی، عوامل مهمی است که مهندسان را به سمت این سیستم‌ها سوق داده است. ایجاد میعان، یکی از معایب مهم این سیستم‌ها است و با افزایش رطوبت نسبی محیط و همچنین بار حرارتی ساختمان، این پدیده بیشتر مشکل‌زا می‌شود. یکی از مهمترین کاربردی‌ترین روشهای حل این مشکل، استفاده از سیستم‌های تهویه وزشی در کنار پانل‌های سرمایش سقفی است. به‌طوری که درصدی از بار حرارتی ساختمان، توسط سیستم تهویه وزشی و درصد دیگری توسط سیستم سرمایش تابشی سقفی تأمین شود. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از این راهکار نه تنها در تأخیر پدیده میعان مؤثر است بلکه تا اندازه قابل ملاحظه‌ای سبب بهبود کیفیت هوای داخل و کاهش مصرف انرژی می‌شو [۴].

ارتفاع اتاق یکی از عوامل مؤثر در بار حرارتی و برودتی ساختمان و تعیین کننده الگوی جریان و انتقال حرارت در اتاق است. تحقیقات نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع اتاق سبب کاهش بار برودتی به دلیل کاهش دیوار خارجی می‌شود. البته در فضاهایی که مجهز به سیستم سرمایش تابشی سقفی هستند کاهش ارتفاع پانل تغییر ضریب شکل تشعشعی سقف نسبت به سایر سطوح و همچنین ساکنان را در بر دارد که این سبب احساس خنکی بیشتری برای ساکنان و کاهش بار برودتی می‌شود [۵]. علاوه بر این تغییرات ارتفاع اتاق، نسبت انتقال حرارت تابشی و جابه‌جایی را تغییر می‌دهد [۶].

اگر چه ارتفاع پانل اتاق عامل مؤثری در کاهش بار برودتی و بهبود احساس آسایش افراد است، اما تغییر دادن ارتفاع بعد از ساخت امکان‌پذیر نیست. اما استفاده از سقف‌های کاذب تا اندازه ای طراحی را به سمت ایجاد چنین شرایطی سوق می‌دهد. سقف کاذب به‌عنوان پوششی در اتاق، با ارتفاع کمتری نسبت به سقف اصلی نصب می‌شود. در آغاز استفاده از این طرح با هدف زیبایی و افزایش روشنایی ساختمان انجام شده است، اما علاوه بر این، به دلیل اینکه هوای گرم، معمولاً در بالای اتاق حضور دارد و از آنجا که استفاده از سقف کاذب امکان نصب دریچه‌های تأمین هوا بر روی آن را فراهم می‌سازد لذا در حالت سرمایش می‌توان از خنک کردن بی‌مورد هوای گرم بالای اتاق جلوگیری کرد. در واقع با استفاده از چنین تجهیزاتی می‌توان شرایط حرارتی افراد و بار حرارتی اتاق را بهبود بخشید.

در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی معلق، معمولاً پانل تابشی در ارتفاعی پایین‌تر از سقف اتاق نصب می‌شود و معمولاً علاوه بر تأمین بار حرارتی اتاق کار سقف کاذب را نیز انجام می‌دهد. تحقیقات روی سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی معمولاً محدود به اثر سرمایشی با توجه به تغییرات ابعاد هندسه اتاق بوده و به‌ندرت به اثر تغییر ارتفاع پانل توجه شده است. همچنین گزارش‌های ارائه شده هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد اثر

نظر گرفته شده است. از آنجا که آسایش حرارتی به موقعیت نشستن افراد بستگی دارد چهار جهت برای نشستن فرد در نظر گرفته شده است. شرط طراحی برای این فضای نمونه $PMV=0.5$ فرض شده. که در آن پارامتر PMV معیار سنجش آسایش حرارتی بوده و میزانی از میانگین رأی افراد است. برای محاسبه PMV از فرمول معروف فنگر استفاده شده است [۷]. میزان پوشش و نرخ متابولیک برای فرد به ترتیب برابر 0.4 clo و 1 met است.



شکل ۱. نمایی از فضای اتاق

شرط عدم لغزش برای تمامی سطوح در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی سقف از روش بلاک-آف ۲ استفاده شده و بر این اساس مقدار بسیار بزرگی برای معادلات بقا (1×10^5) انتخاب شده است. سیال عامل، هوا همراه با بخار آب فرض شده و خواص فیزیکی برای شبیه سازی عددی جریان، انتقال حرارت و توزیع رطوبت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} T_o &= 288 \text{ K}, \rho = 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \mu &= 1.8 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}, k = 0.0242 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \\ \beta &= 0.003 \text{ K}^{-1}, C_p = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ \Gamma &= 2.88 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned} \quad (1)$$

1. Predicted Mean Vote
2. Block-off

این پارمتر بر نحوه و قابلیت اطجاد میعان ارائه نمی دهند. بر این اساس در تحقیق حاضر اثر تغییر ارتفاع پانل سرمایش سقفی در نرخ های متنوع و معمول تهویه برای فضای مسکونی، بر نحوه و قابلیت ایجاد میعان مطالعه شده است.

