

نرخ چگالش در سیستم‌های سرمایشی تابشی سقفی در اقلیم‌های ایران و راهکارهای مقابله با آن

پدیده چگالش بخار آب بر روی سطوح سرد پانل‌های سرمایشی تابشی، بکارگیری این سیستم‌ها را در مناطقی با آب و هوای مرطوب محدود می‌کند. در این تحقیق استفاده از سیستم سرمایشی تابشی سقفی در اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران از لحاظ وقوع پدیده چگالش امکان‌سنجی شده است. محاسبه نرخ دقیق چگالش در پنج اقلیم ایران نشان می‌دهد که با بکارگیری یک طراحی حرارتی مطلوب برای ساختمان، این سیستم سرمایشی در سه اقلیم گرم خشک، سرد و بیابانی بدون مشکل چگالش خواهد بود. بکارگیری این سیستم در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب با مشکل جدی از لحاظ چگالش مواجه است. بکارگیری طراحی حرارتی مطلوب توانسته است تا ۳۰ درصد از میزان چگالش را در این دو اقلیم بکاهد.

سید امیررضا حسینی^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

مهدی معرفت^۲

دانشیار

سید علیرضا ذوالفقاری^۳

استادیار

واژه‌های راهنما: سرمایش تابشی سقفی، اقلیم‌های ایران، چگالش، هوای مرطوب

۱- مقدمه

سیستم‌های سرمایشی تابشی به دلیل مصرف انرژی کم، امروزه به طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. به طوریکه برای محیط‌هایی با بار متوسط حرارتی در حدود 40 W/m^2 بسیار مناسب می‌باشند [۲]. این سیستم‌ها از پانل‌هایی با سطوح فلزی تشکیل شده‌اند که بر روی سقف نصب می‌شوند. درون پانل‌ها لوله‌های آب سرد قرار دارد. این پانل‌ها با ایجاد سطوح وسیع و با اختلاف دمای اندک با محیط به جذب بارهای حرارتی از طریق تشعشع و انتقال آن به خارج از محیط می‌پردازند. در این سیستم‌ها به دلیل تبادل حرارت مستقیم تابشی بین سر افراد و پانل‌ها، رسیدن به شرایط آسایش حرارتی در دمای بالاتری از هوای اتاق اتفاق می‌افتد که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی به میزان ۱۲/۵٪ نسبت به سیستم‌های سرمایشی جابجایی^۴ شده است [۳]. همچنین تحقیقات نشان داده است که نارضایتی حرارتی موضعی در این سیستم‌ها

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران hosseini.mechanic@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران maerefat@modares.ac.ir

^۳ استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند alireza.zolfaghari@yahoo.com

^۴VAV System

بسیار کم می‌باشد، به طوری که در محیط‌هایی با سیستم سرمایش تابشی سقفی، گرادیان عمودی دمای هوای اتاق در محدوده مجاز آسایش حرارتی قرار دارد [۴]. ضمن اینکه در این سیستم‌ها، سرعت جریان هوا داخل اتاق در حدود ۰/۲ متر بر ثانیه است که این سرعت در مناطق سکون به کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه می‌رسد [۴]. به همین دلیل تا کنون در هیچ یک از تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد این سیستم‌ها، به پدیده کوران به عنوان یکی از عوامل نارضایتی حرارتی موضعی اشاره نشده است [۵]. تابش نامتقارن از دیگر عوامل نارضایتی حرارتی موضعی است که به دلیل اختلاف دمای ناچیز میان سطوح پانل و سایر سطوح اتاق به وجود می‌آید. بدلیل وجود سطوح تابشی وسیع در این سیستم‌ها، تابش نامتقارن موجب نارضایتی حرارتی ساکنان نخواهد شد [۱].

برخلاف سیستم‌های سرمایشی جابجایی که دو عمل سرمایش و تهویه هوا را توأم انجام می‌دهند، سیستم سرمایشی تابشی عمل سرمایش و یک سیستم جابجایی هوا عمل تهویه را انجام می‌دهد [۶]. به این ترتیب با فراهم آمدن هوای تازه برای محیط، یک بار حرارتی اضافه ناشی از ورود هوا به محیط تحمیل می‌شود. در مناطق با آب و هوای مرطوب علاوه بر بار حرارتی محسوس^۱ که ناشی از حضور افراد و نیز وسایل گرما زا نظیر لامپ، کامپیوتر و غیره است، بار حرارتی نهان^۲ که ناشی از چگالش بخار آب موجود در هوا بر روی سطوح سرد پانل‌ها است نیز به سیستم تحمیل می‌گردد.

بارحرارتی نهان زیاد در سیستم که به دلیل وجود رطوبت نسبتا زیاد در محیط است، موجب می‌شود تا فشار بخار آب در هوا بیشتر از فشار بخار اشباع بر روی سطح پانل سقفی شده و در نتیجه منجر به چگالش بخار آب بر روی سطح پانل شود [۷]. تداوم چگالش بر روی سطح، باعث افزایش میزان آب بر روی سطح شده به طوری که با به هم پیوستن قطرات ریز و تشکیل قطرات درشت‌تر، موجب ریزش قطرات به سمت پایین و در اصطلاح موجب بارش داخلی^۳ می‌شود که شرایط سکونت را برهم می‌زند [۲]. لذا استفاده از راهکارهایی برای تحت کنترل در آوردن شرایط چگالش در سیستم سرمایشی تابشی سقفی ضرورت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق سعی شده است تا با تکیه بر مکانیزم وقوع چگالش و با تحت کنترل در آوردن پارامترهای موثر بر آن، میزان چگالش را در تمامی اقلیم‌های ایران کمینه کرد، به طوری که در کاربرد این سیستم سرمایشی در اقلیم‌های متفاوت ایران هیچ منعی از لحاظ وقوع پدیده چگالش در آنها وجود نداشته باشد.

