

# طراحی مناسب نما و پوسته خارجی ساختمان، روشی مؤثر برای جلوگیری از رخداد میعان در سیستمهای سرمایش تابشی سقفی

مهدی معرفت، سید علیرضا ذوالفقاری، امیر امیدوار

دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک

## چکیده

هر چند که نمای خارجی ساختمان پارامتری است که معمولاً توسط معماران و با در نظر گرفتن جنبه زیبایی و نمود ظاهری ساختمان انتخاب می‌شود، ولی تحقیقات حاکی از آنست که نما یکی از عوامل تأثیرگذار بر شرایط حرارتی فضای داخل ساختمان است. این امر به ویژه در مورد نمای دیوارهای در معرض تابش آفتاب اهمیت بیشتری می‌یابد. ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان بیش از سایر خواص آن بر شرایط حرارتی ساختمان تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق به بررسی تأثیر نمای دیوار خارجی بر عملکرد سیستمهای سرمایش تابشی سقفی پرداخته شده است. این بررسی‌ها با توجه به نوع کاربری ساختمان (مسکونی یا اداری) و در گرم‌ترین شرایط آب و هوایی شهر تهران انجام شده است. همچنین فرض شده است که از نفوذ تابش آفتاب از طریق پنجره به داخل اتاق جلوگیری شده است و تنها تابشهای پراکنده نور خورشید به اتاق راه می‌یابد. این شرایط از دیدگاه کاربردی با استفاده از سایبان و یا استفاده از شیشه‌های بازتابنده برای پنجره تا حد قابل قبولی تطابق دارد. نتایج حاکی از آنست که با انتخاب مناسب نمای ساختمان علاوه بر کاهش مصرف انرژی و حفظ شرایط آسایش حرارتی مطلوب، می‌توان از ایجاد پدیده میعان بر روی پانلهای سرمایش سقفی جلوگیری نمود. این در حالی است که تحقیقات پیشین تنها از وزش هوا بعنوان عاملی برای کنترل پدیده میعان نام می‌برند.

واژه‌های کلیدی: سرمایش تابشی سقفی، نما، میعان

## مقدمه

به طور کلی سیستمهای تهویه مطبوع دو وظیفه عمده را بر عهده دارند؛ یکی جبران بارهای حرارتی و برودتی و دیگری تعویض هوا و کنترل آلاینده‌های هوای داخل ساختمان. سیستمهای سرمایش و گرمایش جابه‌جایی هر دو این وظایف را بطور همزمان انجام می‌دهند؛ بطوریکه 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 به دلیل اینکه وزش هوا در داخل ساختمان کاملاً محسوس است، اغلب ساکنان اینگونه ساختمانها از احساس سرمای موضعی در برخی از نقاط بدن خود شکایت دارند. در کنار سیستمهای جابه‌جایی، سیستمهای گرمایش و سرمایش دیگری وجود دارند به نام سیستمهای تابشی.

در سیستمهای تابشی به دلیل عدم وزش هوا، نارضایتی حرارتی موضعی کاهش یافته و همچنین عملکرد تابشی اینگونه سیستمها باعث از بین رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل ساختمان می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که سیستمهای تابشی شرایط آسایش حرارتی مطلوبتری را در ساختمان فراهم نمایند [۱]. ایجاد شرایط آسایش حرارتی مطلوب در کنار صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان از جمله عوامل مهمی است که نظر مهندسان تأسیسات و طراحان ساختمان را به سمت استفاده از سیستمهای سرمایش تابشی سقفی سوق داده است. از سوی دیگر استفاده از سقف اتاق به عنوان سطح مؤثر تبادل حرارت تابشی و عدم وجود دستگاههای تهویه مطبوع در داخل فضای اتاق باعث می‌شود که معماران با محدودیتهای کمتری در طراحی فضاهای داخلی ساختمان روبرو شوند و بتوانند از کل فضای اتاق به عنوان فضای مؤثر استفاده کنند.

## فهرست علائم و نشانه‌ها

$Q$ : میزان انتقال حرارت ( $W$ )	$A$ : مساحت ( $m^2$ )
$q''$ : نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح ( $W/m^2$ )	$b$ : ضخامت دیوار ( $m$ )
$T$ : دمای مطلق ( $K$ )	$C_p$ : گرمای ویژه ( $J/kg.K$ )
$t$ : دما ( $^{\circ}C$ )	$f_{cl}$ : فاکتور لباس
$T_{mrt}$ : دمای متوسط تابش ( $K$ )	$F_{i-j}$ : ضریب شکل تشعشعی سطح $i$ به سطح $j$
$W$ : نرخ کار ( $W$ )	$h$ : ضریب انتقال حرارت همرفتی ( $W/m^2 K$ )
<b>نمادهای یونانی:</b>	$I_{cl}$ : مقاومت حرارتی لباس ( $Clo$ )
$\alpha$ : ضریب جذب تابش متوسط بدن	$k$ : ضریب هدایت گرمایی ( $W/m.K$ )
$\mathcal{E}$ : ضریب صدور تابش	$\dot{m}_{inf}$ : دبی جرمی هوای نفوذی ( $kg/s$ )
$\sigma$ : ثابت استیفتان بولتزمن	$M$ : نرخ متابولیک ( $met$ )
	PMV: میانگین رأی افراد (شاخص احساس حرارتی افراد)

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 به عنوان یکی از جایگزین‌های سیستمهای سرمایشی مطرح شد [۲]. اما این سیستمها نتوانستند تا مدتها در بازار امریکا نفوذ پیدا کنند. عدم اقبال این سیستمها در امریکا به خاطر چند دلیل مهم و اساسی بود. از جمله این دلایل می‌توان به میعان بخار آب روی پانلها و محدودیت ظرفیت سرمایشی اشاره نمود. البته قیمت اولیه نسبتاً زیاد این سیستمها نیز چندان بی‌تأثیر نبود [۲].