۲- فضای مسأله

به منظور بررسی عملکرد سیستم سرمایش تابشی سقفی از نظر آسایش حرارتی، انتقال حرارت و میزان تشکیل میعان، اتاقی مکعب شکل را مانند شکل (۱) در نظر می گیریم. اتاق با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ متر مجهز به سیستم سرمایش سقفی معلق با ابعاد 2.6×2.6 متر و با ارتفاع h_{cell} از کف اتاق است. پنجره های مستطیل شکل با ابعاد 3×1 متر، متشکل از جداره های شیشه سه میلی متری با ضریب هدایت حرارتی 0.78 W/mK و ضریب عبور حرارتی نور خورشید (SHGC) 0.9 به صورت شکل (۱) در دیوار خارجی نصب شده و مجهز به پرده ضخیم است.

اتاق از دو طرف با اتاق هایی که با شرایط یکسانی خنک می شوند، از یک طرف با محیط خارج و از طرف دیگر با راهرو همسایه است. کف و سقف اتاق به عنوان جدار داخلی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیوار خارجی و دیوارهای داخلی به ترتیب برابر 30 و 20 سانتی متر و ضریب هدایت حرارتی آنها به ترتیب برابر 0.72 W/mK و 0.5 W/mK فرض شده است. جدار خارجی از آجر با ضریب جذب تابشی 0.9 پوشیده شده است. دمای هوای خارج 37 درجه و رطوبت نسبی آن، $RH, 36$ درصد در نظر گرفته شده است. هوای اتاق به وسیله دریچه های تأمین هوا و خروجی که به ترتیب به صورت تحتانی و فوقانی در سمت چپ و راست اتاق نصب شده با نرخ $10 \text{ m}^3/\text{s}$ جابه جا می شود. ضریب صدور تشعشعی تمامی سطوح اتاق برابر 0.9 و سطح پنجره برابر 0.95 در نظر گرفته شده است. محاسبات برای بحرانی رین روز و ساعت در فصل گرم سال انجام شده است. به منظور بررسی آسایش حرارتی افراد، فردی در قسمت مرکزی اتاق در

۳- معادلات حاکم و روش حل

به منظور بررسی آسایش افراد و پدیده میعان در فضای نمونه، ابتدا باید دمای هوای داخل، الگوی جریان، دمای سطوح داخلی و غلظت بخار آب محاسبه شود. از این رو با نوشتن معادله توازن انرژی روی سطوح، دمای سطوح را به دست آورده و سپس با استفاده از این دما، معادلات مومنتم، انرژی و بقای گونه‌ها را حل کرده و الگوی جریان و توزیع غلظت بخار آب را برای فضای نمونه به دست می‌آوریم. سپس با استفاده از الگوی جریان و دمای به دست آمده، ضرایب انتقال حرارت را در معادلات توازن انرژی اصلاح کرده و محاسبات را دوباره انجام می‌دهیم. به علت آنکه جریان هوای اتاق بیشتر متأثر از جابه‌جایی طبیعی است، سرعت وزش هوا در اتاق بسیار پایین است (حداکثر سرعت وزشی برای مسأله حاضر از مرتبه 10^{-1} است). از آنجا که ضرایب انتقال حرارت در سرعت‌های پایین بیشتر متأثر از دما هستند، این سبب همگرایی سریع معادلات می‌شود. برای فضای مورد نظر، حداکثر سه یا چهار تکرار سبب همگرا شدن معادلات می‌شود.

لازم است ذکر شود که زیر نویس * در معادلات زیر مشخص کننده متغیرهای مربوط به سطح است. معادله توازن انرژی که شامل دو بخش جابه‌جایی و تشعشع است برای هر سطح با در نظر گرفتن ضرایب سطوح خاکستری با ضرایب صدور نزدیک به یک به صورت زیر است [۸]:

$$h_* A_* (T_{air} - T_*^*) + \epsilon_* \sigma A_* \left\{ \sum_{k=1}^N F_{*k} (T_k^* - T_*^*) \right\} = Q_* \quad (2)$$

در این معادله جمله اول مربوط به بخش جابه‌جایی است که سطح با هوای اتاق انجام می‌دهد و جمله دوم

مربوط به بخش تشعشعی که سطح با سطوح دیگر مبادله می‌کند. در معادله (۲) Q_* میزان حرارت انتقال یافته از سطح و مطابق با رابطه زیر است:

$$Q_* = Q_{c*} - Q_{r-in*} - Q_{r-out*} \quad (3)$$

در این معادله Q_{c*} میزان حرارت انتقال یافته سطح * از طریق جابه‌جایی و هدایت است. همچنین Q_{r-in*} ، سهم سطح * از تابش خورشیدی نفوذی به اتاق از طریق پنجره است. Q_{r-out*} میزان حرارت تابشی خورشید بر سطح خارجی دیوار بیرونی است. برای فضای تحقیق حاضر به علت استفاده از پرده ضخیم، دو جمله مذکور در معادلات ظاهر نمی‌شوند. Q_{c*} از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{c*} = \left(\frac{T_* - T_{out*}}{b_* / k_* + 1 / h_{out*}} \right) A \quad (4)$$