۲- پیشینه تحقیق

در تحقیقی از آنتونوپولس و همکاران (۱۹۹۸) میزان چگالش در یک سیستم سرمایشی تابشی در یک روز از ماه ژوئن مورد بررسی قرار گرفته و ضخامت فیلم مایع تخمین زده شده است. همچنین برای جمع آوری مایع روی سطح پیشنهاد داده شده است که پانل‌ها به صورت شیب‌دار بر روی سقف قرار داده شوند و یا بر روی دیوار در ارتفاعی که سر افراد قرار دارد نصب شوند [۳]. موما و کونروی (۲۰۰۱) برای دوری از شرایط چگالش بر روی سطح، از یک سیستم کنترلی DOAS^۴ برای کنترل دمای شب‌نم محیط استفاده کردند به

^۱ Sensible Load

^۲ Latent Load

^۳ Office Rain

^۴ Dedicated Outdoor Air System

طوری که با قطع و وصل کردن آب سرد ورودی به پانل‌ها توسط این سیستم کنترلی، همواره دمای پانل بالاتر از دمای شب‌نم هوای محیط قرار می‌گیرد [۸]. در این صورت بارهای نهان و محسوس در سیستم از هم جدا می‌شوند و در نهایت چگالش رخ نمی‌دهد. نووسلاک و سربریک (۲۰۰۲) اختلاف دمای یک درجه سانتیگراد را میان دمای سطح پانل و دمای شب‌نم هوا برای جلوگیری از چگالش در یک سیستم ترکیبی از سرمایش تابشی به همراه تهویه جابجایی، مناسب می‌دانند [۱]. ژانگ و نیو (۲۰۰۳) مشکل اساسی در بکارگیری سیستم سرمایشی تابشی را در مناطق گرم و مرطوب، چگالش بر روی سطح پانل‌ها می‌دانند. آنها با اضافه کردن یک سیستم رطوبت‌زدا به همراه تهویه جابجایی به سیستم سرمایشی تابشی به این نتیجه رسیدند که رطوبت زدایی یک ساعت قبل از شروع بکار سیستم سرمایشی تابشی باعث جلوگیری از چگالش در ساختمان‌هایی با نفوذ هوای کم (ACH کمتر از ۰/۰۵) می‌شود [۶]. این روش برای شروع به کار مجدد سیستم سرمایشی خصوصا در روزهای بعد از تعطیلات آخر هفته حیاتی است. یین و همکاران (۲۰۰۹) با ارائه یک سیستم رطوبت‌زدا و با تحت کنترل در آوردن رطوبت داخل توانسته‌اند که از وقوع چگالش جلوگیری کنند [۹].

درست است که با استفاده از سیستم‌های رطوبت‌زدا و تحت کنترل در آوردن رطوبت داخل از ریسک وقوع چگالش کاسته می‌شود، ولی باید به این موضوع توجه داشت که سیستم‌های رطوبت‌زدا نیاز به یک منبع آب سرد برای رطوبت زدایی دارند که خود موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود [۲]. در ضمن رطوبت زدایی محیط به طوری که از چگالش جلوگیری شود معمولا سطح رطوبت داخل را به حدی پایین می‌آورد که برای تنفس راحت انسان مناسب نیست.

به این ترتیب در این تحقیق استفاده از سیستم سرمایشی تابشی سقفی به همراه یک سیستم تهویه جابجایی و بدون رطوبت‌زدایی مورد توجه است، به طوری که در شرایط بحرانی و در معرض وقوع پدیده چگالش قرار بگیرد. آنچه که تعیین نرخ چگالش بخار آب بر روی پانل‌های سرد سقفی را حائز اهمیت می‌کند تشکیل قطرات آب حاصل از چگالش بر روی سقف و جمع شدن آنها و در نهایت چکیدن آنها است. این موضوع در مناطقی از ایران با آب و هوای شرجی و مرطوب، شدیدتر بوده و به طور کل می‌تواند استفاده از چنین سیستم‌های سرمایشی را محدود کند. برای هر چه بیشتر کاربردی کردن این سیستم سرمایشی می‌بایست با در نظر گرفتن میزان چگالش در طراحی و محاسبه یک حد مجاز برای آن، تا مقدار زیادی تشکیل قطرات و چکیدن آنها را به تاخیر انداخت. به همین دلیل محاسبه نرخ چگالش در محیط‌هایی که مجهز به سیستم سرمایشی تابشی است ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق بررسی اقلیمی و امکان‌سنجی بکارگیری سیستم‌های سرمایشی تابشی سقفی از لحاظ وقوع پدیده چگالش در اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران است، به طوری که با ارائه راهکارهای طراحی حرارتی ساختمان برای هر یک از اقلیم‌ها بتوان بدون استفاده از تجهیزات رطوبت‌زدا میزان چگالش را در این سیستم به کمترین حد ممکن رساند. به این ترتیب، با کنترل چگالش در این سیستم سرمایشی می‌توان امیدوار بود که این سیستم که از لحاظ مصرف انرژی نیز بسیار مقرون به صرفه است، بتواند به تدریج جای خود را در ایران باز کند.

۳- مدل‌سازی چگالش

بطور کل چگالش بدلیل وقوع پدیده انتقال جرم به صورت نفوذ^۱ در گازها رخ می‌دهد به طوری که بیشتر شدن فشار بخار آب در هوا از فشار بخار اشباع بر روی سطح پانل سقفی، منجر به چگالش بخار آب بر روی سطح پانل می‌گردد. از آنجایی که چگالش بر روی پانل اتفاق می‌افتد، لذا مدل‌سازی چگالش بر روی سطح پانل انجام می‌شود.

در تحقیقی از همین گروه نویسندگان، یک رابطه کاربردی جدید جهت محاسبه میزان نرخ چگالش بر روی یک پانل سرمایشی سقفی ارائه شده است [۱۰]. این رابطه که در رابطه شماره (۱) به آن اشاره شده است، نرخ چگالش بر روی سطح پانل سرمایشی را بر حسب میلی‌گرم بر ثانیه به ازای هر متر مربع از سطح پانل، بدون در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و تنها با در دست داشتن اطلاعات پایه از شرایط محیطی که پانل در آن نصب شده است، محاسبه می‌کند.

$$m''_{Cond} = 0.364 \cdot U_{air}^{0.5} \cdot T_{panel}^{0.5} \cdot (T_{dp} - T_{panel}) \quad (1)$$

همانطور که از ظاهر رابطه فوق مشخص است، عواملی همچون سرعت جریان هوای گذرنده از روی سطح پانل، دمای سطح پانل و اختلاف این دما با دمای شبنم هوای محیط داخل از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار بر نرخ چگالش هستند و با در اختیار داشتن اطلاعات هر یک از این عوامل، محاسبه نرخ چگالش در اقلیم‌های متفاوت امکان‌پذیر خواهد بود. نکته قابل توجه این است که برای به وجود آمدن چگالش، سطح پانل می‌بایست در شرایط دما و رطوبت اشباع قرار بگیرد و طبق رابطه (۱) این حالت در صورتی که دمای سطح پانل برابر و یا کمتر از دمای شبنم هوای اطراف آن باشد، اتفاق می‌افتد. مبنای رابطه (۱) با در نظر گرفتن یک حجم کنترل متصل به سطح پانل و با نوشتن روابط بالانس جرمی برای هوا و همچنین برای بخار آب درون حجم کنترل بصورت زیر می‌باشد [۱۱]:

$$m''_{cond} = (-\rho D_{12} \frac{\partial C_1}{\partial y}) + C_1 (m''_{tot}) \quad (2)$$

$$m''_{nc} = (-\rho D_{12} \frac{\partial C_2}{\partial y}) + C_2 (m''_{tot}) \quad (3)$$

