

ارائه‌ی رابطه‌ی کاربردی جدید برای برآورد میزان چگالش در سیستم‌های سرمایش تابشی

سید امیررضا حسینی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی معرفت* (دانشیار)

سید علیرضا ذوالفقاری (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دربی ۲ - ۲۹، شماری ۲، ص. ۴۶-۳۹

hosseini.mechanic@gmail.com
maerefat@modares.ac.ir
alireza.zolfaghari@yahoo.com

واژگان کلیدی: چگالش، سرمایش تابشی، هوای مرطوب، نقطه‌ی شبنم.

مقدمه

با گسترش شهرنشینی مدرن انسان امروزی بیشتر وقت خود را درون محیط‌های بسته‌ی مسکونی و تجاری می‌گذراند. ایجاد شرایط آسایش حرارتی و فراهم آوردن هوایی پاک برای ساکنان محیط‌های داخلی، ازجمله دلایل استفاده از سیستم‌های سرمایشی، گرمایشی و تهویه مطبوع در ساختمان‌هاست. سیستم‌های تهویه‌بی^۱ ازجمله سیستم‌هایی هستند که دارای مصرف انرژی زیادند، به‌طوری که ۴۰٪ از هزینه مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری مربوط به بخش سرمایش و گرمایش است.^[۱] لذا مصرف انرژی کم یکی از پارامترهای کلیدی در انتخاب نوع سیستم تهویه برای یک محیط بسته است.

امروزه سیستم‌های سرمایش تابشی به‌دلیل مصرف انرژی کم، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. یادآور می‌شود برای محیط‌هایی با بار متوسط، حرارتی در حدود 40 W/m^2 بسیار مناسب است.^[۲]

سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی از پانل‌هایی با سطوح فلزی تشکیل شده‌اند که روی سقف نصب می‌شود. درون پانل‌ها لوله‌های آب سرد قرار دارد. این پانل‌های سرمایش سقفی با ایجاد سطوح وسیع و با اختلاف دمای اندک با محیط، از طریق تشعشع و انتقال آن به خارج از محیط، بارهای حرارتی را جذب می‌کند. در این سیستم‌ها به‌دلیل تبادل حرارت مستقیم تابشی بین سرافراد و پانل‌ها، رسیدن به شرایط آسایش حرارتی در دمای بالاتر هوا اتفاق می‌افتد که موجب صرفه‌جویی در مصرف

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۶/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۴/۴، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۲۴.

انرژی به میزان ۱۲/۵٪ نسبت به سیستم‌های سرمایشی جابه‌جایی^۲ می‌شود.^[۳] همچنین تحقیقات نشان داده که نارضایتی حرارتی موضعی در این سیستم‌ها بسیار کم است، به‌طوری که در محیط‌هایی با سیستم سرمایش تابشی سقفی، گرادبان عمودی دمای هوای اتاق در محدوده‌ی مجاز آسایش حرارتی قرار دارد.^[۴]

در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی سرعت جریان هوای داخل اتاق در حدود 0.2 m/s متر بر ثانیه است که این سرعت در مناطقی سکون به کم‌تر از 0.1 m/s متر بر ثانیه می‌رسد.^[۴] به‌همین دلیل تاکنون در هیچ‌یک از تحقیقات انجام‌شده در خصوص این سیستم‌ها، به پدیده‌ی کوران به‌عنوان یکی از عوامل نارضایتی حرارتی موضعی اشاره نشده است.^[۵] تابش نامتقارن از دیگر عوامل نارضایتی حرارتی موضعی است که به‌دلیل اختلاف دمای ناچیز میان سطوح پانل و سایر سطوح اتاق به وجود می‌آید. به‌دلیل وجود سطوح تابشی وسیع در این سیستم‌ها، تابش نامتقارن موجب نارضایتی حرارتی ساکنان نخواهد شد.^[۱]

برخلاف سیستم‌های سرمایشی جابه‌جایی که دو عمل سرمایش و تهویه‌ی هوا را توأماً انجام می‌دهند، سیستم سرمایش تابشی عمل سرمایش و یک سیستم جابه‌جایی 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 مناطقی دارای آب و هوای مرطوب، علاوه بر بار حرارتی محسوس^۳ -- ناشی از حضور افراد و نیز وسایل گرمازا نظیر لامپ، کامپیوتر و غیره -- بار حرارتی نهان^۴ -- ناشی از چگالش بخار آب موجود در هوا بر روی سطوح سرد پانل‌ها -- نیز به سیستم تحمیل می‌شود. شدت بار حرارتی نهان در سیستم که به‌دلیل وجود رطوبت نسبتاً زیاد در محیط

است، موجب می‌شود تا فشار بخار آب در هوا بیشتر از فشار بخار اشباع روی سطح پانل سقفی شود و در نتیجه منجر به چگالش بخار آب روی سطح پانل می‌شود.^[۷] تداوم چالش روی سطح باعث افزایش میزان آب روی سطح می‌شود به طوری که با به هم پیوستن قطرات ریز و تشکیل قطرات درشت‌تر، قطرات به سمت پایین می‌ریزد و اصطلاحاً موجب بارش داخلی^۵ می‌شود که شرایط سکونت را بر هم می‌زند.^[۲]