برای دیوارهای خارجی مقدار $Q_{c*} - Q_{r-out*}$ که بیانگر میزان کل حرارت انتقال یافته از دیوار خارجی است از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_{c*} - Q_{r-out*} = \frac{T_i^* - T_e}{b_* / k_*} A_* \quad (5)$$

در این رابطه، T_e دمای سطح بیرونی و T_i^* دمای سطح درونی دیوار خارجی است. A_* ، b_* و k_* به ترتیب مساحت سطح *، ضخامت دیوار و ضریب انتقال حرارت هدایت است. همان‌طور که در معادلات (۲) و (۵) دیده می‌شود، به دلیل نامعلوم بودن دمای سطح خارجی دیوارهای بیرونی و دمای متوسط هوای داخل، این معادلات قابل حل نیست. به همین دلیل به معادلات دیگری نیاز است که نوشتن توازن انرژی در سطوح

$$h_* = F_c + 2/13 |T_{air} - T_*|^{0.71} \quad (11)$$

از حل مجموعه معادلات (۲)، (۶) و (۷) که به یکدیگر توزیع شده‌اند با استفاده از روشهای عددی، دمای سطوح داخلی و خارجی و دمای هوای داخل به دست می‌آید.

مرحله بعد از محاسبه دمای سطوح مختلف، محاسبه الگوی جریان و توزیع دما است. انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد حدود ۵ تا ۱۰ درصد از بار سرمایشی اتاق را که با سیستم‌سرمایش تابشی سقفی خنک می‌شود به خود اختصاص می‌دهد و با استفاده از تهویه، مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی پانل به سمت انتقال حرارت ترکیبی سوق یافته و سهم انتقال حرارت جابه‌جایی به ۳۰ تا ۳۵ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. این مطلب نشان دهنده آن است که جابه‌جایی القایی نقش مهمی را در این سیستم‌ها بازی می‌کند و باید نقش نیروهای شناوری در مدل‌سازی الگوی جریان و توزیع دما در نظر گرفته شود.

در اینجا مدل‌سازی جریان با ویژگیهای زیر انتخاب شده است:

- ۱- جریان آرام
- ۲- حالت پایدار
- ۳- سیال تراکم‌ناپذیر
- ۴- راستای نیروهای شناوری در راستای محور yها است
- ۵- جمله‌های تلفات لزجی قابل صرف‌نظر کردن است
- ۶- خواص ترموفیزیکی سیال ثابت
- ۷- سیال هوا همراه با بخار آب همان‌طور که در فرضیه‌های بالا گفته شد برای مدل‌سازی جریان، توزیع دما و توزیع نسبت رطوبت از فرض دوبعدی برای مدل‌سازی استفاده شده است. این بدین معنا است که جریان در صفحات X-Z و Y-Z در مقایسه با جریان صفحه X-Y قابل صرف‌نظر کردن است.

خارجی حاصل می‌شود. معادله توازن انرژی برای سطح خارجی عبارت است از:

$$h_{out*}(T_{out*} - T_e) + \epsilon_e \sigma (T_{out*}^4 - T_e^4) = \frac{T_{out*} - T_e}{b_* / k_*} - q_s'' \quad (6)$$

در این معادله h_{out*} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از سطح بیرونی دیوار، q_s'' کل انرژی خورشید بر واحد سطح دیوار خارجی و ϵ_e ضریب صدور تابشی سطح بیرونی دیوار است. q_s'' به عرض جغرافیایی، جهت دیوار خارجی، دمای هوای طرح داخل اتاق و زمان تابش خورشید بستگی دارد.

برای محاسبه دمای متوسط هوای داخل می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$m \& C_{p,air} (T_{air} - T_{inf}) = \sum_{s=1}^N h_* A_s (T_* - T_{air}) \quad (7)$$

که در آن $m \&$ و T_{inf} به ترتیب دبی جرمی و دمای هوای نفوذی به ساختمان است. ضرایب انتقال حرارت در هر یک از معادلات (۲) تا (۷) برای هر سطح به صورت زیر محاسبه می‌شود:

دیوارهای عمودی [۹]:

$$h = 1/24 |T_* - T_{air}|^{0.72} \quad (8)$$

دیوارهای افقی [۹]:

$$h = 1/52 |T_* - T_{air}|^{0.72} \quad (9)$$

قسمت فوقانی پانل سرمایش سقفی [۱۰]:

$$h_* = F_c + 0/134 |T_{air} - T_*|^{0.75} \quad (10)$$

قسمت تحتانی پانل سرمایش سقفی [۱۰]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i \quad (14)$$

که در آن:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (16)$$

معادله بقای گونه:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma \Phi \right) \quad (17)$$

که در آنها راستاهای مختصات با مقادیر x_i مشخص $(x_i = (x, y))$ و راستاهای بردار سرعت با $(u_i = (u, v))$ نمایش داده شده است. معادله (۱۴) به معادله ناویر-استوکس مشهور است. حل این معادله در کنار معادلات (۱۳)، (۱۶) و (۱۷) برای تحلیل مسائل مرتبط با انتقال حرارت و انتقال جرم، به تعیین الگوی جریان، توزیع دما و توزیع غلظت گونه منجر می‌شود. در این معادلات، مجهولات شامل دو سرعت در راستای X و Y (u و v)، فشار ترمودینامیکی (p)، دما (T) و غلظت (Φ) می‌شود.