با ترکیب روابط فوق الذکر، به رابطه‌ای خواهیم رسید که این رابطه میزان چگالش را با در دست داشتن گرادیان غلظت بخار آب موجود بر روی سطح پانل سقفی محاسبه می‌کند، لذا برای محاسبه چگالش نیاز به محاسبه گرادیان غلظت بخار آب بر روی سطح پانل می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر ناگزیر به حل عددی معادلات ناویر-استوکس به همراه معادلات غلظت بخار آب و انرژی در جریان هوای مرطوب اطراف پانل است. به این ترتیب با حل مکرر معادلات و محاسبه چگالش به ازای شرایط متفاوت دما و رطوبت و انجام رگرسیون خطی بین تمامی نتایج چگالش حاصل شده از هر یک از مراحل حل، رابطه (۱) برای محاسبه میزان نرخ چگالش بر حسب عوامل موثر بر آن بدست آمده است. طبق اعتبارسنجی‌های انجام شده با مرجع [۱۲]، رابطه (۱) میزان چگالش در این سیستم‌ها را با دقت بیش از ۹۰ درصد محاسبه می‌کند [۱۰].

¹Diffusion

۴- روش حل و معادلات حاکم

برای بررسی عملکرد سیستم‌های سرمایشی تابشی سقفی از لحاظ وقوع پدیده چگالش در اقلیم‌های متفاوت ایران نیاز به مدلسازی این سیستم‌ها در شرایط آب و هوایی خاص هر اقلیم است. طبق رابطه (۱)، شرایط دمایی محیط و سطح پانل از جمله عوامل تعیین کننده چگالش است، لذا مدلسازی این سیستم‌ها باید مبتنی بر انرژی مبادله شده بین سطح پانل، هوای اتاق، دیوارها، اشیاء و افراد باشد، به طوری که تاثیرات نفوذ هوا، تابش خورشید و زاویه قرارگیری ساختمان نسبت به خورشید در جغرافیای متفاوت و همچنین آب و هوای مربوط به هر اقلیم قابل بررسی باشد. برای مدلسازی با شرایط فوق، می‌بایست از بالانس حرارتی بین سطوح مختلف به همراه معادلات تشعشع استفاده نمود. برای این کار از نرم‌افزار EnergyPlus استفاده شده است. این نرم‌افزار با استفاده از روش ناحیه‌ای^۱ و با حل همزمان معادلات بالانس انرژی برای دیوارها و سطوح مختلف ایجاد شده در مدل و با در دست داشتن اطلاعات آب و هوایی ساعتی از اقلیمی که ساختمان در آن واقع شده است، از لحاظ حرارتی مدل را مورد تحلیل قرار می‌دهد. با این تحلیل کلیه مجهولات شامل دمای سطوح و دمای هوای داخل محیط در تمامی ساعات شبانه روز بدست می‌آیند. رابطه (۴)، معادله بالانس حرارتی مورد استفاده در نرم‌افزار را برای سطوح داخلی یک دیوار بیان می‌کند [۱۳].

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{Ki} + q''_{Sol} + q''_{Conv} = 0 \quad (4)$$

هر یک از ترم‌های رابطه (۴) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

q''_{LWX} : شار تابشی ناشی از تبادل تشعشعی در طول موج‌های بلند

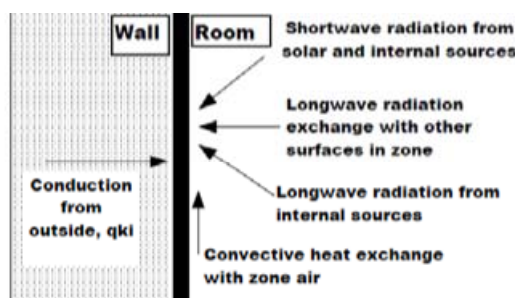
q''_{SW} : شار تابشی ناشی از تبادل تشعشعی در طول موج‌های کوتاه

q''_{Ki} : شار هدایتی از جدارهای دیوار

q''_{Sol} : شار تشعشعی خورشید

q''_{Conv} : شار همرفت به هوای داخل

نور عبوری خورشید از سطوح شفاف مانند شیشه‌ها به داخل اتاق و یا روشنایی‌های موجود در داخل اتاق جزئی از شار تابشی در طول موج‌های کوتاه می‌باشد. از تبادل تشعشعی در طول موج‌های بلند می‌توان به جذب شارهای تشعشعی توسط سیستم سرمایشی تابشی اشاره کرد. شکل (۱) نمودار شماتیک هر یک از شارهای حرارتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار شماتیک از شارهای حرارتی در دیوار [۱۳]

¹ Zonal Method

در این مدل‌سازی معیار تحلیل، رسیدن به شرایط آسایش حرارتی در اقلیم‌های متفاوت است. به این معنی که اتاق نمونه مورد نظر با حضور یک فرد در آن مدل شده و نرخ چگالش در شرایط ایده‌آل آسایش حرارتی محاسبه خواهد شد. با توجه به تغییرات ساعت به ساعت دما و رطوبت نسبی هوای خارج و همچنین شدت و زاویه تابش خورشید، با تعیین دمای تنظیم^۱ در محدوده دمای ۲۴ تا ۲۶ درجه سانتیگراد برای دمای هوای اتاق، دبی آب سرد ورودی به پانل‌ها بگونه‌ای تغییر می‌کند تا دمای موثر هوای داخل در محدوده معین قرار گرفته و در نهایت آسایش حرارتی برای محیط داخل فراهم گردد. در این حالت است که نرخ چگالش محاسبه خواهد شد.

مدل آسایش حرارتی فنگر^۲ در این تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل، از یک شاخص برای ارزیابی احساس حرارتی با عنوان PMV^۳ استفاده می‌شود که می‌تواند مقداری بین -۳ تا +۳ داشته باشد. هر یک از این اعداد صحیح بین -۳ تا +۳، طبق جدول (۱) وضعیتی از احساس حرارتی افراد را بیان می‌کند. طبق استاندارد ISO-۷۷۳۰ بهترین شرایط آسایش حرارتی در محدوده $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ قرار دارد و در این تحلیل نیز از همین محدوده به عنوان محدوده آسایش حرارتی مطلوب استفاده شده است. در این محدوده درصد ناراضیاتی افراد از شرایط حرارتی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد [۱۴].