پیشینه‌ی تحقیق

در تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۹۸، میزان چگالش در سیستم سرمایش تابشی، در یک روز از ماه ژوئن، بررسی و ضخامت فیلم مایع تخمین زده شده است.^[۳] همچنین برای جمع‌آوری مایع روی سطح پیشنهاد شده پانل‌ها به صورت شیب‌دار روی سقف، یا روی دیوار در ارتفاعی که سر افراد قرار دارد نصب شوند. در سال ۲۰۰۱ نیز برای دوری از شرایط چگالش روی سطح، و با استفاده از سیستم کنترلی هوای بیرونی (DOAS)، به منظور کنترل دمای شبنم محیط و با قطع و وصل کردن آب سرد ورودی به پانل‌ها توسط این سیستم کنترلی، همواره دمای پانل را بالاتر از دمای شبنم هوای محیط نگه می‌دارند.^[۸] در این صورت بارهای نهان و محسوس در سیستم از هم جدا می‌شوند و در نهایت چگالش رخ نمی‌دهد. در سال ۲۰۰۲ محققین اختلاف دمای ۱°C میان دمای سطح پانل و دمای شبنم هوا را در یک سیستم سرمایش تابشی به همراه تهویه جابه‌جایی مطلوب برای جلوگیری از چگالش مناسب می‌دانند.^[۱] در ادامه، آنان چگالش بر روی سطح پانل‌ها را مشکل اساسی در به کارگیری سیستم سرمایش تابشی در مناطق گرم و مرطوب معرفی کردند. آنها با اضافه کردن یک سیستم رطوبت‌زدا و تهویه جابه‌جایی به سیستم سرمایش تابشی به این نتیجه رسیدند که رطوبت‌زدایی یک ساعت قبل از شروع به کار سیستم سرمایش تابشی، باعث جلوگیری از چگالش در ساختمان‌هایی با نفوذ هوای کم (کم‌تر از ۰.۵ ACH) می‌شود.^[۶] این روش برای شروع به کار مجدد سیستم سرمایش، خصوصاً در روزهای بعد از تعطیلات آخر هفته حیاتی است. در سال ۲۰۰۹ نیز محققین با ارائه‌ی یک سیستم رطوبت‌زدا و با تحت کنترل درآوردن رطوبت داخل توانسته‌اند از وقوع چگالش جلوگیری کنند.^[۹]

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

به این ترتیب در این تحقیق استفاده از سیستم سرمایش تابشی سقفی به همراه یک سیستم تهویه جابه‌جایی و بدون رطوبت‌زدایی مورد توجه است، به طوری که در شرایط بحرانی و در معرض وقوع پدیده‌ی چگالش قرار بگیرد. آنچه که تعیین نرخ چگالش بخار آب را روی پانل‌های سرد سقفی حائز اهمیت می‌کند، تشکیل قطرات آب حاصل از چگالش روی سقف و تجمع و در نهایت چکیدن آنهاست. این موضوع در مناطقی با آب و هوای شرجی و مرطوب شدیدتر است و عموماً استفاده از چنین سیستم‌های سرمایشی را محدود می‌کند. برای هرچه بیشتر کاربردی کردن این سیستم سرمایش باید با در نظر گرفتن میزان چگالش در طراحی و محاسبه‌ی حد مجازی برای آن، تشکیل قطرات و چکیدن آنها را تا حد زیادی به تأخیر انداخت. به همین دلیل ارائه‌ی یک رابطه‌ی کاربردی ساده که بتواند نرخ دقیق چگالش را در

محیط مجهز به سیستم سرمایش تابشی -- با در دست داشتن اطلاعات پایه از دما و جریان -- محاسبه کند، ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق به دست آوردن نرخ دقیق چگالش آب روی سطح سرد پانل سرمایش تابشی در شرایط متفاوت آب و هوایی است؛ به طوری که با ارائه‌ی یک رابطه‌ی کاربردی ساده برای محاسبه‌ی نرخ چگالش در این نوع سیستم سرمایش بتوان نرخ چگالش را در جریان هوای مرطوب با شرایط گوناگون محاسبه کرد.

مدل چگالش

از آنجا که چگالش بر روی پانل اتفاق می‌افتد، مدل‌سازی چگالش باید روی سطح پانل انجام شود. در این مدل‌سازی با استفاده از روابط انتقال جرم به صورت نفوذ^۲ در گازها و با در نظر گرفتن حجم کنترل متصل به سطح پانل، روابط بالانس جرمی برای هوا و همچنین برای بخار آب درون حجم کنترل به صورت زیر نوشته می‌شود:^[۱۰]

$$m_{cond}'' = (-\rho D_{12} \frac{\partial C_1}{\partial y}) + C_1(m_{tot}'') \quad (۱)$$

$$m_{nc}'' = (-\rho D_{12} \frac{\partial C_2}{\partial y}) + C_2(m_{tot}'') \quad (۲)$$

رابطه‌ی ۱ مربوط به فاز قابل چگالش یعنی بخار آب، و رابطه‌ی ۲ مربوط به فاز غیر قابل چگالش یعنی هواست. در این روابط اولین جمله‌ی سمت راست مربوط به نفوذ، و دومین جمله مربوط به جرم هریک از فازها درون حجم کنترل است. اندیس ۱ مربوط به بخار آب و اندیس ۲ مربوط به هواست. از آنجا که رابطه‌ی ۲ مربوط به فاز غیرقابل چگالش است، این رابطه برابر صفر قرار می‌گیرد و مقدار m_{tot}'' از رابطه‌ی ۲ در رابطه‌ی ۱ جایگذاری می‌شود:

$$m_{cond}'' = (-\rho D_{12} \frac{\partial C_1}{\partial y}) + C_1(\frac{\rho D_{12}}{C_2} \frac{\partial C_2}{\partial y}) \quad (۳)$$

C_1 غلظت گونه‌ی بخار آب درون حجم کنترل، و C_2 غلظت گونه‌ی هوا درون حجم کنترل است، به طوری که:

$$C_1 + C_2 = ۱ \quad (۴)$$

با ترکیب روابط ۳ و ۴ و با بازنویسی آنها روی سطح پانل به رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی میزان چگالش برحسب (kg/m^۲.s) خواهیم رسید:

$$m_{cond}'' = -\frac{\rho D_{12}}{1 - C_{1w}} (\frac{\partial C_1}{\partial y})_w \quad (۵)$$

در این رابطه D_{12} ضریب نفوذ بخار آب در هوا، و $(\frac{\partial C_1}{\partial y})_w$ گرادیان غلظت بخار آب روی سطح پانل و C_{1w} غلظت بخار آب روی سطح پانل است. نکته‌ی قابل توجه این است که برای به وجود آمدن چگالش، سطح پانل باید در شرایط دما و رطوبت اشباع قرار بگیرد؛ این حالت در صورتی رخ می‌دهد که دمای سطح پانل برابر یا کم‌تر از دمای شبنم هوای اطراف آن باشد. در این صورت، با در دست داشتن گرادیان عمودی غلظت بخار آب روی سطح پانل، محاسبه‌ی نرخ چگالش با استفاده از رابطه‌ی ۵ بر روی سطح پانل سقفی امکان‌پذیر خواهد بود.^[۱۰]