در اینجا به علت وجود جابه‌جایی القایی بر اثر وجود سطوح گرم و سرد دیوارها و پانل و همچنین جابه‌جایی اجباری به دلیل ورود و خروج جرم از دریچه تغذیه کننده و خروجی هوا، مسأله مدنظر از نوع جابه‌جایی ترکیبی

جریان وزشی در فضای مورد بحث تحت تأثیر دو عامل است؛ اول، اختلاف دما بین سطح گرم و هوای داخل که منجر به جریان رو به بالا در مجاورت دیوار می‌شود و دوم، اثر مرز جامد که به نوعی سبب تشکیل توزیع سرعت با لایه مرزی سرعت و لایه مرزی حرارت در فضا می‌شود. از آنجا که انتقال حرارت سطوح دیوار داخلی به دلیل همسایگی اتاق با اتاق‌هایی با شرایط یکسان، ناچیز است. در نتیجه جریان القایی ایجاد شده در این فضا، بیشتر متأثر از سطوح گرم خارجی، پارتیشن و سطح سرد پانل است.

عامل اثر سطح جامد، به‌عنوان اثر تشکیل لایه مرزی شناخته می‌شود. حداکثر مرتبه ضخامت لایه مرزی در سطوح داخلی در رابطه زیر صدق می‌کند [۱۲]:

$$O(\delta) \sim O(L / \sqrt{Re_L}) \sim O(10^{-2}) \quad (12)$$

از آنجا که حداکثر مرتبه لایه مرزی در سطوح داخلی به مراتب از ابعاد اتاق کمتر است ($O(10^{-2}) \ll 1$). در نتیجه ضخامت لایه مرزی تشکیل شده بر اثر دیوارهای جانبی در مقایسه با ابعاد اتاق ناچیز بوده و تأثیر چندانی بر توزیع جریان هوا در صفحه $X-Y$ نمی‌گذارد. بنابراین با اطمینان می‌توان از فرض دوبعدی بودن جریان در مدل‌سازی الگوی جریان و انتقال حرارت استفاده کرد. با فرضیه‌های بالا، معادلات حاکم بر جریان سیال، بقای انرژی و گونه در مختصات دکارتی، به‌صورت زیر خلاصه می‌شود [۱۳]:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (13)$$

معادله مومنتم:

ورودی از دریچه تأمین هوا و خروجی از خروجی‌ها است. البته نرخ تشکیل میعان به پارامترهایی مانند خواص سطح نیز بستگی دارد که به‌طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند بر میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل مؤثر باشد. از آنجا که این خصوصیات در مدل‌سازی حاضر ملحوظ نشده می‌توان $m\&_{cond}$ محاسبه شده از معادله (۱۸) را به‌عنوان حداکثر نرخ میعان قابل حصول یا حداکثر قابلیت تشکیل میعان تلقی کرد [۱۵].

۴- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی اثر تغییر ارتفاع پانل بر عملکرد سیستم سرمایش تابشی سقفی، سه ارتفاع ۲/۸، ۲/۷ و ۲/۶ متری برای پانل (نسبت به کف اتاق) با سه نرخ تهویه ۰/۶۱، ۱/۲۱ و ۲/۴۲ بار در ساعت در نظر گرفته شده است. برای بررسی شرایط آسایش حرارتی، دمای پانل بین ۱۳ تا ۱۹ درجه سلسیوس انتخاب و سایر موارد بدون تغییر در نظر گرفته شده است. شکل (۲) تغییرات میانگین رأی افراد (PMV) را بر حسب دما برای سه ارتفاع ۲/۸، ۲/۷ و ۲/۶ متری پانل از کف اتاق نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، منحنی تغییرات آسایش حرارتی بر حسب تغییر دما تقریباً خطی و برای سه ارتفاع مذکور، شیب آن تقریباً یکسان است.

دیده می‌شود که برای دمای ثابت، با کاهش ارتفاع پانل از ۲/۸ به ۲/۶ متر، آسایش حرارتی به سمت اعدادی کمتر - به بیانی دیگر احساس خنکی بیشتر - میل می‌کند به‌طوری که در دمای ۲۹۰ کلوین، کاهش ارتفاع یاد شده، PMV را از ۰/۳۱ به ۰/۲۶ کاهش می‌دهد. البته یادآوری می‌شود که در تحقیق حاضر سرعت هوای ورودی از دریچه‌های تأمین هوا چندان

است که در آن ترکیبی از دو جابه‌جایی اجباری و آزاد صورت می‌گیرد. در این حالت هر چند نقش هر یک از دو مکانیزم جابه‌جایی آزاد و اجباری کم باشد، در رفتار جریان تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت [۱۱].