علیرغم تمام ویژگی‌های مثبتی که برای سیستمهای سرمایش سقفی ذکر شد، میعان یکی از مرسوم-ترین و اساسی‌ترین معایب این سیستمهاست. در برخی از مناطق که رطوبت هوا نسبتاً زیاد است، مانند بخشهایی از امریکا و قسمتهایی از آسیا مانند ژاپن و هنگ کنگ، بخار آب موجود در هوا در روی پانلهای سرد سقفی میعان یافته، قطرات آب از سقف چکه می‌کند. در واقع سیستمهای سرمایش سقفی تنها قادر به جبران بار برودتی محسوس هستند و بار نهان را نمی‌توانند منتقل کنند. به همین علت میعان یکی از مشکلات عمده اینگونه سیستمهاست. این محدودیت محققان را بر آن داشت تا به دنبال روشهایی برای بهبود عملکرد این سیستمها باشند. تاکنون تحقیقات زیادی در جهت رفع این نقیصه انجام گرفته است و راهکارهای زیادی نیز پیشنهاد شده است. از جمله مهمترین و کاربردی‌ترین روشهای پیشنهادی، استفاده از سیستمهای تهویه مجزا در کنار پانلهای سرمایش سقفی است. به عبارت دیگر در این روش، تهویه و سرمایش بطور مستقل از یکدیگر صورت می‌گیرد.

به منظور کاهش احتمال رخداد میعان بر روی پانلهای سرمایش سقفی، کومودا<sup>۱</sup> و همکارانش 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 نمود.

اخیراً در ایران نیز استفاده از سیستمهای تابشی رو به افزایش بوده است. بطوریکه 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. استفاده از پانلهای سرمایش سقفی به تازگی 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 در برخی از ساعات روز دمای نقطه شبنم از  $15^{\circ}C$  تجاوز می‌کند [۳]. بنابراین به نظر می‌رسد که در تهران، پدیده میعان که یکی از عمده‌ترین عوامل محدود کننده در استفاده از سیستمهای سرمایش تابشی سقفی است باید مورد توجه قرار گیرد. البته لازم به ذکر است که محدودیت میعان در اکثر نقاط ایران در مقایسه با کشورهایمانند ژاپن، هنگ کنگ و همچنین بخشهایی از امریکا شدید نیست ولی در برخی از ساعات شبانه روز امکان رخداد میعان بر روی پانلهای سرمایش سقفی وجود دارد.

به طور کلی در طراحی پانلهای سرمایش تابشی سقفی باید سعی شود که تا حد امکان دمای پانلها از دمای نقطه شبنم کمتر نباشد. بنابراین هرچه دمای عملکرد پانلهای سقفی بیشتر باشد امکان رخداد

<sup>1</sup> - Komoda

میعان نیز به مراتب کاهش می‌یابد. طراحی پانلهایی با دمای عملکرد بالاتر محقق نخواهد شد مگر با کاهش بار برودتی اعمال شده به فضای داخل ساختمان. بنابراین به نظر می‌رسد که با بهره‌گیری از طرحهای معماری صحیح و انتخاب مصالح ساختمانی مناسب بتوان پدیده میعان را کنترل نمود. در فصل تابستان بخش اعظمی از بار برودتی تحمیل شده به ساختمان در اثر تابش خورشید به دیوارهای خارجی است. با کاهش میزان تابش خورشیدی جذب شده توسط جدارهای خارجی ساختمان می‌توان تا حد زیادی بار برودتی را کاهش داد. نمای ساختمان و مصالح ساختمانی بکار رفته در پوسته خارجی آن اگرچه بیشتر جنبه تزئینی دارد اما می‌تواند نقش بسیار مؤثری در کنترل جذب تابشهای خورشیدی ایفا نماید. تاکنون در زمینه طراحی نماهای ساختمان و بهبود عملکرد حرارتی آنها نیز تحقیقاتی انجام شده است. اکثر این تحقیقات در زمینه نماهای تهویه شونده می‌باشد. در این مقاله به بررسی تأثیر نمای ساختمان بر عملکرد سیستمهای سرمایش تابشی سقفی و همچنین کنترل پدیده میعان در اینگونه سیستمها پرداخته شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای مناسبی برای معماران و طراحان سیستمهای تهویه مطبوع ساختمانها باشد.

#### معادلات حاکم

به منظور بررسی آسایش حرارتی در فضای نمونه مذکور، ابتدا بایستی دمای هوای داخل و نیز دمای سطوح داخلی را محاسبه نمود. از این رو معادله بالانس انرژی بر روی هر یک از سطوح نوشته می‌شود. اگر از نشانه  $i$  بعنوان زیرنویس برای مشخص کردن خواص مربوط به سطح استفاده نماییم، معادله بالانس انرژی متناظر با هر سطح بصورت زیر در می‌آید. این معادله شامل دو بخش اصلی جابه‌جایی و تشعشع می‌باشد و به طور کلی مطابق رابطه زیر است [۴]:

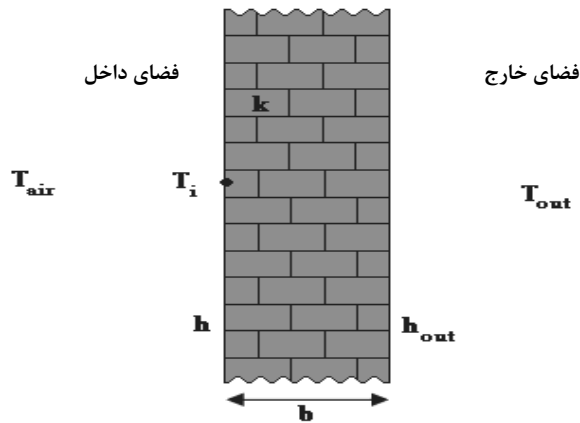
$$h_i A_i (T_{air} - T_i) + \varepsilon_i \sigma A_i \left\{ \sum_{k=1}^N F_{i-k} (T_k^4 - T_i^4) \right\} = Q_i \quad (1)$$

اولین جمله سمت چپ معادله (۱) مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی میان سطح داخلی دیوار و هوای اتاق می‌باشد. همچنین دومین جمله، به انتقال حرارت دریافتی سطح از طریق تشعشع سایر سطوح اتاق مربوط است.  $Q_i$  میزان حرارت انتقال یافته از سطح  $i$  می‌باشد و مطابق رابطه زیر شامل سه ترم است.