جدول ۱- شاخص آسایش حرارتی PMV

خیلی سرد	سرد	خنک	خنثی	کمی گرم	گرم	خیلی گرم
-۳	-۲	-۱	۰	+۱	+۲	+۳

۵- مدل اتاق نمونه

همانطور که گفته شد، هدف محاسبه نرخ چگالش در یک اتاق مجهز به سیستم سرمایشی تابشی سقفی به همراه تهویه جابجایی است. این اتاق بر اساس استاندارد ASHRAE-۱۴۰، یک اتاق سه بعدی با ابعاد ۸×۶ متر و به ارتفاع ۲/۷ متر است که یک پنجره با ابعاد ۲×۳ متر بر روی دیوار ضلع جنوبی و یک در با ابعاد ۲×۱/۲ متر بر دیوار ضلع شمالی آن قرار دارد. دیوار جنوبی به عنوان دیوار خارجی است که در ارتباط با هوای خارج بوده و در معرض تابش خورشید قرار دارد. سایر سطوح به جز سقف، دیوار داخلی هستند به این معنی که در تماس با بخشهای تهویه شده ساختمان قرار دارند. بر روی سقف، پانل سرمایشی تابشی با ابعاد ۷×۴ متر نصب شده است، به طوری که حدود ۶۰٪ از سطح سقف را پوشش می‌دهد. تهویه جابجایی شامل دریچه‌ای برای تهویه هوای تازه^۴ برای اتاق و دریچه‌ای برای خروج هوا^۵ است که این دریچه‌ها بر روی دیوارهای جانبی قرار دارند. نرخ تعویض هوای داخل طبق استاندارد ASHRAE به میزان یک بار در هر ساعت است که علاوه بر فراهم آوردن هوای تازه برای ساکنان موجب خروج آلاینده‌های ناشی از تنفس نیز می‌شود [۱۴]. مدل اتاق نمونه حاضر مطابق با طراحی حرارتی رایج در اکثر ساختمان‌های ایران مدل شده

^۱ Set Point

^۲ P.O.Fanger

^۳ Predicted Mean Vote

^۴ Supply Air

^۵ Exhaust Air

است. در طراحی حرارتی رایج، پنجره شامل شیشه تک جداره شفاف است که از سمت داخل با یک پرده نازک با خواص عبور نور زیاد و باز تابش کم پوشانده شده است. دیوارها هم شامل سه جداره خارجی، میانی و داخلی هستند که نوع مصالح، ضخامت و خواص حرارتی هر یک از لایه‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- جنس، ابعاد و ضریب هدایت گرمایی هر یک از لایه‌های دیوارها و پنجره

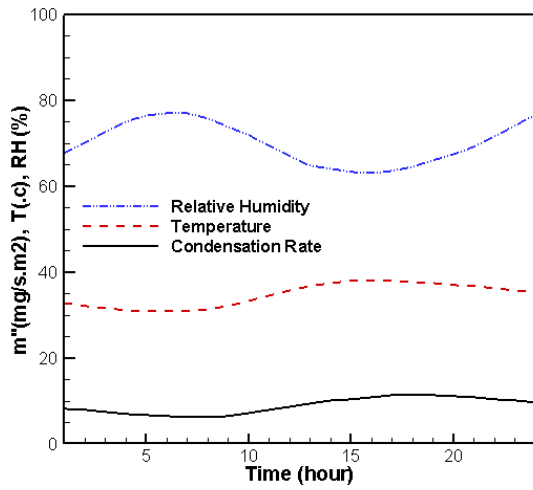
ضریب هدایت گرمایی ($\frac{W}{m \cdot K}$)	ضخامت (متر)	نوع مصالح	لایه‌ها	
۳/۱۷	۰/۰۳	سنگ نما	لایه خارجی	دیوار
۰/۶۵	۰/۰۴	ملات شن و سیمان	لایه‌های میانی	
۰/۸۹۵	۰/۱	آجر کوره‌ای		
۰/۲۲	۰/۰۲	گچ و خاک		
۰/۱۶	۰/۰۱	گچ	لایه داخلی	
۱/۰۶	۰/۰۰۳	شیشه شفاف	تک جداره	پنجره

۶- نتایج بررسی شدت چگالش در اقلیم‌های آب و هوایی متفاوت ایران

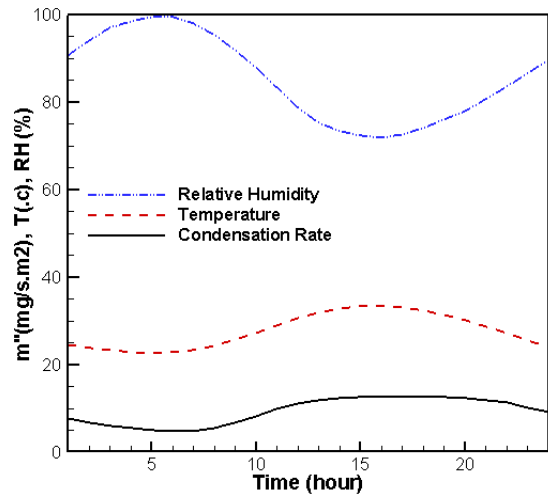
از آنجا که در هر اقلیم خاص، شرایط دما و رطوبت هوا متفاوت از سایر اقلیم‌ها است و با توجه به متفاوت بودن بارهای حرارتی ناشی از آن در فضای داخل، شرایط عملکرد پانل‌های سرمایشی سقفی متفاوت بوده و در نتیجه شدت چگالش در اقلیم‌های متفاوت یکسان نخواهد بود. لذا جهت امکان‌سنجی استفاده از این سیستم سرمایشی در ایران با رویکرد میزان چگالش بر روی پانلهای سرمایشی نیاز است تا این سیستم در اقلیم‌های آب و هوایی مختلف ایران مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور ایران به پنج اقلیم آب و هوایی متفاوت دسته بندی شده است. در جدول (۳) به این پنج اقلیم آب و هوایی و یک شهر به عنوان نماینده‌ای از هر یک از اقلیم‌ها اشاره شده است و در ادامه نیز داده‌های آب و هوایی این شهرها در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳- اقلیم‌های آب و هوایی ایران