برای حل معادلات بقا (معادلات ۱۳ تا ۱۸) از برنامه نوشته شده CFD استفاده شده است. در این برنامه از تقریب بوزینسک برای تقریب جمله شناوری و از الگوریتم سیمپل^۱ که توسط پاتانکار [۱۴] پیشنهاد شده برای بر طرف کردن درگیری سرعت و فشار استفاده شد. به جز چگالی، سایر خواص ترموفیزیکی در سیال ثابت فرض و برای انفصال معادلات از طرح پیوندی^۲ استفاده شد. از مقدار بسیار بزرگ 1×10^6 برای مدل‌سازی پانل تشعشی استفاده شد. شرط عدم لغزش و شرط دمای ثابت در سطوح، شار جرمی صفر در دیوارها، مقدار معلوم نسبت رطوبت روی پانل (در صورتی که دمای پانل از دمای نقطه شبنم پایین‌تر باشد) و هوای ورودی به‌عنوان شرایط مرزی معادلات بقا در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی در مدل‌سازی حاضر، کوچکتر شدن باقی‌مانده‌های سرعت و پیوستگی از 10^{-4} ، انرژی و بقای گونه از 10^{-6} و برقراری توازن انرژی در سطوح در نظر گرفته شد. پس از همگرایی جوابها، نرخ تشکیل میعان بر روی پانل - در صورتی که دمای پانل زیر نقطه شبنم قرار گیرد - از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m\&_{cond} = m\&_{vent} (\Phi_{in} - \Phi_{out}) \quad (18)$$

در این معادله $m\&_{cond}$ نرخ تشکیل میعان، $m\&_{vent}$ نرخ تهویه و Φ_{in} و Φ_{out} به‌ترتیب نسبت رطوبت هوای

1. SIMPLE
2. Hybrid

بالا نیست و جریان سیال در فضای مورد بررسی تحت تأثیر جریان القایی که به سبب اختلاف دمای بین پانل و دیوارها به وجود آمده، است.

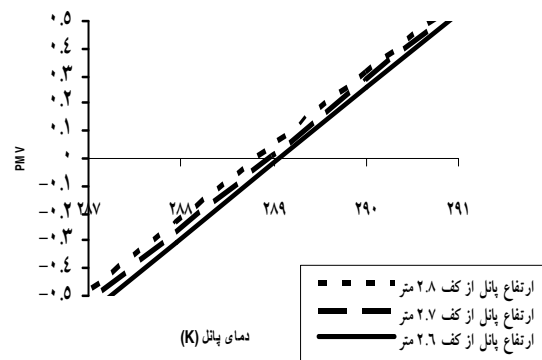
از شکل (۲) پیداست که برای تأمین آسایش افراد و ایجاد شرایط مطلوب (در اینجا شرط $PMV=+0/5$ به عنوان قید طراحی در نظر گرفته شده) دمای پانل باید زیر ۱۸ درجه سلسیوس نگاه داشته شود. از آنجا که این دما زیر دمای نقطه شبنم است در نتیجه سبب میعان بخار آب بر روی پانل می‌شود. به همین دلیل در اینجا علاوه بر آسایش افراد، به بررسی چگونگی تشکیل میعان نیز می‌پردازیم.

شکل (۳) نشان‌دهنده تأثیر دمای پانل بر میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل برای مقادیر مختلف ارتفاع و نرخ تهویه است و پیداست که افزایش دمای پانل، سبب کاهش میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل می‌شود.