$$Q_i = Q_{c(i)} - Q_{r-in(i)} - Q_{r-out(i)} \quad (2)$$

که  $Q_{c(i)}$  مقدار حرارت انتقال یافته توسط مکانیزمهای هدایت و جابه‌جایی از سطح داخلی دیوار به محیط خارج می‌باشد. همچنین  $Q_{r-in(i)}$ ، سهم سطح  $i$  از تابش خورشیدی نفوذی به اتاق از طریق پنجره است.  $Q_{r-out(i)}$  نیز میزان حرارت تابشی خورشید بر روی سطح خارجی دیوار بیرونی می‌باشد. با توجه به شکل ۲ بعنوان نمایی از یک دیوار جانبی اتاق، مقادیر هریک از این ترمها مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود [۵].

$$Q_{c(i)} = \left( \frac{T_i - T_{out(i)}}{\frac{b_i}{k_i} + \frac{1}{h_{out(i)}}} \right) A \quad (۳)$$



شکل ۱- نمایی از یکی از سطوح جانبی اتاق

شامل دو ترم تابش مستقیم آفتاب ( $Q_{r-direct(i)}$ ) و تابش پراکنده نور خورشید ( $Q_{r-diffuse(i)}$ ) است [۶].

$$Q_{r-in(i)} = Q_{r-direct(i)} + Q_{r-diffuse(i)} \quad (۴)$$

$$Q_{r-direct(i)} = q_{direct}'' A_w \frac{A_{s(i)}}{A_{st}} \quad (۵)$$

$$Q_{r-diffuse(i)} = q_{diffuse}'' A_w F_{w-i} \quad (۶)$$

که  $A_w$  مساحت پنجره،  $A_{s(i)}$  مساحت آفتاب تابیده شده بر سطح  $i$ ،  $A_{st}$  مساحت کل آفتاب تابیده شده بر سطوح داخلی،  $F_{w-i}$  ضریب شکلی پنجره به سطح  $i$ ،  $q_{direct}''$  حرارت تابشی ورودی از پنجره ناشی از تابش مستقیم آفتاب به ازای واحد سطح و  $q_{diffuse}''$  حرارت تابشی ورودی از پنجره ناشی از تابش پراکنده نور خورشید به ازای واحد سطح می‌باشد. مجموع مقادیر  $q_{diffuse}''$  و  $q_{direct}''$ ، بیانگر کل انرژی تابشی خورشید بر واحد سطح پنجره است و بصورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$q_s'' = q_{diffuse}'' + q_{direct}'' \quad (۷)$$

البته همانطور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، در معادلات تابش از پنجره، جمله تابش مستقیم ناچیز فرض شده است. لذا تنها تابشهای پراکنده به داخل اتاق راه می‌یابند.

نیز میزان حرارت تابشی خورشید بر روی سطح خارجی دیوار بیرونی می‌باشد و مطابق رابطه (۸) بدست می‌آید. در محاسبات برای سطوح داخلی ساختمان،  $Q_{r-out(i)}$  برابر صفر در نظر گرفته شده است.

$$Q_{r-out(i)} = q_s'' A_i \quad (۸)$$

در رابطه (۸)  $q_s''$  کل انرژی تابشی خورشید بر واحد سطح دیوار خارجی و  $A_i$  مساحت سطح دیوار خارجی مورد نظر است. همچنین مقدار  $q_s''$  به عرض جغرافیایی محل مورد نظر، جهت دیوار خارجی، دمای هوای داخل اتاق و نیز زمان تابش خورشید بستگی دارد. با آنالیز ساعت به ساعت توسط نرم افزار کریر، میزان  $q_s''$  برای ساختمان در شهری مانند تهران و در بحرانی ترین شرایط آب و هوایی که اوج بار بروندی به سیستم سرمایه‌ش ساختمان اعمال می‌شود، بدست آمد.  $h_i$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سطوح داخل اتاق و  $h_{out(i)}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از سطوح خارج از اتاق می‌باشد [۷].

معادله بالانس انرژی علاوه بر سطوح داخلی بایستی برای هوا نیز نوشته شود. این معادله برای هوا چنین است:

$$\dot{m}_{inf} C_{p,air} (T_{air} - T_{inf}) = \sum_{i=1}^N h_i A_i (T_i - T_{air}) \quad (۹)$$

که  $T_{inf}$  و  $\dot{m}_{inf}$  به ترتیب دبی جرمی و دمای هوای نفوذی به ساختمان است. گام بعدی پس از محاسبه دمای هوا و نیز دمای سطوح داخلی اتاق، محاسبه میانگین احساس حرارتی (PMV) ساکنین اتاق می‌باشد. برای این منظور از مدل فنگر<sup>۲</sup> استفاده شده است. در مدل فنگر، هفت پارامتر مهم و مؤثر بر آسایش حرارتی وجود دارد که عبارتند از [۸]:

- نرخ متابولیک
- میزان لباس
- میزان فعالیت
- دمای خشک (Dry bulb temperature)
- دمای متوسط تابش (MRT)
- سرعت جریان هوا
- رطوبت نسبی

<sup>۲</sup> - Fanger

سه پارامتر اول مربوط به عوامل انسانی و چهار پارامتر دیگر عوامل محیطی هستند. فنگر رابطه‌ای را ارائه نموده است که هفت پارامتر مذکور را در قالب یک پارامتر (PMV) بیان می‌کند [۸]:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} \times M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - T_{mrt}^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (10)$$

که:

$$t_{cl} = 35.5 - 0.028(M - W) - 0.155 I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - T_{mrt}^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (11)$$

مقدار PMV بین ۳- و ۳+ می‌باشد که طبق دستورالعمل تأسیساتی ASHRAE هر عدد صحیح بین این دو مقدار به نوعی بیانگر احساس حرارتی ساکنان ساختمان از شرایط محیطی است [۶]. بطوریکه: ۳+ خیلی گرم، ۲+ گرم، ۱+ کمی گرم، ۰ خنثی، ۱- کمی سرد، ۲- سرد، ۳- خیلی سرد. استاندارد آسایش حرارتی ایزو ۷۷۳۰، محدوده  $PMV < 0.5 < PMV < 0.5$  را بعنوان محدوده قابل قبول برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند.