مدل جریان اطراف پانل

برای محاسبه‌ی نرخ چگالش از طریق رابطه‌ی ۵، به اطلاعاتی از جریان هوای نزدیک به سطح پانل نیازمندیم. از آنجا که محاسبه‌ی چگالش توسط این رابطه با استفاده

انرژی به صورت حل همزمان 1° به دست می آید. معادلات حاکم به ترتیب در روابط ۶ تا ۹ آورده شده است: [۱۲]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\rho u \frac{\partial c_1}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_1}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial c_1}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{C_p} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho D_{12} (C_{p1} - C_{p2}) \frac{\partial c_1}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (9)$$

اندیس های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به بخار آب و هواست. μ گرانیوی دینامیکی، ρ چگالی مخلوط و $\overline{C_p}$ ظرفیت حرارتی ویژه مخلوط هوا و بخار آب است. u و v به ترتیب سرعت جریان در راستای جریان و عمود بر آن است، Sc و Pr به ترتیب اعداد پی بعد پراختل و اشمیت هستند. از آنجا که طول پانل سقفی و مرتبه سرعت جریان به وجود آمده روی آن به گونه ای است که جریان در طول پانل آرام باقی می ماند، مدل توربولانسی در نظر گرفته نشده و نیازی به حل معادلات اضافی کمکی برای اغتشاش جریان نیست.

در معادله ی بقای اندازه حرکت خطی در راستای افقی (معادله ی ۷)، ترم گرادیان افقی فشار حذف شده است. این امر به دلیل ثابت فرض کردن سرعت افقی جریان آزاد خارج از لایه ی مرزی و با استفاده از تحلیل مقیاسی^{۱۱} بین سه جمله ی لختی، فشاری و اصطکاکی در معادله ی بقای اندازه حرکت خطی در جهت جریان اتفاق افتاده است. [۱۳، ۱۴]

شرایط مرزی

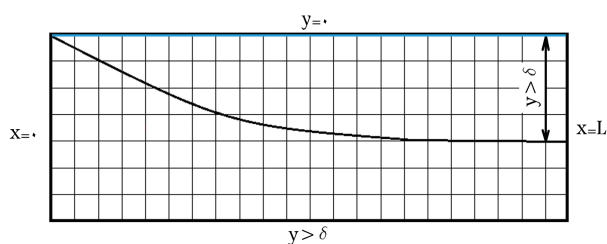
جریان خارج از لایه ی مرزی شامل مخلوط دو تایی از هوا و بخار آب با سرعت U_∞ است که با دمای ثابت T_∞ و غلظت بخار آب ثابت $C_{1\infty}$ در امتداد پانل سقفی می وزد. در این صورت هوا دارای رطوبت نسبی ϕ_∞ است که در طول هندسه ی حل ثابت است. برای ایجاد شرایط وقوع چگالش، دمای سطح در پائین تراز دمای شبنم هوا (T_w) است و در این دما در شرایط اشباع در رطوبت (C_{1w}) قرار دارد. به طور کلی شرایط مرزی با توجه به شکل ۲ چنین است:

۱. در $x = 0$,

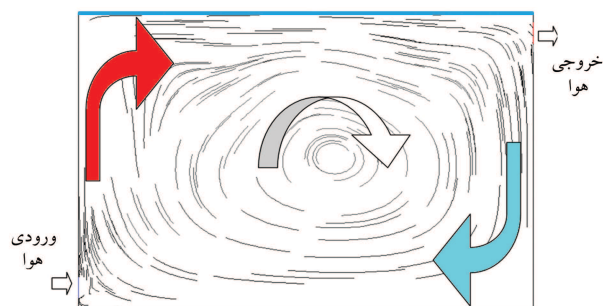
$$u = U_\infty, \quad v = 0, \quad T = T_\infty, \quad C_1 = C_{1\infty}, \quad \phi = \phi_\infty$$

۲. در $y > \delta$ (عرض لایه ی مرزی است)،

$$u = U_\infty, \quad v = v(y), \quad T = T_\infty, \quad C_1 = C_{1\infty}, \quad \phi = \phi_\infty$$



شکل ۲. دامنه ی حل و شرایط مرزی.



شکل ۱. شماتیک جریان چرخشی هوا در داخل اتاق.

از نفوذ مولکولی است، اطلاع از چگونگی جریان هوا و میزان رطوبت و همچنین گرادیان عمودی غلظت بخار آب روی سطح پانل ضروری است.

چنان که گفته شد، محاسبه ی نرخ چگالش در یک اتاق مجهز به سیستم سرمایش تابشی سقفی به همراه تهویه ی جابه جایی هدف این پژوهش است. این اتاق براساس استاندارد ASHRAE-۱۴۰، یک اتاق سه بعدی با ابعاد $2.7 \times 6 \times 8$ متر است. روی سقف، یک پانل سرمایش تابشی با ابعاد 4×7 متر نصب شده، طوری که حدود 60% از سطح سقف را پوشش می دهد.

تهویه ی جابه جایی شامل دریچه یی برای تهویه ی هوای تازه^۸ برای اتاق و دریچه یی برای خروج هوا^۹ است که 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 آلاینده های ناشی از تنفس نیز می شود. ورود هوای تازه به داخل هوای اتاق که به دلیل وجود سیستم سرمایشی دارای دمایی پایین تر نسبت به دمای هوای خارج است سبب حرکت هوای ورودی به سمت بالا توسط نیروهای شناوری می شود. [۱۱] در شکل ۱ شماتیک جریان هوا در یک اتاق مجهز به پانل سرمایش تابشی سقفی نشان داده شده است. جریان هوا پس از عبور از روی سطح پانل و پس از سرد شدن، از انتهای پانل به سمت پایین اتاق سرازیر می شود که سبب به چرخش درآمدن هوای داخل و همچنین ایجاد یک لایه ی مرزی روی سطح پانل سقفی می شود. از آنجا که سرعت جریان هوا در داخل اتاق و همچنین در دریچه ی ورودی بسیار کم (در حدود 0.1 متر بر ثانیه) است، لایه ی مرزی ایجاد شده بر روی سطح پانل سقفی از نوع آرام است.