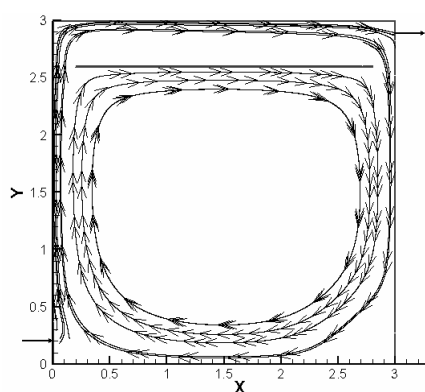
ملاحظه می‌شود که در دماهای پایین، اختلاف بین میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل برای سه ارتفاع ۲/۸، ۲/۷ و ۲/۶ متر زیاد است و با افزایش دمای پانل این اختلاف کمتر می‌شود. در هر سه شکل میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل برای ارتفاع ۲/۸ متری بیشینه و برای ارتفاع ۲/۷ متری کمینه است. علت این را باید در چگونگی توزیع نسبت رطوبت و نحوه تشکیل شبنم بررسی کرد. شار گرمی میعان با رابطه $q_{\Phi} = Ah_m \Delta\Phi$ توصیف می‌شود. در این رابطه A سطح پانل، $\Delta\Phi$ اختلاف بین نسبت رطوبت پانل و هوای مجاور و h_m ضریب انتقال جرم است که به سرعت، ضریب نفوذ جرم، هندسه و سایر عوامل بستگی دارد. در تحقیق حاضر به علت ثابت بودن سطح پانل برای سه ارتفاع، دلیل تفاوت میزان میعان باید به h_m و $\Delta\Phi$ بستگی داشته باشد. به منظور توصیف واضح‌تر پدیده، شکل توزیع نسبت رطوبت و الگوی جریان را در فضای اتاق برای سه ارتفاع ۲/۶، ۲/۷ و ۲/۸ متری نشان داده‌ایم. شکل (۴) نشان‌دهنده الگوی جریان در فضای اتاق برای سه ارتفاع ۲/۸، ۲/۷ و ۲/۶ متری از پانل نسبت به کف اتاق است. همان‌طور که در این شکل‌ها پیداست کاهش ارتفاع پانل سبب به جریان افتادن سیال در فضای بالای پانل می‌شود. به حرکت افتادن سیال به معنای افزایش ضریب انتقال جرم، h_m و در نتیجه آن افزایش میزان تشکیل شبنم است. از سوی دیگر بنا به شکل (۵) با کاهش ارتفاع پانل، اختلاف بین نسبت رطوبت پانل و هوای مجاور پانل، $\Delta\Phi$ کاهش می‌یابد. از این‌رو به نظر می‌رسد که افزایش ضریب انتقال جرم و کاهش $\Delta\Phi$ در ارتفاع مشخصی سبب پیدایش نقطه کمینه از نظر میزان تشکیل شبنم شود.

شکل (۳) نشان‌دهنده تأثیر دمای پانل بر میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل برای مقادیر مختلف ارتفاع و نرخ تهویه است و پیداست که افزایش دمای پانل، سبب کاهش میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل می‌شود.

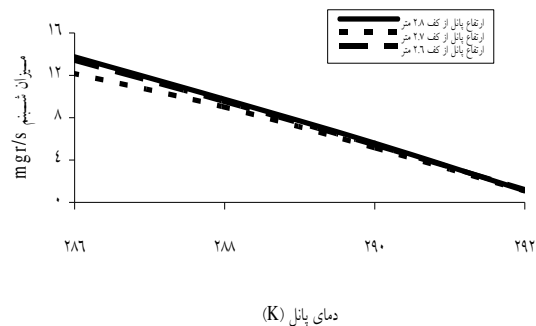
شکل (۳) نشان‌دهنده تأثیر دمای پانل بر میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل برای مقادیر مختلف ارتفاع و نرخ تهویه است و پیداست که افزایش دمای پانل، سبب کاهش میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل می‌شود.



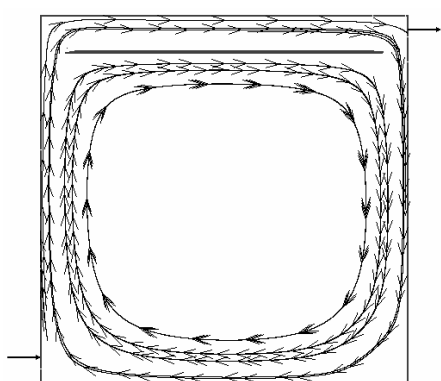
شکل ۲ منحنی تغییرات آسایش حرارتی بر حسب دمای پانل برای سه مقدار ارتفاع پانل از کف اتاق و ۰/۶۱ بار تعویض هوا در ساعت



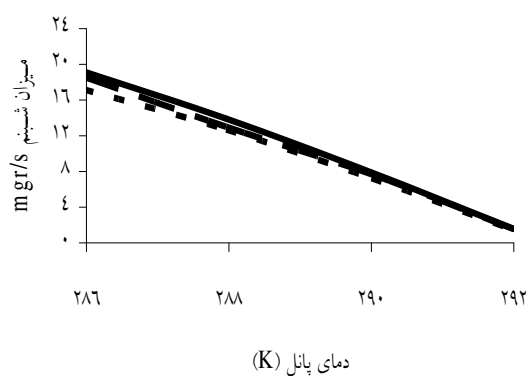
(الف)



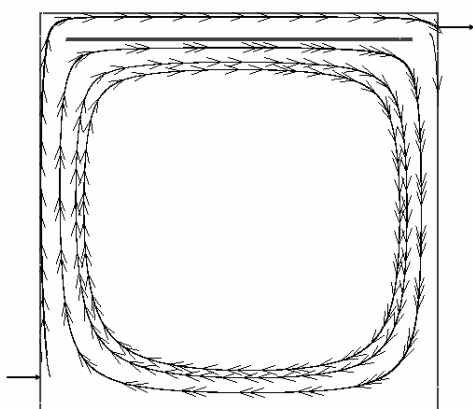
(الف)