در رابطه فنگر،  $T_{mrt}$  دمای متوسط تابش است و چنین محاسبه می‌شود [۸ و ۱۰]:

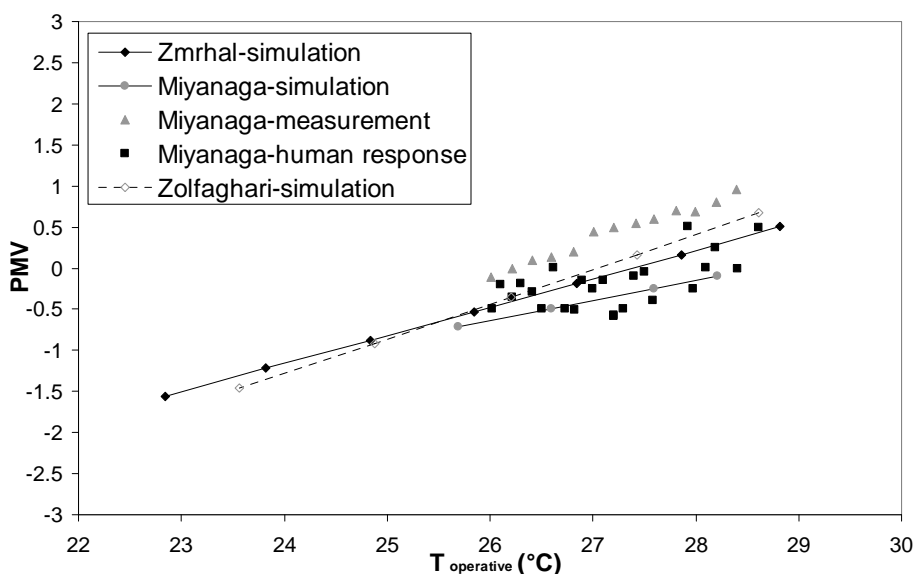
$$T_{mrt}^4 = T_1^4 F_{P-1} + T_2^4 F_{P-2} + \dots + T_N^4 F_{P-N} \quad (12)$$

عبارت  $F_{P-1}$  تا  $F_{P-N}$  ضرایب دید بدن انسان با هر یک از سطوح جانبی است. این مقادیر با توجه به موقعیت افراد در اتاق و نیز وضعیت آنها اعم از نشسته یا ایستاده قابل محاسبه می‌باشد [۱۱].

### اعتبار سنجی معادلات حاکم

پیش از اینکه تأثیر نمای ساختمان بر عملکرد سیستم سرمایش تابشی سقفی مورد بررسی قرار گیرد، باید از صحت و اعتبار معادلات حاکم و نحوه مدلسازی انجام شده برای سیستم سرمایش سقفی اطمینان حاصل نمود. برای این منظور از مقایسه نتایج کد کامپیوتری توسعه یافته در این تحقیق با نتایج تحقیقات Zmrhal و همکارانش استفاده شده است [۱۲]. ایشان طی تحقیقاتشان به مدلسازی شبیه‌سازی اتاقی مجهز به سیستم سرمایش تابشی سقفی پرداخته‌اند و نتایج حاصل از تحقیقات خود را توسط شبیه‌سازی و اندازه‌گیریهای تجربی انجام شده توسط Miyanaga اعتبار سنجی نمودند. در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از تحقیق اخیر با نتایج تحقیقات Zmrhal و Miyanaga پرداخته شده است. مقایسه نتایج حاصل از کد کامپیوتری توسعه یافته در این تحقیق با نتایج تحقیقات Zmrhal و Miyanaga در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲ وابستگی پارامتر آسایش حرارتی افراد با دمای عملکرد ( $t_o$ ) را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدلسازی Zmrhal، مدلسازی Miyanaga، اندازه‌گیریهای

تجربی Miyanaga و پاسخهای انسانی جمع آوری شده توسط Miyanaga با نتایج تحقیق اخیر مقایسه شده است. این مقایسه حاکی از اینست که نتایج تحقیق اخیر همخوانی مناسبی با نتایج تحقیقات پیشین دارد. ضمناً نتایج تحقیق اخیر تطابق بیشتری با اندازه‌گیریهای تجربی Miyanaga نشان می‌دهد. این نتایج صحت و اعتبار مدلسازی اخیر را تا حد زیادی مشخص می‌کند. حال که تا حدی از صحت روش مدلسازی و اعتبار معادلات حاکم اطمینان یافتیم، در ادامه به بررسی تأثیرات نمای ساختمان بر عملکرد سیستم سرمایش سقفی خواهیم پرداخت.



شکل ۲- مقایسه نتایج تحقیقات مختلف در تعیین وابستگی شرایط آسایش حرارتی و دمای عملکرد

### فضای نمونه

به منظور بررسی تأثیرات نمای ساختمان بر عملکرد سیستم سرمایش تابشی سقفی بخصوص مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی حاکم بر آن، اتاقی مکعب شکل با ابعاد ۳ متر (همانند شکل ۳) در نظر گرفته شده است. پنجره‌ای مربع شکل به ضلع ۱ متر، متشکل از شیشه یک جداره سه میلیمتری با ضریب هدایت حرارتی  $0.78 \text{ W/mK}$  بصورت متقارن بر روی دیوار خارجی نصب شده است و سایر دیوارها بعنوان دیوار داخلی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیوار داخلی ۲۰ و ضخامت دیوارهای خارجی ۳۰ سانتیمتر و ضریب هدایت حرارتی آنها نیز بر طبق جداول تهویه مطبوع، به ترتیب  $0.72 \text{ W/mK}$  و  $0.5 \text{ W/mK}$  فرض شده است. کف و سقف اتاق نیز بعنوان جدار داخلی در نظر گرفته شده‌اند. جدار خارجی ساختمان توسط نمای سنگ مرمریت سفید با ضریب جذب تابشی  $0.46$ ، پوشش داده شده است. دمای هوای خارج ۳۷ درجه سانتیگراد است و هوای اتاق در هر ساعت، یکبار توسط هوای تازه‌ای با دمایی معادل دمای هوای خارج، جایگزین می‌شود. ضریب سطوح مختلف نیز چنین در نظر گرفته شده است:

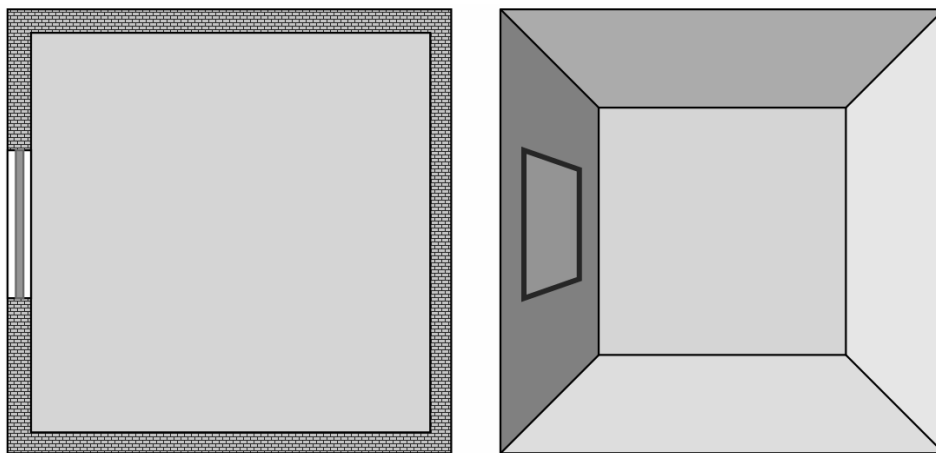


$$\varepsilon_{wall} = 0.9 \quad , \quad \varepsilon_{ceiling} = 0.9 \quad , \quad \varepsilon_{floor} = 0.9 \quad , \quad \varepsilon_{window} = 0.95$$

لازم به ذکر است که ضریب صدور تابشی کف، بسته به نوع پوشش کف می‌تواند از ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ تغییر کند. بنابراین در این مقاله مقدار متوسط ۰/۹ لحاظ شده است.

کلیه محاسبات برای شرایط آب و هوایی شهر تهران و برای نیمه مردادماه یعنی بحرانی‌ترین شرایط بر عملکرد سیستم‌های سرمایشی صورت گرفته است. همچنین نفوذ تابش پراکنده نور خورشید به داخل اتاق از طریق پنجره، پیش فرض محاسبات انجام شده می‌باشد. این شرایط با حالتی که از نصب سایه بان بر روی پنجره استفاده شود، تا حد قابل قبولی تطابق دارد.

با توجه به تفاوت‌هایی که میان شرایط آسایش حرارتی و پارامترهای مؤثر بر آن در فضاهای اداری و مسکونی وجود دارد و نیز وجود فرصت سازگاری برای ساکنان فضاهای مسکونی و عدم وجود آن در فضاهای اداری، باعث شده است تا به فضاهای اداری و مسکونی بصورت مستقل نگاه شود. بنابراین در این مقاله، تأثیر نمای ساختمان بر شرایط حرارتی ساختمان در فضاهای مسکونی و اداری بطور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شرایط آسایش حرارتی برای افراد ساکن در فضای مسکونی و اداری مورد بررسی قرار گرفته است. برای فضای اداری میزان پوشش افراد  $0.8 \text{ clo}$ ، نرخ متابولیک  $1.2 \text{ met}$  و سرعت متوسط هوا در اتاق برابر با  $0.25$  متر بر ثانیه لحاظ گردیده است. برای فضای مسکونی نیز میزان پوشش افراد  $0.4 \text{ clo}$ ، نرخ متابولیک  $1 \text{ met}$  و سرعت متوسط هوا در اتاق برابر با  $0.15$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین رطوبت نسبی هوای اتاق ۵۰٪ می‌باشد.



شکل ۳- نمایی کلی از فضای نمونه

### تأثیر نمای ساختمان

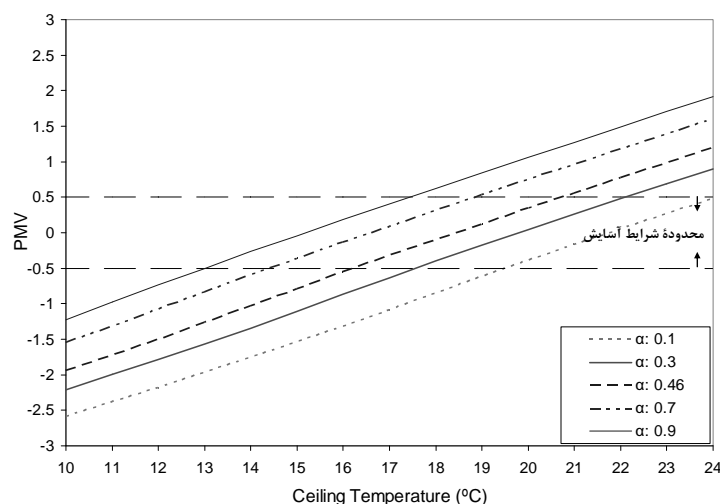
در این تحقیق تأثیر ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان بر شرایط حرارتی ساختمان به ازای ضریب جذب حرارت تابشی نمای بین  $\alpha = 0.1$  و  $\alpha = 0.9$  مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین

تغییرات شرایط حرارتی ساختمان نسبت به حالت مبنا سنجیده شده است. منظور از حالت مبنا شرایط مذکور در بخش فضای نمونه است. بنابراین طبق شرایط مندرج در بخش فضای نمونه، نمای ساختمان از جنس سنگ مرمریت سفید و با ضریب جذب حرارت تابشی برابر  $\alpha = 0.46$  می باشد. ضریب جذب حرارت تابشی برخی از نماها و مصالح ساختمانی برای آشنایی بیشتر خوانندگان در جدول زیر آمده است [۵ و ۶].