چنان که پیش تر نیز اشاره شد برای محاسبه ی چگالش، داشتن اطلاع دقیق از وضعیت جریان هوا و رطوبت در نزدیکی سطح پانل سقفی ضرورت دارد. بدین منظور جریان لایه ی مرزی آرام روی سطح پانل سقفی به عنوان مدل مطلوب برای بررسی جریان و در نهایت محاسبه ی چگالش در نظر گرفته شده است. با این کار بدون نیاز به مدل سازی کل جریان اتاق، تنها بخشی از جریان اتاق که بر چگالش تأثیرگذار است مورد تحلیل قرار گرفته است.

معادلات حاکم بر لایه ی مرزی

جریان گذرنده از روی سطح پانل به صورت جریان لایه ی مرزی دوبعدی روی پانل سقفی در نظر گرفته شده است. این جریان شامل مخلوط دو تایی از هوا و بخار آب است. در این صورت مسئله شامل ۴ مجهول سرعت در جهت جریان (u)، سرعت عمود بر جهت جریان (v)، غلظت گونه ی بخار آب (c) و دمای مخلوط بخار آب و هوا (T) است که توزیع آنها در دامنه ی حل، توسط حل چهار معادله ی پیوستگی، بقای اندازه حرکت خطی در جهت جریان، بقای گونه ی بخار آب و بقای

۳. در $y = 0$ (سطح پانل سقفی)،

$$u = 0, \quad v = \left(\frac{D_{12}}{1 - C_{1w}} \frac{\partial C_1}{\partial y} \right)_w, \quad T = T_w, \quad C_1 = C_{1w}, \quad \phi = 100\%$$

لایه‌ی مرزی انتخاب شده است. با توجه به ضرورت دست‌یابی به گرادینان غلظت بخار آب روی سطح پانل به‌منظور محاسبه‌ی نرخ چگالش، برای محاسبه‌ی هرچه دقیق‌تر این پارامتر، تولید شبکه در دامنه‌ی حل به‌گونه‌ی است که شبکه‌ی نقاط به سمت دیواره متراکم و ریزتر می‌شود.

عوامل مؤثر بر چگالش

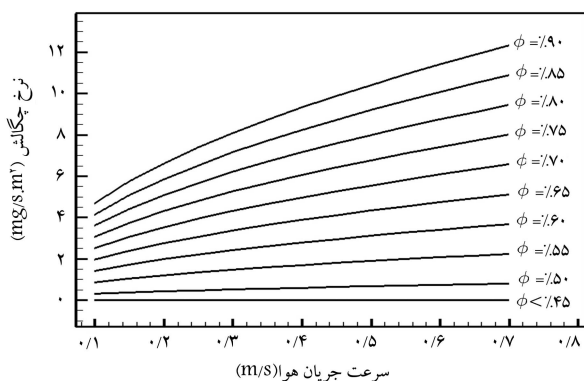
پس از حل معادلات حاکم و به دست آمدن توزیع مجهولات در سراسر دامنه‌ی حل، نرخ چگالش بخار آب بر روی سطح پانل توسط رابطه‌ی ۵ قابل محاسبه است. از آنجا که گرادینان عمودی غلظت بخار آب روی پانل -- همانند گرادینان عمودی سرعت افقی -- در ابتدای پانل بیشترین مقدار را دارد و تا انتهای پانل از شدت این گرادینان کاسته می‌شود، نرخ چگالش محاسبه‌شده نیز در سراسر پانل ثابت نیست و از ابتدای پانل تا انتهای آن سیر نزولی دارد. به‌همین دلیل میزان متوسط نرخ چگالش در سراسر پانل مبنای ارزیابی قرار خواهد گرفت و از این پس منظور از نرخ چگالش، نرخ متوسط چگالش در طول پانل است.

هرآنچه بر شدت گرادینان عمودی غلظت بخار آب روی سطح پانل تأثیر بگذارد جزء عوامل مؤثر بر میزان چگالش بخار آب محسوب می‌شود. ازجمله‌ی این عوامل می‌توان به شرایط مرزی تأثیرگذار بر توزیع غلظت بخار آب اشاره کرد. دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوای اطراف پانل و دمای اشباع سطح پانل از جمله‌ی این عوامل‌اند. برای بررسی میزان نرخ چگالش، این عوامل در یک محدوده‌ی معنی‌دار در تهویه مطبوع تغییر کرده و به‌ازای هریک از آنها نرخ چگالش محاسبه شده است. محدوده‌ی هریک از پارامترهای مؤثر عبارت است از:

$$T_{air} = 18 \sim 28 (^{\circ}C), \quad \phi_{air} = 30 \sim 90 (\%), \\ U_{air} = 0.1 \sim 0.7 (m/s), \quad T_{panel} = 7 \sim 21 (^{\circ}C)$$

نتایج چگالش

در نمودار شکل ۴ نرخ چالش به‌ازای سرعت هوا در رطوبت‌های نسبی متغیر از ۴۵ تا ۹۵ درصد نشان داده شده است. نرخ چگالش برحسب میلی‌گرم بر ثانیه به‌ازای هر متر مربع از پانل سقفی است. به‌طوری که پانل در دمای ۱۳ و هوا در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار دارد. با افزایش سرعت هوا، نرخ چگالش روند صعودی



شکل ۴. نمودار نرخ چگالش به‌ازای سرعت جریان روی پانل.