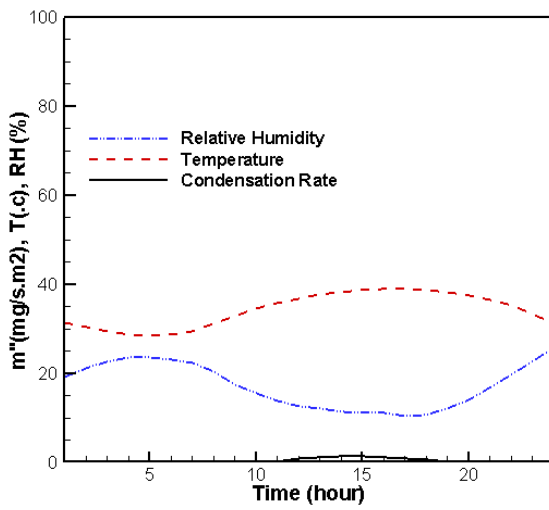
شماره اقلیم	نام اقلیم	شهر	متوسط بیشینه دما در فصول گرم سال (درجه سانتیگراد)	متوسط بیشینه رطوبت نسبی در فصول گرم سال (درصد)
اقلیم ۱	بیابانی و نیمه بیابانی	تهران	۳۵/۵	۳۷/۵
اقلیم ۲	معتدل مرطوب	رشت	۳۰/۰	۹۶/۶
اقلیم ۳	گرم مرطوب	بندر عباس	۳۷/۸	۸۱/۳
اقلیم ۴	گرم خشک	اصفهان	۳۶/۲	۳۰/۲
اقلیم ۵	سرد	تبریز	۳۲/۸	۵۳/۰



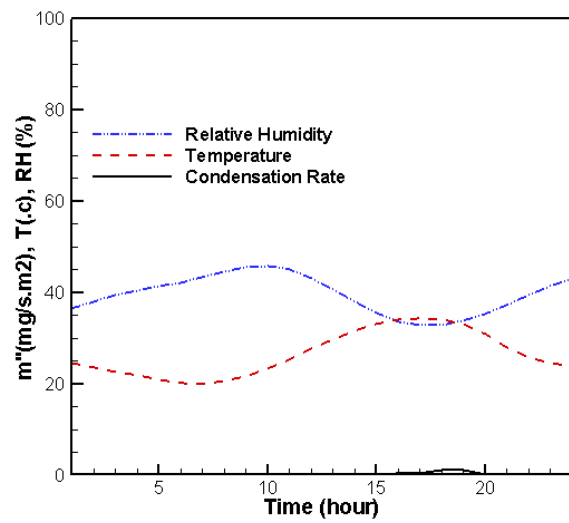
(ب)



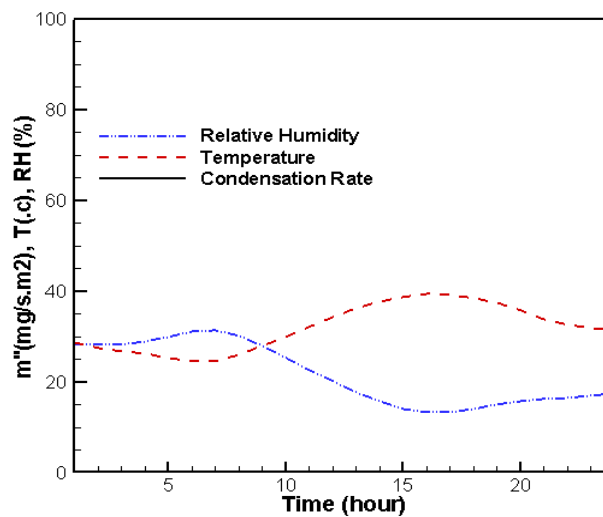
(الف)



(د)



(ج)



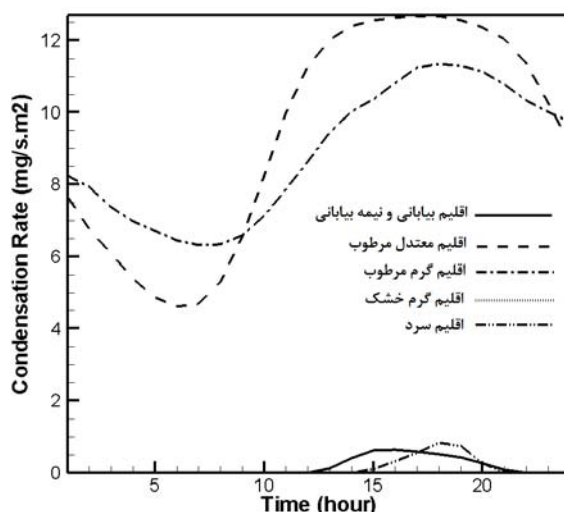
(ه)

شکل ۲- نمودار نرخ چگالش در پانل‌های سرمایشی تابشی، دمای هوا و رطوبت نسبی در روز ۱۵ مرداد برای اقلیم‌های ایران، الف) اقلیم معتدل مرطوب، ب) اقلیم گرم مرطوب، ج) اقلیم سرد، د) اقلیم بیابانی و نیمه بیابانی، ه) اقلیم گرم خشک

پس از تحلیل حرارتی اتاق نمونه و بدست آمدن شرایط دمایی هوای اتاق، توزیع رطوبت نسبی داخل اتاق و دمای سطح پانل، میزان چگالش در تمامی اقلیم‌ها و برای تمام روزهای گرم سال که از سیستم سرمایشی تابشی استفاده می‌شود، توسط رابطه ارائه شده در بخش مدلسازی چگالش محاسبه شده است.

برای ارزیابی این سیستم سرمایشی، روز ۱۵ مرداد به عنوان بحرانی‌ترین روز سال از لحاظ گرمای هوا و شدت چگالش، مد نظر قرار گرفته است. بدین ترتیب نتایج چگالش در اقلیم‌های پنج گانه ایران برای این روز در نمودارهای شکل (۲) الف) تا ه) ارائه شده است. در این نمودارها میزان تغییرات دمای هوا و رطوبت نسبی هوای خارج از محیط به همراه نرخ چگالش بدست آمده، در طول ۲۴ ساعت شبانه روز ارائه شده است. در این تحلیل دمای سطح پانل در زمان‌های مختلف در محدوده بین ۱۳ تا ۲۲ درجه سانتیگراد متغیر است. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات نرخ چگالش با افزایش دمای هوا افزایش و با کاهش دمای هوا، کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در ساعات ابتدایی روز که بار حرارتی اتاق کمتر است پانل‌ها با داشتن دمایی بالاتر از حد معمول، توان فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی را دارند. در این حالت و با توجه به رابطه (۱) اختلاف دمای سطح پانل و دمای شب‌نم هوا کمتر بوده و نرخ چگالش کمتری گزارش شده است. به همین ترتیب در ساعات ظهر و بعدازظهر که میزان شدت تابش خورشید زیاد بوده و بار حرارتی اتاق زیاد است، پانل‌ها برای فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی، در دمایی پایین‌تر کار می‌کنند. در نتیجه در این حالت نرخ چگالش بیشینه مقدار است.