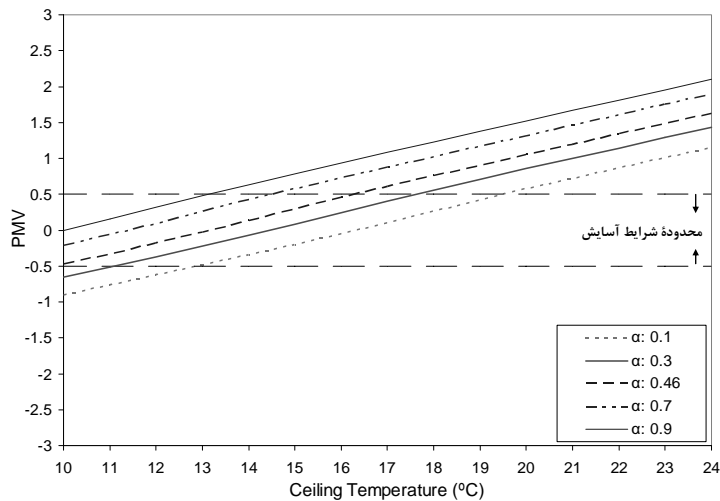
با اعمال مقادیر دمای بین  $10^{\circ}C$  تا  $24^{\circ}C$  بر روی سقف سرد، وابستگی متوسط پارامتر آسایش حرارتی حاکم بر اتاق نسبت به دمای پانل سرمایش سقفی برای فضاهای مسکونی و به ازای ضرایب جذب حرارت تابشی مختلف نمای ساختمان، مطابق شکل ۴ بدست می آید. نتایج مشابه برای فضاهای اداری در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱- ضریب جذب تابشی برخی از مصالح ساختمانی مرسوم برای نمای ساختمان

جنس نما یا مصالح ساختمانی	ضریب جذب حرارت تابشی
پوشش بتنی (رنگ شده)	۰/۹
سرامیک	۰/۹
آجر قرمز	۰/۷۵
پوشش بتنی (رنگ نشده)	۰/۷۳
آجر قرمز (پردو)	۰/۶۳
مرمر سفید	۰/۴۶
گرانیت	۰/۴۵
خاک رس	۰/۳۹
شن	۰/۲۹

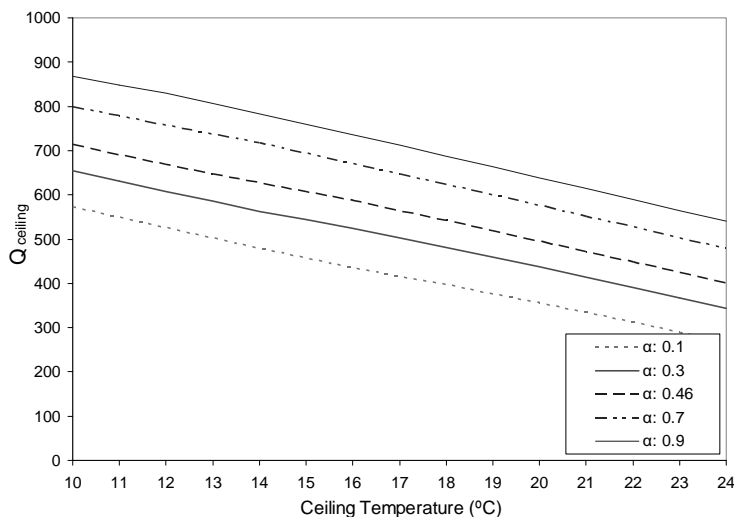


شکل ۴- رابطه میان متوسط پارامتر آسایش حرارتی حاکم بر اتاق و دمای سقف سرد به ازای مقادیر مختلف ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان در فضای مسکونی

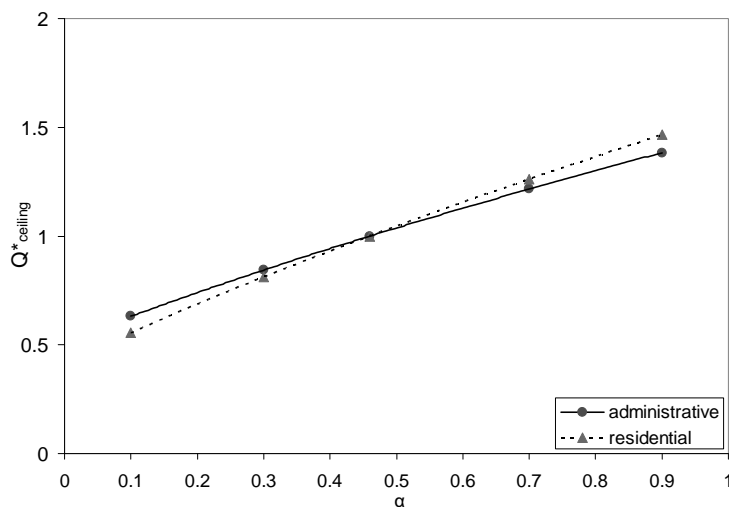


شکل ۵- رابطه میان متوسط پارامتر آسایش حرارتی حاکم بر اتاق و دمای سقف سرد به ازای مقادیر مختلف ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان در فضای اداری

وابستگی بار برودتی ساختمان به دمای سقف به ازای مقادیر مختلف برای ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین شکل ۷ میزان حداقل بار برودتی لازم برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در اتاق را بر حسب ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آنست که برای فضاهای مسکونی تأثیرات نما بر میزان بار برودتی ساختمان بیشتر از فضاهای اداری است. چنانکه شیب تغییرات  $Q_{ceiling}^*$  (بار برودتی بی بعد شده ساختمان نسبت به حالت مبنا) نسبت به تغییرات ضریب جذب حرارت تابشی نما در ساختمانهای مسکونی حدود ۱/۱۳ و در ساختمانهای اداری حدود ۰/۹۴ می‌باشد.