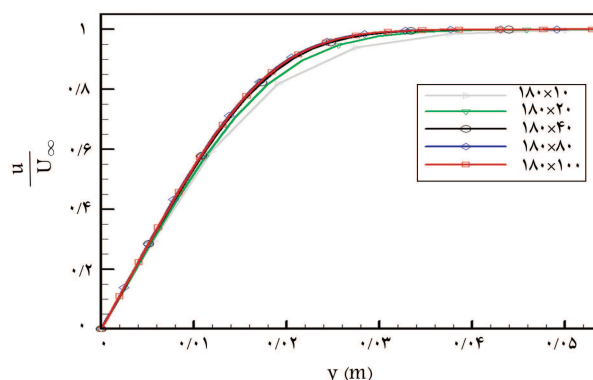
روش حل

روش اتخاذ شده در حل مسئله، روش عددی اختلاف محدود است. گسسته‌سازی صریح معادلات، برای ترم‌های ایزرسی به‌صورت باد بالا^{۱۲} و برای ترم‌های لزجی به‌صورت مرکزی^{۱۳} بوده است. آنچه در گسسته‌سازی‌ها اهمیت دارد، گسسته‌سازی معادله‌ی پیوستگی با استفاده از یک شبکه‌ی جابه‌جا شده است، به‌طوری که ترم $\partial u / \partial x$ روی شبکه‌ی جابه‌جا شده در راستای عمودی متوسط‌گیری شده است. این گسسته‌سازی برای معادله‌ی پیوستگی به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ است:

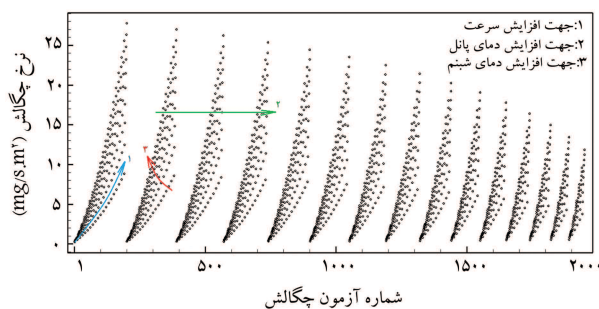
$$\frac{1}{2} \left[\frac{u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - u_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{u_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} - u_{i,j-\frac{3}{2}}^{n+1}}{\Delta x} \right] + \frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = 0 \quad (11)$$

این نوع گسسته‌سازی باعث انتقال صحیح اطلاعات از داخل لایه‌ی مرزی به خارج از آن شده و از واگرایی حل جلوگیری می‌کند.^[۱۴]

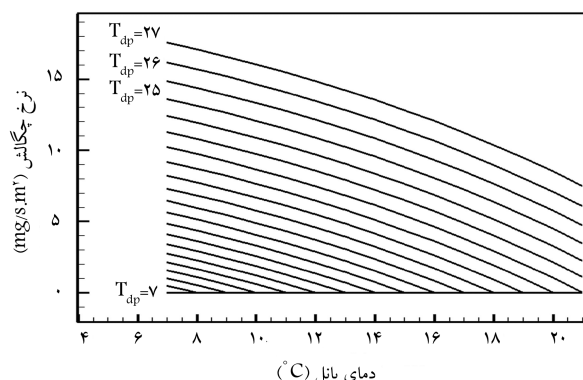
با توجه به نمودار شکل ۳ شبکه‌ی انتخابی، شبکه‌ی بی است با تعداد 180×180 گره، که با استفاده از آزمون استقلال از شبکه^{۱۴} روی پروفیل بی بعد شده سرعت



شکل ۳. استقلال از شبکه بر روی پروفیل بی بعد سرعت.



شکل ۶. نمودار نرخ چگالش به ازای دمای پانل و نقطه‌ی شبنم.



شکل ۵. نمودار نرخ چگالش به ازای دمای پانل و نقطه‌ی شبنم.

تابشی، برحسب پارامترهای مؤثر و قابل اندازه‌گیری، یاریگر طراح این‌گونه سیستم‌ها در محاسبه‌ی دقیق و سریع نرخ چگالش در شرایط متفاوت است.

با ترکیب دو عامل دما و رطوبت نسبی هوا، و جایگزینی آنها با دمای شبنم هوا، یکی از تعداد عوامل مؤثر کاسته شده و روند رسیدن به رابطه‌ی مورد نظر تسهیل می‌شود. بنابراین سه عامل سرعت، دمای شبنم هوا، و دمای اشباع سطح پانل عواملی هستند که رابطه‌ی مورد نظر برای محاسبه‌ی نرخ چگالش را باید برحسب آنها بیان کرد. به این ترتیب با مشخص شدن تعداد و نوع عوامل مؤثر بر چگالش این عوامل و محدوده‌ی تغییرات آنها در تئوی مطبوع چنین ارائه می‌شوند:

$$T_{dp} = 7 \sim 27 (^{\circ}C)$$

$$U_{air} = 0/1 \sim 0/7 (m/s)$$

$$T_{panel} = 7 \sim 21 (^{\circ}C) \quad (12)$$

با ترکیب عوامل موجود در بازه‌های مشخص‌شده‌ی فوق، حدود ۲۰۰۰ ترکیب متفاوت از این عوامل وجود خواهند داشت که نرخ چگالش در تمامی این حالات محاسبه شده است. در شکل ۶ نرخ چگالش به ازای تمامی حالات ممکن از عوامل مؤثر در محدوده‌های ذکر شده نشان داده شده است، به‌طوری که روند تغییر در عوامل مؤثر بر آن نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود نرخ چگالش دارای روندی معنادار به ازای تغییر در هریک از عوامل مؤثر است و این حاکی از وجود رابطه‌ی مشخص بین چگالش و عوامل مؤثر بر آن است. این رابطه صرفاً توسط برازش منحنی ۱۵ بر داده‌های چگالش موجود در شکل ۶ به دست آمده است:

$$m''_{cond} = 4/14 \times 10^{-4} \cdot \phi_{air}^4 \cdot T_{panel}^{-2/21} \cdot T_{air}^{5/22} \cdot U_{air}^{0/2} \quad (13)$$