مقایسه بین نرخ چگالش در پنج اقلیم متفاوت آب و هوایی ایران در شکل (۳) نشان می‌دهد که میزان چگالش بر روی پانل‌ها در اقلیم گرم خشک صفر است و این به دلیل وجود رطوبت نسبی بسیار پایین در این اقلیم است. لذا استفاده از سیستم‌های سرمایشی تابشی سقفی در اقلیم گرم خشک حتی در ساختمان‌هایی با طراحی حرارتی رایج بدون مشکل چگالش بوده و این اقلیم بهترین گزینه برای استفاده از سیستم سرمایشی تابشی در آن است.



شکل ۳- مقایسه نرخ چگالش ۲۴ ساعته در ۵ اقلیم ایران

بعد از این اقلیم کمترین میزان چگالش متعلق به اقلیم سرد و اقلیم بیابانی و نیمه بیابانی است، به طوری که چگالش در این دو اقلیم تنها در ساعات ظهر و بعدازظهر بوقوع می‌پیوندد. با فرض اینکه در این دو

اقلیم چگالش با حداکثر مقدار خود در یک شبانه روز بطور پیوسته ادامه داشته باشد، ضخامت فیلم مایع ایجاد شده بر روی سطح پانل پس از یک شبانه روز تنها $0/086$ میلیمتر خواهد بود که کمی کمتر از ضخامت یک تار موی انسان است. به این ترتیب چگالش در طول یک شبانه روز در دو اقلیم بیابانی و سرد بقدری اندک است که تبدیل به چکه نمی‌شود. لذا بکارگیری سیستم سرمایشی تابشی در اقلیم سرد و اقلیم بیابانی و نیمه بیابانی نیز بلامانع خواهد بود.

بیشترین میزان چگالش متعلق به دو اقلیم معتدل مرطوب و گرم مرطوب است. از آنجایی که این دو اقلیم ساحلی هستند، در اکثر روزهای گرم سال دارای بیشترین سطح رطوبت نسبی می‌باشند. هوا با میزان رطوبت نسبی بالاتر دارای دمای شبانه بالاتری است، در نتیجه پانل‌ها با دمای کارکرد حتی بالاتر از حد معمول برای سرمایش نیز دارای دمایی بسیار پایین‌تر از دمای شبانه هوا هستند و میزان چگالش زیادی را رقم می‌زنند. این میزان چگالش بقدری زیاد است که بطور متوسط در هر ساعت حدود یک لیتر آب توسط کل سطح پانل چگالیده می‌شود. پس از گذشت زمان، این مقدار مایع بطور حتم به چکه تبدیل می‌شود. بدین ترتیب سیستم سرمایش تابشی سقفی برای ساختمان‌هایی با طراحی حرارتی رایج، در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب دارای مشکل اساسی از لحاظ وقوع پدیده چگالش بر روی سطح پانل‌ها می‌باشند. در نتیجه برای استفاده از این نوع سیستم سرمایشی در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب لازم است از راهکارهایی استفاده شود تا میزان چگالش در این دو اقلیم را کمینه کند، به طوری که اندک میزان چگالش باقی مانده به چکه تبدیل نشود. به نظر می‌رسد راهکارهایی که بتواند چگالش را در دو اقلیم بحرانی گرم مرطوب و معتدل مرطوب کاهش دهد می‌تواند چگالش در اقلیم‌های بیابانی و سرد که میزان چگالش در آنها زیاد نمی‌باشد را به صفر برساند.

۷- راهکارهای کاهش میزان چگالش

آنچه بر اهمیت محاسبه نرخ دقیق چگالش بر روی یک پانل سرمایشی تابشی سقفی می‌افزاید، بکارگیری راهکارهایی است که بتواند نرخ چگالش را در اقلیم‌های متفاوت به حداقل رسانده به طوری که در صورت تشکیل فیلم مایع بر روی سطح پانل سرمایشی تابشی، مقدار مایع چگالیده شده تبدیل به چکه نشود. در زیر به برخی از راهکارهای متداول جهت کاهش میزان چگالش اشاره شده است:

- رطوبت‌زدایی هوا قبل از ورود به اتاق
- کاهش بار حرارتی ساختمان با استفاده از طراحی حرارتی مطلوب
- استفاده از سیستم سرمایشی سقفی به صورت غیر فعال^۱
- استفاده از سطوحی در ساخت پانل‌ها که تا حد امکان چگالش را به صورت فیلم نگه داشته و از تبدیل آن به قطره و ایجاد چکه جلوگیری کند.

^۱ Passive

در میان راهکارهای فوق، استفاده از سیستم‌های رطوبت زدا جهت کاهش سطح رطوبت نسبی هوای داخل اتاق مرسوم است. از آنجایی که سیستم‌های رطوبت زدا خود نیاز به یک منبع آب سرد با دمای پایین جهت رطوبت زدایی دارند، معمولاً مصرف انرژی کل سیستم را بالا می‌برند.

یکی دیگر از راهکارهای کاهش چگالش که مستقیماً در کم کردن مصرف انرژی نیز نقش دارد، کم کردن بار حرارتی اتاق تا حد ممکن است. با کم شدن بار حرارتی اتاق، پانل‌ها با دمایی بالاتر توان فراهم آوردن شرایط مطلوب آسایش حرارتی را خواهند داشت. بدین ترتیب با بالاتر رفتن دمای سطح پانل و کاهش اختلاف دمای آن با دمای شب‌نم محیط، میزان چگالش بطور چشمگیری کاهش خواهد داشت. طراحی حرارتی مطلوب ساختمان یکی از روش‌هایی است که موجب کاهش بار حرارتی و در نتیجه کاهش میزان چگالش خواهد شد.

در این تحقیق از میان راهکارهای موجود به بررسی تاثیر طراحی حرارتی ساختمان بر کاهش میزان نرخ چگالش در سیستم‌های سرمایشی سقفی پرداخته شده است. راهکارهایی همچون استفاده غیر فعال از سیستم سرمایش تابشی سقفی و یا استفاده از سطوحی برای جلوگیری هر چه بیشتر از تشکیل قطره می‌تواند به عنوان راهکارهای مکمل برای دو راهکار اول باشد.

۸- طراحی حرارتی مطلوب

در تحلیل‌های حرارتی که تا به اینجا ارائه شد، ساختمان با طراحی حرارتی رایج در کشور مورد بررسی قرار گرفت. یک ساختمان با طراحی حرارتی مطلوب، ساختمانی است که در هنگام طراحی به تمامی بخش‌های مرتبط با انرژی توجه شده باشد. در چنین ساختمانی نوع مصالح بکار رفته در ساخت اجزای ساختمان از لحاظ جنس، ضخامت، رسانش و ظرفیت حرارتی مورد توجه ویژه‌ای قرار دارد تا کمترین اتلاف حرارتی را بوجود آورد. جدول (۴) تاثیر پارامترهای مختلف در طراحی حرارتی مطلوب را در مقایسه با نمونه مشابه همان پارامترها در طراحی حرارتی رایج، بر کاهش میزان چگالش در دو اقلیم بحرانی گرم مرطوب و معتدل مرطوب نشان می‌دهد.