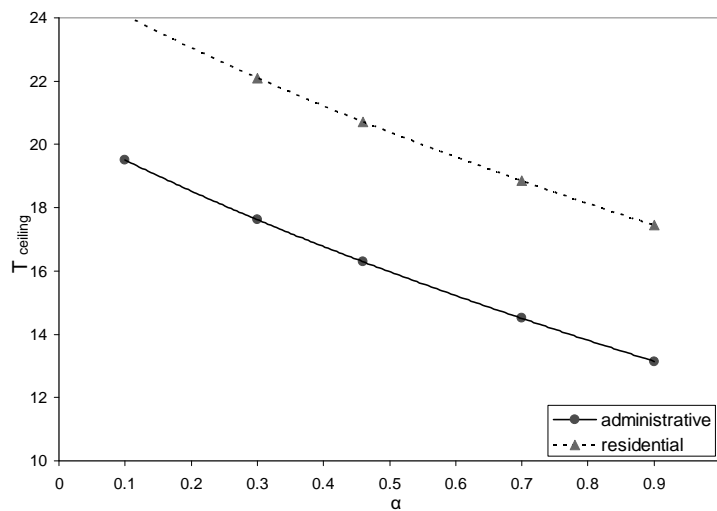
شکل ۶- رابطه میان بار برودتی اتاق و دمای سقف سرد به ازای مقادیر مختلف ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان



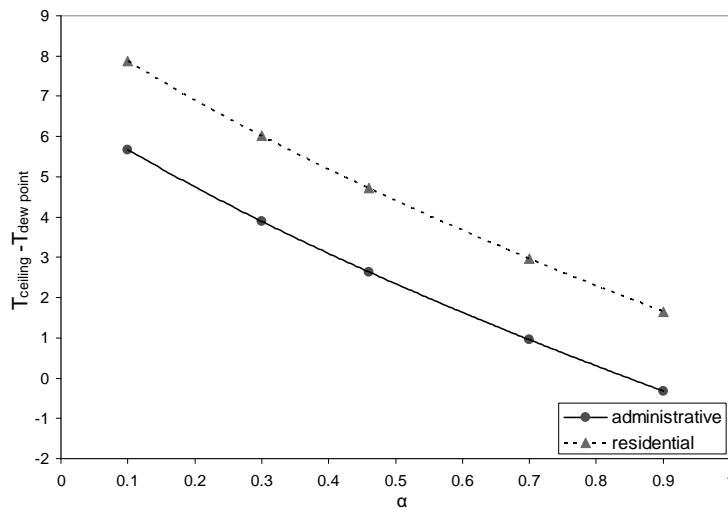
شکل ۷- رابطه میان حداقل بار برودتی لازم برای ایجاد شرایط آسایش اتاق نسبت به حالت مبنا و ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان در فضاهای مسکونی و اداری

در شکل ۸ میزان حداکثر دمای سقف سرد لازم برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در اتاقهای مسکونی و اداری، بر حسب ضریب جذب حرارت تابشی نما نشان داده شده است. همچنین شکل ۹ میزان اختلاف دمای سقف سرد با دمای نقطه شبنم را بر حسب ضریب جذب حرارت تابشی نما در اتاقهای

مسکونی و اداری، نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آنست که شیب تغییرات دمای سقف سرد نسبت به ضریب جذب حرارت تابشی نما برای فضاهای مسکونی حدود  $8/2-$  و برای فضاهای اداری حدود  $7/9-$  می‌باشد. بنابراین با تغییر در نمای ساختمان و ضریب جذب حرارت تابشی آن می‌توان میزان بار پرودتی ساختمان و نیز دمای سقف سرد را بطور چشمگیری کنترل نمود.

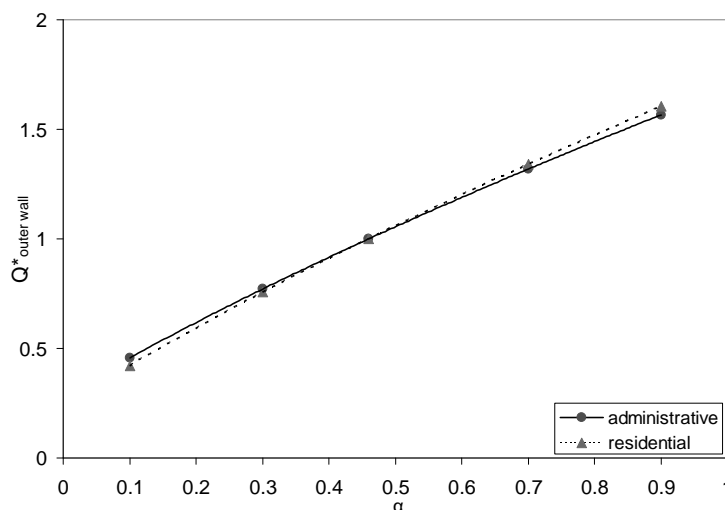


شکل ۸- رابطه میان دمای سقف سرد و ضریب جذب حرارت تابشی مختلف نما در فضاهای مسکونی و اداری



شکل ۹- رابطه میان اختلاف دمای سقف سرد و دمای نقطه شبنم با ضریب جذب حرارت تابشی مختلف نما در فضاهای مسکونی و اداری

همچنین نتایج نشان می‌دهد که شیب تغییرات اختلاف دمای سقف سرد و نقطه شبم نسبت به ضریب جذب حرارت تابشی نما برای فضاهای مسکونی حدود  $-7/7$  و برای فضاهای اداری حدود  $-7/4$  می‌باشد. بنابراین با تغییر در نمای ساختمان می‌توان از امکان ایجاد میعان بخارات آب موجود در هوا بر روی پانل سقف سرد تا حدی جلوگیری نمود. زیرا مطابق شکل ۹ میزان اختلاف دمای سقف سرد با دمای نقطه شبم وابستگی شدیدی به ضریب جذب حرارت تابشی نما ساختمان دارد. همچنین وابستگی نرخ شار حرارتی ناشی از دیوار خارجی بر حسب ضریب جذب حرارت تابشی نما در شکل ۱۰ نشان داده شده است.  $Q_{outer\ wall}^*$  نرخ شار حرارتی بی بعد شده نسبت به حالت مبنا می‌باشد.