این رابطه از لحاظ ساختار، رابطه‌ی ساده و کاربردی نیست و در عین برخورداری از دقت قابل قبول، دارای توان‌ها و ضرایب نامعقولی است که هیچ فیزیکی از چگالش را بیان نمی‌کند. به همین دلیل برای رسیدن به رابطه‌ی که علاوه بر سادگی، مفهوم فیزیکی صحیح را منتقل کند و از لحاظ دقت در محاسبه‌ی نرخ چگالش در محیط‌های مجهز به سیستم سرمایش تابشی سقفی نیز قابل اطمینان باشد، رابطه‌ی ۱۳ با استفاده از تشابه بین انتقال حرارت و انتقال جرم چنین در نظر گرفته می‌شود:

$$m''_{cond} = h_c \cdot (\Delta T) \quad (14)$$

از آنجا که همواره تشابهاتی در روابط و اعداد بی‌بعد بین انتقال حرارت و انتقال جرم وجود دارد، در اینجا نیز رابطه‌ی مورد نظر برای نرخ چگالش، که خود نوعی شار انتقال جرم است، مشابه شار انتقال حرارت جابه‌جایی فرض شده است. به‌طوری که h_c ضریب چگالش و مشابه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. حاصل ضرب

دارد. آنچه که موجب تأثیر سرعت بر نرخ چگالش می‌شود وجود ترم‌های سرعت در معادله‌ی بقای گونه‌ی بخار آب است به‌طوری که افزایش سرعت جریان خارج از لایه‌ی مرزی باعث کاهش ضخامت لایه‌ی مرزی هیدرودینامیکی و نیز غلظت گونه شده است. این امر موجب افزایش گرادیان عمودی غلظت بخار آب روی دیواره و در نتیجه افزایش نرخ چگالش در سراسر پانل می‌شود. مشاهده می‌شود که در رطوبت‌های نسبی بالاتر، روند افزایش نرخ چگالش بخار آب به ازای افزایش سرعت شدیدتر است.

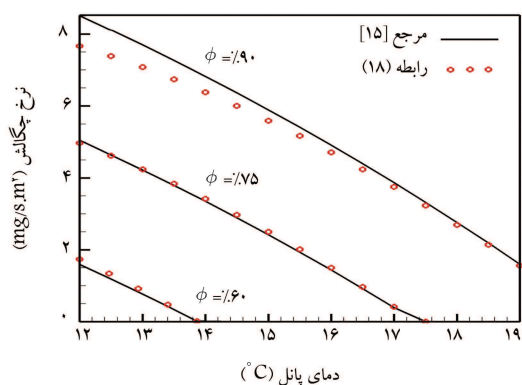
در شکل ۵ نمودار نرخ چگالش به ازای دمای پانل در هوا با دماهای متفاوت شبنم از ۷ تا ۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان داده شده است. سرعت جریان هوای خارج از لایه‌ی مرزی ۰/۴ متر بر ثانیه فرض شده است. چنان که مشاهده می‌شود در دمای پانل بالاتر از دمای شبنم، میزان چگالش صفر است. نرخ چگالش از دمای پانل مساوی با دمای شبنم هوا آغاز و تا دماهای پایین‌تر از آن افزایش می‌یابد. در تمامی منحنی‌های شکل ۵، چنانچه دمای سطح پانل کمتر از دمای شبنم هوای اطراف پانل باشد چگالش رخ می‌دهد، و هرچه این اختلاف دما بیشتر باشد میزان چگالش شدیدتر خواهد بود.

چنان که پیش‌تر نیز اشاره شد چهار عامل دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوای خارج از لایه‌ی مرزی تشکیل شده روی پانل سقفی و نیز دمای سطح پانل، عوامل تأثیرگذار بر میزان نرخ چگالش‌اند. برای بررسی شدت اثرگذاری هریک از پارامترها بر نرخ چگالش، به ازای ۲۵٪ تغییر در هریک از پارامترها میزان افزایش و کاهش نرخ چگالش محاسبه شده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که در جریان هوا با سرعت ثابت که از روی پانل سقفی با دمای ثابت عبور می‌کند، عامل اختلاف دمای شبنم جریان هوا با دمای سطح پانل، مؤثرترین عامل در وقوع چگالش برای پانل‌های سقفی است.

ارائه‌ی رابطه‌ی کاربردی محاسبه‌ی چگالش روی

پانل‌های سرمایش سقفی

چهار عامل دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا و دمای سطح پانل سقفی از جمله عوامل مؤثر بر چگالش‌اند که به‌راحتی قابل اندازه‌گیری‌اند، در حالی که محاسبه‌ی چگالش روی پانل‌های سرمایش تابشی (توسط رابطه‌ی ۵ و روابط مشابه) نیازمند در دست داشتن گرادیان غلظت بخار آب روی سطح پانل است که برای به دست آوردن آن باید به روش‌های حل بعضاً پیچیده و زمان‌بر متوسل شد. لذا وجود رابطه‌ی ساده به‌منظور محاسبه‌ی نرخ چگالش بخار آب روی سطح سرد پانل‌های سرمایش



شکل ۷. مقایسه‌ی نرخ چگالش در رابطه‌ی ۱۸. [۱۵]