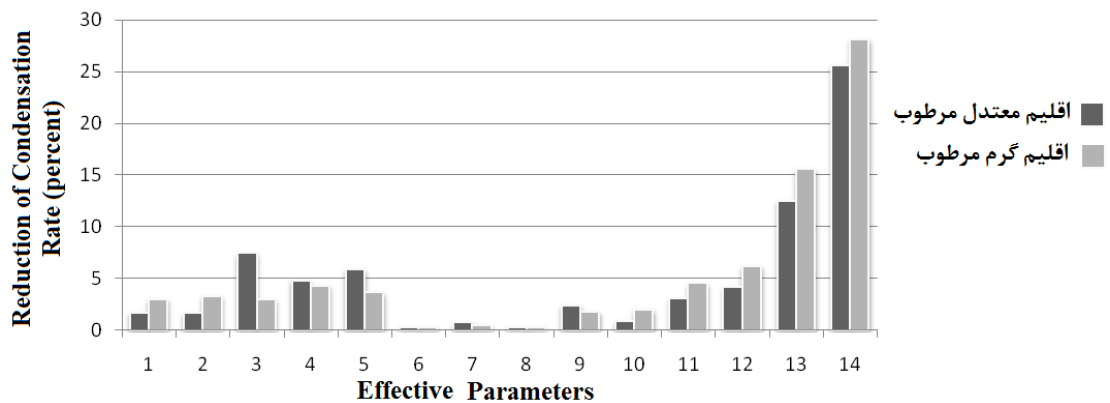
جدول ۴- پارامترهای موثر در طراحی حرارتی و درصد کاهش میزان چگالش به ازای هر یک از آنها

ردیف	طراحی حرارتی مطلوب	طراحی حرارتی رایج	اقلیم معتدل و مرطوب	اقلیم گرم و مرطوب
۱	شیشه دو جداره با لایه میانی هوا	شیشه تک جداره	٪۱	٪۳
۲	شیشه دو جداره با لایه آرگون	شیشه تک جداره	٪۲	٪۴
۳	پرده ضخیم داخلی	پرده نازک	٪۸	٪۳
۴	سایه‌بان خارجی برای پنجره	بدون سایه‌بان	٪۵	٪۵
۵	شیشه بازتابی ۶ میلیمتری	شیشه شفاف ۳ میلیمتری	٪۶	٪۴
۶	نمای آجر ۳ سانتیمتری	نمای سنگ	٪۰	٪۰
۷	نمای فلزی	نمای سنگ	٪۱	٪۱
۸	نمای سنگ گرانیتی	نمای سنگ	٪۰	٪۰

۹	آجر سفالی	آجر کوره‌ای	۲٪	۲٪
۱۰	دیوار بتنی	آجر کوره‌ای	۱٪	۲٪
۱۱	عایق دیواری ۲۵ میلیمتری	بدون عایق	۳٪	۵٪
۱۲	عایق دیواری ۷۵ میلیمتری	بدون عایق	۴٪	۶٪
۱۳	۲۵٪ کاهش تعویض هوا (ACH)	ACH=1	۱۳٪	۱۶٪
۱۴	ساختمان با طراحی حرارتی مطلوب: استفاده همزمان از موارد ۱۳،۱۲،۹،۵،۴،۲	ساختمان با طراحی حرارتی رایج	۲۶٪	۲۸٪

این میزان کاهش چگالش بر حسب درصد در نمودار ستونی شکل (۴) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که تنها یکی از پارامترهای طراحی حرارتی مطلوب چند درصد از میزان چگالش را نسبت به ساختمان با طراحی حرارتی رایج در دو اقلیم بحرانی مذکور خواهد کاست.

بیشترین تاثیر بر کاهش نرخ چگالش متعلق به کاهش نرخ تعویض هواست، چرا که زیاد بودن میزان نرخ تهویه هوا سبب افزایش ورود هوا با دما و رطوبت نسبی زیاد به داخل اتاق می‌شود، که خود یک بار حرارتی نهان و محسوس اضافه را به سیستم تحمیل می‌کند. بیشترین تاثیر پس از پارامتر کاهش نرخ تعویض هوا مربوط به بکارگیری پنجره‌های دو جداره با شیشه بازتابی، استفاده از پرده‌های ضخیم در سمت داخلی پنجره‌ها و استفاده از عایق در دیوارها می‌باشد. در اینجا منظور از پرده ضخیم، پرده با خواص عبوردهی تشعشع کم و بازتابش زیاد است.



شکل ۴- درصد کاهش چگالش در دو اقلیم بحرانی به ازای تغییر در هر یک از پارامترهای جدول (۴)

با توجه به نمودار ستونی شکل (۴)، پارامترهایی همچون بکارگیری شیشه دوجداره با لایه میانی گاز آرگون و با استفاده از شیشه بازتابی ۶ میلیمتری در جدار بیرونی پنجره، استفاده از پرده ضخیم در سمت داخلی پنجره، استفاده از آجر سفالی بجای آجر کوره‌ای، بکارگیری عایق در داخل دیوارها و همچنین کاهش اندکی از میزان نرخ تعویض هوای اتاق در هر ساعت از جمله پارامترهایی هستند که بیشترین تاثیر را بر کاهش نرخ چگالش داشته‌اند. لذا استفاده از تمامی موارد ذکر شده به همراه هم می‌تواند تعریفی برای یک

طراحی حرارتی مطلوب باشد. با توجه به آخرین ستون از نمودار شکل (۴)، چنین طراحی حرارتی توانسته است میزان چگالش را تا ۲۸ درصد در اقلیم گرم مرطوب و تا ۲۶ درصد در اقلیم معتدل مرطوب کاهش دهد. در عین حال که طراحی حرارتی مطلوب، میزان قابل توجهی از نرخ چگالش را کاسته است، باز هم راهکارهای مکمل دیگری همچون استفاده از سیستم رطوبت زدا نیاز است تا سیستم سرمایشی تابشی سقفی در دو اقلیم بحرانی گرم مرطوب و معتدل مرطوب کاربردی گردد.