شکل ۱۰- رابطه میان نرخ شار حرارتی دیوار خارجی با ضریب جذب حرارت تابشی نما در فضاهای مسکونی و اداری

چگونگی تغییرات نرخ شار حرارتی دیوار خارجی بر حسب ضریب جذب حرارت تابشی نما، وابستگی اندکی به مسکونی و یا اداری بودن ساختمان خواهد داشت.

#### بحث و نتیجه گیری

الف) برای تمام وضعیتهای مفروض، رابطه میان متوسط  $PMV$  حاکم بر اتاق با دمای سقف سرد، در محدوده دماهای معمول برای سقف، تقریباً رابطه‌ای خطی است. هر چند که شیب این خط در فضاهای مسکونی بیشتر از فضاهای اداری می‌باشد.

ب) نتایج حاکی از آنست که تأثیرات نما بر میزان بار برودتی ساختمان برای فضاهای مسکونی بیشتر از فضاهای اداری است. چنانکه شیب تغییرات بار برودتی بی بعد شده ساختمان نسبت به حالت

مبنا بر حسب تغییرات ضریب جذب حرارت تابشی نما در ساختمانهای مسکونی حدود  $1/13$  و در ساختمانهای اداری حدود  $0/94$  می‌باشد.

پ) با انتخاب مناسب نمای ساختمان می‌توان تا حد چشمگیری در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود. همچنین مصالح بکار رفته در نمای ساختمان تأثیر بسزایی بر میزان اوج بار برودتی ساختمان دارد. بطوریکه استفاده از نمای بتنی رنگ شده در ساختمانهای اداری حدود  $38\%$  و در ساختمانهای مسکونی  $46\%$  میزان اوج بار برودتی ساختمان را نسبت به نمای مرمریت سفید یا گرانیث خواهد افزود.

ت) میزان حداکثر دمای سقف سرد لازم برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در اتاقهای مسکونی و اداری وابستگی چشمگیری به ضریب جذب حرارت تابشی نما نشان می‌دهد. نتایج حاکی از این واقعیت است که شیب تغییرات دمای سقف سرد نسبت به ضریب جذب حرارت تابشی نما برای فضاهای مسکونی حدود  $8/2-$  و برای فضاهای اداری حدود  $7/9-$  می‌باشد. بنابراین با تغییر در نمای ساختمان و ضریب جذب حرارت تابشی آن می‌توان میزان بار برودتی ساختمان و نیز دمای سقف سرد را بطور چشمگیری کنترل نمود.

ث) در تحقیقات پیشین تنها از وزش هوا بعنوان عاملی برای کنترل پدیده میعان نام برده شده است. در حالیکه این تحقیق از امکان کنترل پدیده میعان از طریق انتخاب مناسب نمای ساختمان حکایت دارد. زیرا نتایج تحقیق اخیر نشان می‌دهد که میزان اختلاف دمای سقف سرد با دمای نقطه شبنم وابستگی شدیدی به ضریب جذب حرارت تابشی نمای ساختمان دارد. شیب تغییرات دمای سقف سرد نسبت به ضریب جذب حرارت تابشی نما برای فضاهای مسکونی حدود  $7/7-$  و برای فضاهای اداری حدود  $7/4-$  می‌باشد. بنابراین با تغییر در نمای ساختمان می‌توان از امکان ایجاد میعان بخارات آب موجود در هوا بر روی پائل سقف سرد تا حدی جلوگیری نمود.

ج) با افزایش ضریب جذب حرارت تابشی نما، نرخ شار حرارتی ناشی از دیوار خارجی نیز افزایش می‌یابد. بطوریکه استفاده از نمای بتنی رنگ شده حدود  $57\%$  نرخ شار حرارتی دیوار خارجی ساختمان را نسبت به نمای مرمریت سفید یا گرانیث خواهد افزود.

چ) به دلیل میزان بیشتر پوشش افراد در فضای اداری، برقراری شرایط آسایش حرارتی ساکنان این فضاها با محدودیتهای زیادی روبرو است. دمای پانلهای سقفی در این فضا بایستی نسبت به پانلهایی در فضای مسکونی مشابه، حدود  $5$  درجه سانتیگراد سردتر باشد. از طرفی این مسئله ممکن است به پدیده میعان بر روی سقف سرد منجر شود. بنابراین استفاده از سیستم سرمایش تابشی سقفی در فضاهای اداری ممکن است به دلیل تابش نور خورشید، ایجاد پدیده میعان و نداشتن فرصت سازگاری ساکنان، نتیجه مطلوبی در پی نداشته باشد. این امر لزوم دقت در طراحی این سیستمها را در فضاهای اداری مشخص می‌سازد.

- 1- Kitagava, K. et al., "Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments, Energy and Buildings", Vol. 30, pp. 185-193, 1999.
- 2- Jeong, J.W., and Mumma, S.A., "Simplified cooling capacity estimation model for top insulated metal ceiling radiant cooling panels", Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2055-2072, 2004.
- 3- [www.weather.ir](http://www.weather.ir)
- 4- Watson, R.D., and Chapman, K.S., "Handbook of Radiant Heating and Cooling", McGraw-Hill, New York, 2001.
- 5- Incropera, F.P., and De Witt, D.P., "Introduction to Heat Transfer", third Edition, John Wiley and Sons, New York, 1996.
- 6- Seigel, R., and Howell, J.R., "Thermal radiation heat transfer", third Edition, Hemisphere publishing co., 1992.
- 7- 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, pp. 2293-2306, 2003.
- 8- Fanger, P.O., "Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering", McGraw-Hill, New York, 1970.
- 9- ASHRAE, ASHRAE Handbook Systems, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 1996.
- 10- Banhidi, L.J., "Radiant Heating Systems-Design and Applications", Pergamon Press, 1991.
- 11- [www.me.utexas.edu/~howell/tablecon.html](http://www.me.utexas.edu/~howell/tablecon.html)
- 12- Zmrhal, V., Hensen, J., and Drkal, F., "Modelling and simulation of a room with a radiant cooling ceiling", Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.