سطح پانل است که خود نیاز به محاسبه و حل‌های عددی گاه‌آ پیچیده و زمان‌بر دارد. علاوه بر این، رابطه‌ی فوق عامل اختلاف بین دمای شبنم هوا و دمای سطح پانل را، که به‌وضوح بر نرخ چگالش مؤثر است، در خود جای داده است. برای کسب اطمینان از رابطه‌ی به دست آمده، روش حل در دو مرحله اعتبارسنجی شده است. در مرحله‌ی اول با توجه به وجود حل تشابهی برای جریان لایه‌ی مرزی آرام روی سطح تخت، پروفیل بی‌بعد شده‌ی سرعت جریان در لایه‌ی مرزی به دست آمده توسط حل عددی با پروفیل بی‌بعد سرعت در حل تشابهی موجود [۱۴] مقایسه شده که نتایج حاصله نشان‌گر تطابق نزدیک به ۱۰۰ درصد است. در مرحله‌ی دوم، رابطه‌ی ارائه‌شده برای محاسبه‌ی نرخ چگالش (رابطه‌ی ۱۸) با حل رابطه‌ی انتقال جرم به‌صورت نفوذ در گازها، [۱۵] در دماهای متفاوت برای هوا و سطح پانل و در رطوبت‌های نسبی متفاوت مقایسه شده است. نمودار شکل ۷ نرخ چگالش را برحسب دمای سطح پانل در هوا با دمای ۲۲ درجه‌ی سانتی‌گراد و در رطوبت‌های نسبی ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد نشان می‌دهد. بیشینه توله‌انس خطای محاسبه‌شده بین جواب‌های ناشی از رابطه‌ی ارائه شده و جواب‌های موجود، [۱۵] حدود $\pm 5\%$ درصد است که برای هوا در رطوبت نسبی ۹۰ درصد رخ می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود در بیشتر حالات رابطه‌ی ارائه شده دارای تطابق بسیار خوبی است.

نتیجه‌گیری

از مطالعات انجام‌شده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که چگالش بخار آب موجود در هوا روی سطح سرد پانل‌های سرمایش تابشی یکی از بزرگ‌ترین معایب این سیستم‌هاست که توسعه‌ی آنها را در مناطقی با آب و هوای مرطوب محدود کرده است. همین امر انگیزه‌ی 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 سازوکار حاکم بر پدیده‌ی چگالش، عوامل سرعت جریان هوا، دمای سطح پانل و اختلاف این دما با دمای شبنم هوا به‌عنوان عوامل مؤثر بر چگالش شناسایی شده‌اند.

در این میان با توجه به محاسبات انجام گرفته درخصوص تأثیر هریک از عوامل بر نرخ چگالش بخار آب، عامل اختلاف بین دمای شبنم هوا و دمای سطح پانل به‌عنوان مؤثرترین عامل بر شدت چگالش شناسایی شده است. با حل معادلات حاکم برای جریان هوای مرطوب گذرنده از سطح سرد با ترکیب‌های زیادی از عوامل مؤثر، نتایج نرخ چگالش برای تمامی حالت‌های موجود گزارش شده است. با رگرسیون

این ضریب در یک اختلاف دما، مشابه آنچه در رابطه‌ی انتقال حرارت جابه‌جایی وجود دارد، میزان چگالش را محاسبه خواهد کرد.

طبق پیش‌بینی‌ها و محاسبات انجام‌شده سه عامل دمای سطح پانل، سرعت جریان هوا و اختلاف دمای بین سطح پانل و دمای شبنم هوا در محاسبه‌ی نرخ چگالش مؤثر است و لذا، اختلاف دمای موجود در رابطه‌ی ۱۴ چنین تعریف می‌شود:

$$\Delta T = T_{dp} - T_{panel} \quad (15)$$

با این کار، عامل اختلاف دما که از مؤثرترین عوامل تعیین نرخ چگالش است به‌وضوح در رابطه‌ی مورد نظر ظاهر خواهد شد. به این ترتیب انتظار می‌رود که تأثیر دو عامل دیگر -- یعنی سرعت جریان هوا و دمای پانل -- در ضریب چگالش (h_c) خلاصه شوند. لذا h_c به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ و ترکیبی از دو عامل مؤثر موجود فرض می‌شود:

$$h_c = c_1 \cdot U_{air}^{c_2} \cdot T_{panel}^{c_3} \quad (16)$$

در رابطه‌ی ۱۶، c_1 تا c_3 ضرایب مجهولی هستند که با یافتن آنها رابطه‌ی مورد نظر برای محاسبه‌ی نرخ چگالش بخار آب در محیط‌های مجهز به سیستم سرمایش تابشی سقفی کامل خواهد شد.

برای به دست آوردن ضرایب مجهول رابطه‌ی مورد نظر، با انجام رگرسیون خطی بین تمامی نتایج ۲۰۰۰ نرخ چگالش موجود در شکل ۶ (که با حل مکرر معادلات حاکم به‌ازای ترکیب‌های متفاوتی از عوامل مؤثر به دست آمده‌اند)، ضرایب مجهول رابطه‌ی ۱۵ محاسبه شده و در نتیجه ضریب چگالش چنین ارائه می‌شود:

$$h_c = 0.364 \cdot U_{air}^{0.5} \cdot T_{panel}^{0.5} \quad (17)$$

به این ترتیب و با به دست آمدن ضرایب مجهول، رابطه‌ی مد نظر برای محاسبه‌ی چگالش به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ ارائه می‌شود:

$$m_{cond}'' = 0.364 \cdot U_{air}^{0.5} \cdot T_{panel}^{0.5} \cdot (T_{dp} - T_{panel}) \quad (18)$$

این رابطه نرخ چگالش را در واحد میلی‌گرم بر ثانیه به‌ازای هر متر مربع از سطح پانل محاسبه می‌کند. در صورتی که علامت عامل اختلاف دما منفی باشد، نرخ چگالش صفر است. این رابطه در محدوده‌ی تعیین‌شده در رابطه‌ی ۱۲ معتبر است. در این رابطه دماها برحسب درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوا برحسب متر بر ثانیه است.