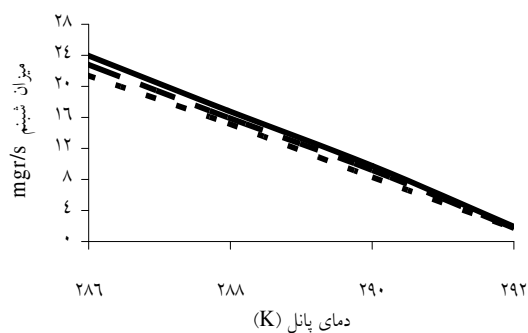
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

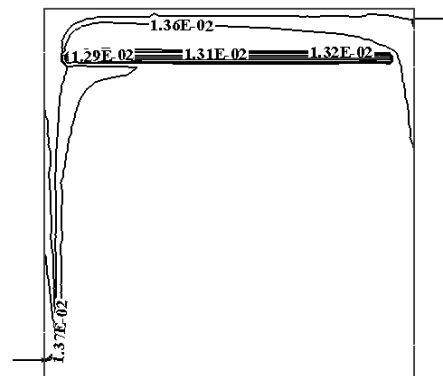
شکل ۴ الگوی جریان در فضای مورد بررسی برای ۱/۲۱ بار تعویض هوا در ساعت الف) برای پانل با ارتفاع ۲/۶ متر از کف ب) برای پانل با ارتفاع ۲/۷ متر از کف ج) برای پانل با ارتفاع ۲/۸ متر از کف

شکل ۳ منحنی تغییر میزان تشکیل شبنم بر روی پانل برای ارتفاع‌های مختلف پانل از کف الف) به‌ازای ۰/۶۱ بار تعویض هوا در ساعت ب) به‌ازای ۱/۲۱ بار تعویض هوا در ساعت ج) به‌ازای ۲/۴۲ بار تعویض هوا در ساعت

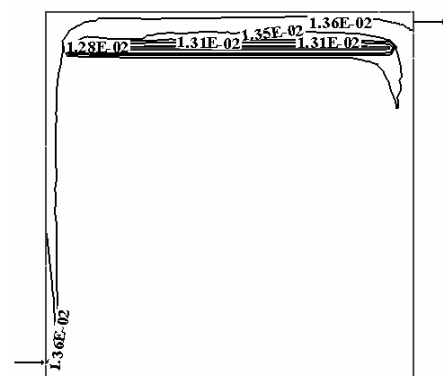
برای بررسی عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی در سه ارتفاع مختلف، باید سه پانل در شرایط ایجاد آسایش حرارتی یکسان مورد بررسی قرار گیرند. یعنی عملکرد سیستم با ایجاد شرایط یکسان برای ساکنان از نظر احساس آسایش حرارتی باید بررسی شود. برای این منظور در این تحقیق $PMV=0/5$ را به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفتیم. شکل (۶) نشان‌دهنده منحنی‌های میزان تشکیل شبنم بر حسب ارتفاع پانل از کف اتاق برای نرخ‌های مختلف از تهویه است. همان‌طور که دیده می‌شود با اعمال شرایط برابر از نظر آسایش حرارتی، اختلاف چشمگیری در میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل‌ها با ارتفاع‌های مختلف مشاهده می‌شود. جدول (۱) درصد اختلاف میزان شبنم تشکیل شده بر روی پانل را بین کمترین حالت و بیشترین حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با اعمال قید آسایش حرارتی یکسان، کاهش ارتفاع پانل سبب کاهش نرخ تشکیل میعان نیز می‌شود به‌طوری که در نرخ‌های مختلف تهویه، کاهش ۷/۷ درصدی در ارتفاع پانل سبب کاهش ۱۳ تا ۲۳ درصدی در نرخ تشکیل میعان می‌شود.

جدول ۱ تأثیر ارتفاع پانل بر روی میزان شبنم تشکیل شده بر

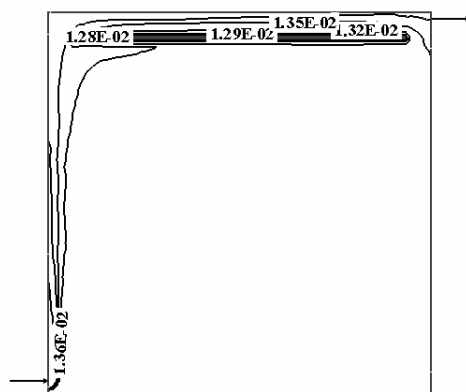
روی پانل	
تعداد تعویض هوا در	تفاوت میعان، بین ارتفاع
ساعت	۲/۸ و ۲/۶ متری
۰/۶۱	٪۱۳/۲۳
۱/۲۱	٪۱۴/۷۰
۲/۴۲	٪۲۲/۸۳



(الف)



(ب)



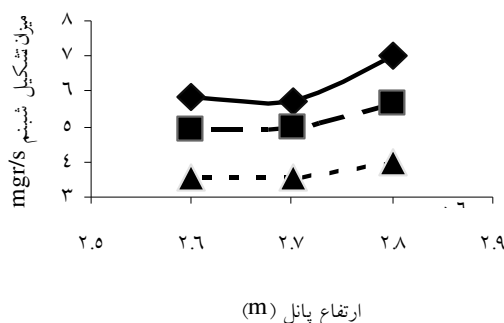
(ج)