برآورد کل ساعات سالیانه چگالش، بخش دیگری از این تحلیل بوده است که برای اقلیم‌های ایران مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی حرارتی مطلوب موجب کاهش بیش از ۱۰ درصد در ساعات سالیانه چگالش در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب، و موجب کاهش ۱۰۰ درصد در ساعات سالیانه چگالش در دو اقلیم سرد و بیابانی شده است. همانطور که پیش بینی شده بود، طراحی حرارتی مطلوب میزان چگالش را در دو اقلیم سرد و بیابانی به صفر رسانده است. تحلیل دیگری نیز بر روی جهت قرارگیری دیوار خارجی و پنجره واقع بر آن انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضلع شمالی ساختمان بهترین جهت جغرافیایی برای قرارگیری پنجره بر روی آن است، به طوری که با در نظر گرفتن ضلع شمالی ساختمان به عنوان دیوار خارجی، چگالش به میزان ۳ درصد در اقلیم معتدل مرطوب و ۲ درصد در اقلیم گرم مرطوب کاسته می‌شود. از آنجایی که آفتاب به ضلع شمالی ساختمان‌های واقع در مناطق شمالی خط استوا تابیده نمی‌شود، در این حالت بارهای تشعشعی ورودی به اتاق از طریق پنجره، که ناشی از تابش خورشید می‌باشند، حذف می‌گردند. که این خود دلیلی برای کاهش بار حرارتی اتاق و در نتیجه کاهش میزان چگالش است. در نتیجه اولویت در بکارگیری سیستم سرمایشی تابشی در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب، مربوط به ساختمان‌هایی است که پنجره بر ضلع شمالی آنها واقع شده است.

۹- بحث و نتیجه‌گیری

از آنچه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت می‌توان نتیجه گرفت که چگالش بخار آب موجود در هوا بر روی سطح سرد پانل‌های تابشی یکی از بزرگترین معایب این سیستم‌هاست که توسعه آنها را در مناطقی با آب و هوای مرطوب محدود کرده است. همین امر انگیزه‌ای است برای بررسی عملکرد این سیستم‌ها در شرایط بحرانی یعنی در شرایطی که دمای سقف از دمای شب‌نم هوا کمتر است و در نتیجه چگالش رخ می‌دهد. با توجه به مکانیزم حاکم بر پدیده چگالش، عوامل سرعت جریان هوا، دمای سطح پانل و اختلاف این دما با دمای شب‌نم هوا عوامل موثر بر چگالش هستند، که طبق رابطه (۱) نرخ متوسط چگالش بر روی سیستم سرمایشی تابشی سقفی بر حسب آنها محاسبه می‌شود.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از یک طراحی حرارتی مطلوب برای ساختمان، استفاده از سیستم‌های سرمایشی تابشی سقفی برای سه اقلیم گرم خشک، بیابانی و سرد ایران از لحاظ وقوع پدیده چگالش کاملاً بلامانع می‌باشد، به طوری که در هیچ یک از ساعات شبانه روز پدیده چگالش در آنها رخ نمی‌دهد. استفاده از چنین سیستم سرمایشی در دو اقلیم گرم مرطوب و معتدل مرطوب برای ساختمان‌هایی با طراحی حرارتی رایج در ایران، دچار مشکل اساسی چگالش است در صورتی که با طراحی حرارتی مطلوب تا حدود ۳۰ درصد از میزان چگالش در این دو اقلیم کاسته می‌شود. برای حذف باقی چگالش از سیستم در

این دو اقلیم بحرانی می‌بایست از سایر راهکارهای اشاره شده از جمله سیستم رطوبت زدا به همراه طراحی حرارتی مطلوب برای ساختمان‌ها استفاده نمود.

مراجع

- [1] Novoselac, A., and Srebric, J., "A Critical Review on the Performance and Design of Combined Cooled Ceiling and Displacement Ventilation Systems", *Energy and Building*, Vol. 34, pp. 497-509, (2002).
- [2] Alamdari, F., "Chilled Ceiling And Displacement Ventilation", *Renewable Energy*, Vol.15, pp. 300-305, (1998).
- [3] Antonopoulos, K.A., "Experimental Evaluation of Energy Saving in Air Conditioning using Metal Ceiling Panels", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, pp.1129-1138, (1998).
- [4] Catalina, T., "Evaluation of Thermal Comfort using Combined CFD and Experimentation Study in a Test Room Equipped with a Cooling Ceiling", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 1740-1750, (2009).
- [5] Stetiu, C., "Radiant Cooling in US Office Building: Towards Eliminating the Perception of Climate – Imposed Barriers", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, (1998).
- [6] Zhang, L.Z., and Niu, J.L., "Indoor Humidity Behaviors Associated with Decoupled Cooling in Hot and Humid Climates", *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 99-107, (2003).
- [7] Hirayama, Y., and Batty, W.J., "Dehumidifying Chilled Radiator System for Hot and Humid Climates", *Energy and Building*, Vol. 30, pp. 203-210, (1999).
- [8] Mumma, S.A., "Ceiling Panel Cooling Systems", *ASHRAE Journal*, Vol. 43, No. 11, pp. 28-31, (2001).
- [9] Yin, Y., "Condensation Risk in a Room with High Latent Load and Chilled Ceiling Panel and with Air Supplied Room Liquid Desiccant System", *HVAC&R Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 315-327, (2009).
- [۱۰] حسینی، ا.، "تحلیل عملکرد پانل‌های سرمایش سقفی هیدرونیکی در نزدیکی دمای شبنم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۹۰).
- [11] Liang, Y., "Effect of Vapor Condensation on Forced Convection Heat Transfer of Moistened Gas", *Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 677-686, (2007).

[12] Treybal, R. E., "Mass-transfer Operations", McGraw-Hill, Third Edition, New York, (1981).

[13] Energy plus Documentation, Version 4.0, October, (2009).

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm

[14] Fanger, P. O., "Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering", McGraw Hill, New York, (1970).

فهرست نمادهای انگلیسی

ACH: نرخ تعویض هوا در ساعت

c: غلظت گونه بخار آب، (kg/kg)

D_{12} : ضریب نفوذ گونه ۱ در ۲، (m^2/s)

"m": شار گرمی، ($mg/s.m^2$)

PMV: شاخص آسایش حرارتی

T: دما، ($^{\circ}C$)

U: سرعت جریان آزاد در راستای افقی، (m/s)

نمادهای یونانی

ρ : چگالی، (kg/m^3)

ϕ : رطوبت نسبی، (درصد)

زیرنویس

1: بخار آب

2: هوا

air: هوا

cond: چگالش

dp: نقطه شبنم

nc: فاز غیر قابل چگالش

panel: پانل سقفی

tot: کل

Abstract

The phenomenon of condensation on Radiant Ceiling Cooling (RCC) systems limits the application of this system in humid climates. The utilization of this system in different climates of Iran has been surveyed in this research. The calculation of exact rate of condensation reveals no condensation in three following climates: hot & dry, cold and desert climates, in case of proper thermal design of buildings. Utilization of this system in hot-humid and moderate-humid climates has serious problem of condensation in buildings with current thermal design of buildings. The condensation has been reduced up to 30 percent in both of the critical climates by applying a proper thermal design.