اعتبارسنجی

رابطه‌ی به دست آمده از چندین نظر دارای اهمیت است. در رابطه‌ی حاصله برای ضریب چگالش (h_c)، جمله‌ی $U_{air}^{0.5}$ ظاهر شده که بسیار مشابه رابطه‌ی مورد نظر برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری است:

$$h = 12/1 \sqrt{U_{air}} \quad (19)$$

همین امر مبنایی برای تأیید صحت تشابه به‌کار گرفته شده بین شار انتقال جرم و شار انتقال حرارت است. محاسبه‌ی ساده‌ی چگالش برحسب عوامل مؤثری که در سرمایش سقفی جزء پارامترهای اصلی بوده و به‌سهولت قابل اندازه‌گیری‌اند، وجه امتیاز این رابطه غیردیفرانسیلی نسبت به سایر روابط است. در صورتی که در استفاده از سایر روابط همچون رابطه‌ی ۵ نیاز به اطلاع از گرادیان بخار آب روی

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

علائم یونانی

μ : گرانیوی دینامیکی، (kg/m.s)
 ρ : چگالی، (kg/m³)
 ϕ : رطوبت نسبی، (%)

زیرنویس

$cond$: چگالش
 dp : نقطه‌ی شبنم
 nc : غیر قابل چگالش
 $panel$: پانل سقفی
 tot : کل
 w : دیواره
 ∞ : جریان آزاد

فهرست علائم

c : غلظت گونه‌ی بخار آب، (kg/kg)
 c_p : ظرفیت حرارتی، (J/kg.k)
 $\bar{c}_p$: ظرفیت حرارتی مخلوط هوا و بخار آب، (J/kg.k)
 D_{12} : ضریب نفوذ گونه‌ی ۱ در ۲، (m²/s)
 m'' : شار جرمی، (mg/s.m²)
 T : دما، (°C)

پانویس‌ها

1. HVAC system
2. VAV system
3. sensible load
4. latent load
5. office rain
6. dedicated outdoor air system (DOAS)
7. diffusion
8. supply air
9. exhaust air
10. coupled solution
11. scale analysis
12. upwind
13. central
14. grid independency
15. curve fitting

منابع (References)

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*, **34**, pp. 497-509 (2002).
2. Alamdari, F., Butler, D.J.G., Grigg, P.F. and Shaw, M.R. "Chilled ceiling and displacement ventilation", *Renewable Energy*, **15**, pp. 300-305 (1998).
3. Antonopoulos, K.A., Vrachopoulos, M. and Tzivanidis, C. "Experimental evaluation of energy saving in air con-

ditioning using metal ceiling panels", *Applied Thermal Engineering*, **18**, pp. 1129-1138 (1998).

4. Catalina, T., Virgone, J. and Kuznik, F. "Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling", *Building and Environment*, **44**, pp. 1740-1750 (2009).
5. Stetiu, C., *Radiant Cooling in US Office Building: Towards Eliminating the Perception of Climate – Imposed Barriers*, Submitted to 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*, **38**, pp. 99-107 (2003).
7. Hirayama, Y. and Batty, W.J. "Dehumidifying chilled radiator system for hot and humid climates", *Energy and Building*, **30**, pp. 203-210 (1999).
8. Mumma, S.A. "Ceiling panel cooling systems", *ASHRAE Journal*, **43**, pp. 28-32 (November 2001).
9. Yin, Y., Zhang, X. and Chen, Q. "Condensation risk in a room with high latent load and chilled ceiling panel and with air supplied room liquid desiccant system", *HVAC & R Research*, **15**(2), pp. 315-327 (2009).
10. Yiang, L., Dhe, C. and Kang, Y. "Effect of vapor condensation on forced convection heat transfer of moistened gas", *Heat Mass Transfer*, **43**, pp. 677-686 (2007).
11. Rees, S.J., Mc Guirk, J.J. and Haves. P. "Numerical investigation of transient buoyant flow in a room with a

- displacement ventilation and chilled ceiling system", *International Journal of Heat and Mass transfer*, **44**, pp. 3067-3080 (2001).
12. Volchkov, E.P., Terekhov, V.V. and Terekhov, V.I. "A numerical study of boundary layer heat and mass transfer in a forced flow of humid air with surface steam condensation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, pp. 1473-1481 (2004).
13. Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, Wiley, Third Edition (2004).
14. Schetz, J.A., *Boundary Layer Analysis*, Prentice-Hall Inc. (1993).
15. Treybal, R.E., *Mass-Transfer Operations*, Mc Graw-Hill, Third Edition (1981).

DEVELOPING A NEW APPLICABLE CORRELATION TO ESTIMATE CONDENSATION RATE ON RADIANT CEILING COOLING PANELS

S.A. Hosseini

hosseini.mechanic@gmail.com

M. Maerefat(corresponding author)

marefat@modares.ac.ir

A. Zolfaghari

alireza.zolfaghari@yahoo.com

**Dept. of Mechanical Engineering
Tarbiat Modares University**

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 39-46, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 September 2011; received in revised form 24 June 2012; accepted 14 July 2012.

Abstract

Radiant ceiling cooling (RCC) systems have gradually attracted the attention of HVAC engineers because of the possibility of providing good thermal comfort conditions without the need for large energy consumption. It should be mentioned that the RCC systems are constructed from flat ceiling-mounted radiant panels with a high absorption coefficient. In these systems, the chilled water is passed through the cooper tubes and causes the panel temperature to decrease. Although the RCC systems have many advantages, like high thermal efficiency, by providing good thermal comfort conditions, the performance of these systems can be limited by the condensation of water vapor on the chilled ceiling. Therefore, radiant ceiling cooling systems may be impracticable in hot and humid climates.

The main aim of this study is to analysis the performance of the RCC systems at the vicinity of dew point temperature and under conditions wherein the risk of condensation is very high. For this purpose, the average value of condensation rate in a wide range of temperature and relative humidity has been numerically calculated by developing a CFD code for simulating heat and mass transfer over the chilled panel. The mentioned CFD code can solve four main governing equations; continuity, momentum, energy and concentration equations, by the finite-difference technique. Results indicate that air speed, dew point temperature and surface

temperature of the chilled panel are the most effective parameters to affect the condensation rate on the chilled panel. After finding these important parameters, a simple, non-differential correlation has been proposed by linear regression on the basis of the mentioned effective parameters. The correlation has been defined using the analogy between the heat and mass transfer phenomena. The correlation has been verified in two different ways. First, by comparing the dimensionless velocity profile inside the boundary layer with the similar analytical solution, and second, by comparing the results of the correlation with a mass transfer correlation proposed by Robert E. Treybal, in 1981. Both validations show very good agreement between the mentioned comparative results. Therefore, the mentioned simple correlation can be extensively utilized for designing a radiant ceiling cooling system under various climactic conditions.

Key Words: Radiant ceiling cooling, condensation, applicable correlation.