شکل ۵ توزیع نسبت رطوبت (الف) ارتفاع پانل ۲/۶ متر (ب) ارتفاع پانل ۲/۷ متر (ج) ارتفاع پانل ۲/۸ متر

$\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$	جمله مربوط به جابه‌جای اجباری	F_c
j	ضریب شکل تشعشعی سطح j به سطح j	F_{i-j}
$\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$	ضریب انتقال حرارت همرفتی	h
(m/s^2)	شتاب جاذبه	g
(Clo)	مقاومت حرارتی لباس	I_{cl}
(W/m.K)	ضریب هدایت گرمایی	k
(m)	طول پانل	l_{ceil}
(kg/s)	دبی جرمی هوای نفوذی	$m\dot{a}_{mf}$
میانگین رأی افراد (شاخص احساس حرارتی افراد)		PMV
(W)	میزان انتقال حرارت	Q
(W/m^2)	نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح	q''
عدد رینولدز		Re
درصد رطوبت نسبی		RH
دمای مرجع (K)		T_o
دمای مطلق (K)		T
دمای سطح بیرون (K)		T_e
سرعت هوا در راستای x (m/s^2)		u
سرعت هوا در راستای y (m/s^2)		v

نمادهای یونانی

α	ضریب جذب تابش متوسط بدن
ε	ضریب صدور تابش
σ	ثابت استفان بولتزمن
ρ	چگالی هوا (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m.s$)
β	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
Γ	ضریب پخش ($\frac{m^2}{s}$)



شکل ۶ تاثیر ارتفاع پانل از کف اتاق بر میزان شبنم تشکیل شده بر پانل برای نرخ‌های مختلف تهویه

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق اثر ارتفاع پانل بر عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی در محدوده مناسبی از نرخ‌های تهویه و دمای پانل بررسی و اثر هر پارامتر بر چگونگی تشکیل میعان و میانگین احساس آسایش افراد مطالعه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ارتفاع پانل سرد عامل موثری در ایجاد شرایط آسایش حرارتی است. و کاهش آن سبب افزایش ضریب دید تابشی سقف سرد نسبت به ساکنان اتاق و در نتیجه افزایش احساس خنکی برای افراد و بهبود پارامتر میانگین احساس آسایش حرارتی افراد (PMV) می‌شود. این همچنین سبب می‌شود که برای شرایطی یکسان از نظر آسایش حرارتی، به سبب افزایش دمای میانگین سقف میزان میعان سقف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
b	ضخامت دیوار (m)
C_p	گرمای ویژه ($J/kg.K$)

- [7] Fanger, P.O., Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970. زیر نویس
- [8] Watson, R.D., and Chapman, K.S, "Handbook of Radiant Heating and Cooling", McGraw-Hill, New York, 2001. * مربوط به سطح Air وابسته به هوا cond مربوط به میعان

۷- منابع

- [9] ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals, American society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineering Inc., Atlanta, 1997.
- [10] Jeong, J.W., and Mumma, S.A., "Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel", building and environment Vol. 42, pp.3176-3185, 2007.
- [11] Jeong, J.W., and Mumma, S.A.; "Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces", Applied Thermal Engineering; Vol. 23, 2003, pp. 2293-2306.
- [12] Bijan, A., Convection Heat Transfer, Wiley, New York, 2003.
- [13] H.B. Awbi, Ventilation of buildings, E & FN SPON, 1998.
- [۱۴] پاتانکار، س.و.، "محاسبات عددی-کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات"، چاپ سوم، ترجمه، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.
- [15] Marek, R., Straub, J.; "Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water", Int. J. Heat and Mass Transfer; Vol.44, 2001, pp39-53.
- [1] Koichi K.; Noriko K., "Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments", Energy and Buildings; Vol.30,1999, pp185-193.
- [2] Stetiu C., 1998, Radiant Cooling in US Office Buildings: Towards Eliminating the Perception of Climate-Imposed Barriers, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- [3] Mumma, S.A.; "Simplified cooling capacity estimation model for top insulated metal ceiling radiant cooling panels", Applied Thermal Engineering; Vol.24, 2004, pp2055-2072.
- [4] Martin, B.; "Indoor air quality in rooms with cooled ceilings. Mixing ventilation or rather displacement ventilation?", Energy and Buildings; Vol. 30, 1999, pp.155-166.
- [۵] ذولفقاری، س.ع.؛ "بهبود سازی عملکرد سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی با تحلیل همزمان مصرف انرژی و آسایش حرارتی"، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [6] Nasr, K. Ben, Chouikh, R., Kerkeni, C., Guizani, A.; "Numerical study of the natural convection in cavity heated from the lower corner and cooled from the ceiling"; Applied Thermal Engineering; Vol. 26, 2006, pp. 772-775.