

پدیده نامطلوب سرمایش موضعی و تأثیر آن بر مصرف انرژی در سامانه‌های گرمایش از کف ساختمان

مهدی معرفت^{۱*}، امیر امیدوار^۲

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

۲- استادیار بخش مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شیراز

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Maerefat@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۶)

چکیده- در بسیاری از موارد ساکنان ساختمان در فصل زمستان از احساس سرمای موضعی در ناحیه مچ پا و پشت گردن شکایت دارند. در چنین شرایطی افراد برای غلبه بر احساس سرمای موضعی، دمای هوای اتاق را افزایش می‌دهند و این به معنای افزایش مصرف انرژی است. در ساختمانهای مسکونی با تهویه طبیعی، رخداد پدیده سرمایش موضعی به دلیل وجود پنجره‌ها و سطوح سرد در ساختمان است. سرعت متوسط و شدت اغتشاش جریان هوا، دو عامل عمده در ایجاد کوران یا سرمایش موضعی ناخواسته است. بیشتر نارضایتی‌های گزارش شده ناشی از پدیده سرمایش موضعی، در مواردی رخ داده که سرعت متوسط جریان نیز از حد مجاز تجاوز نکرده است. این بدین معنا است که شدت اغتشاش جریان هوا نیز نقش مؤثری در رخداد این پدیده دارد. لذا بررسی پدیده کوران یا سرمایش موضعی ناخواسته در سامانه‌های گرمایش از کف ساختمان نیز خالی از اهمیت نیست، هر چند در این موارد، سرعت متوسط جریان هوا ناچیز است. در این مقاله به بررسی اثر اندازه پنجره بر ایجاد نارضایتی حرارتی ناشی از پدیده سرمایش موضعی در ساختمانهایی که از سیستمهای گرمایش از کف استفاده می‌کنند، پرداخته شده است. بررسیها نشان می‌دهد که اگر چه اندازه پنجره بر گستردگی محدوده نارضایتی ایجاد شده به دلیل پدیده سرمایش موضعی، مؤثر است، اما این تأثیر به حدی نیست که میزان نارضایتی از مقادیر مجاز استاندارد فراتر رود. بنابراین تبعات نامطلوب ناشی از پدیده کوران یا سرمایش موضعی بر مصرف انرژی، در ساختمانهایی که از سامانه‌های گرمایش از کف استفاده می‌کنند چندان چشمگیر نیست. در پایان، محدوده ایجاد نارضایتی در نزدیکی پنجره در دو حالت گرمایش از کف و گرمایش به کمک پانلهای عمودی مقایسه شده است. بررسیها نشان داد که سیستمهای گرمایش کفی نسبت به پانلهای عمودی از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی عملکرد بهتری دارند.

کلید واژگان: گرمایش از کف، مصرف انرژی، آسایش حرارتی، کوران، سرمایش موضعی.

۱- مقدمه

آمارها نشان می‌دهد که بخش مهمی از مصرف انرژی سالیانه هر کشور، مربوط به بخش ساختمان است. بنابراین صرفه‌جویی در مصرف انرژی و یافتن روشها و راهکارهایی که بتواند مصرف انرژی سالیانه را در بخش ساختمان کاهش دهد از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. لازم است ذکر شود که مبحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان و بهینه‌سازی سامانه‌های تهویه مطبوع، با رهیافتهای کاهش انرژی در سایر عرصه‌ها کمی متفاوت است. این تفاوت از آنجا ناشی می‌شود که در مبحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان، فقط با سیستمهای مهارکننده انرژی و عملکرد آنها روبه‌رو نیستیم بلکه در کنار این موضوع، با جامعه‌ای انسانی سروکار داریم که مصرف‌کننده انرژی هستند. آنچه مسلم است این است که تمامی روشها و راهکارهای لازم برای بهینه‌سازی سامانه‌های تهویه مطبوع در ساختمان باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که شرایط آسایش حرارتی مطلوب را نیز برای ساکنان ساختمان فراهم سازد. در بسیاری از موارد، کاهش مصرف انرژی در ساختمان موجب برهم خوردن شرایط آسایش حرارتی می‌شود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که یافتن روشها و راهکارهایی عملی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان، مستلزم بررسی همزمان میزان مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی است.

حال که اهمیت بررسی شرایط آسایش حرارتی و نقش آن در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان روشن شد، باید به این سؤال پاسخ داد که شرایط آسایش حرارتی چیست و عوامل مؤثر بر آن کدامند؟ آنچه در بسیاری از موارد با عنوان شرایط آسایش حرارتی از آن یاد می‌شود؛ مانند دمای هوای 22°C ، رطوبت نسبی 50% و سرعت متوسط جریان هوا کمتر از 0.2 m/s و نظایر آن، نمی‌تواند معیار کاملی برای شرایط آسایش حرارتی باشد. برای معرفی شرایط آسایش

حرارتی استانداردهایی وجود دارد. استانداردهای آسایش حرارتی عبارتند از استاندارد بین‌المللی ایزو ۷۷۳۰، استاندارد اروپایی دین و دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا آشری. در این استانداردها سایر عوامل مؤثر بر آسایش حرارتی اعم بر عوامل شخصی مانند نوع فعالیت افراد، میزان پوشیدن لباس و عوامل محیطی نظیر دمای هوا، رطوبت هوا، دمای متوسط تابش و همچنین سرعت متوسط جریان هوا معرفی شده است. بسیار اتفاق می‌افتد که تمامی پارامترهای معمول برای آسایش حرارتی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و مانند آن در حد مطلوب و استاندارد است اما ساکنان ساختمان از نارضایتی حرارتی در برخی از نقاط بدن خود شکایت دارند. عوامل زیادی باعث نارضایتی حرارتی می‌شوند. برخی از این عوامل مربوط به نحوه انتقال حرارت تابشی بین بدن و دیوارها و سطوح جانبی اتاق است مانند پدیده تابش نامتقارن^۱. برخی از عوامل نارضایتی حرارتی ریشه در جابه‌جایی گرما دارند. یکی از مهمترین این عوامل احساس سرمای موضعی در بدن به دلیل ورزش است. این عامل اغلب با نام کوران^۲ یا سرمایش موضعی ناخواسته معرفی می‌شود [۱]. این پدیده در بیشتر ساختمانها و وسایط نقلیه رخ می‌دهد. حسگرهای دمای بدن به تغییرات دمای پوست به‌شدت حساسیت نشان می‌دهند. میچ پا و ناحیه پشت گردن نسبت به ورزش هوا در مقایسه با سایر نقاط بدن حساسیت بیشتری دارند. به‌همین علت جریانهای ورزشی ناشی از جابه‌جایی حرارتی در این دو نقطه از بدن محسوس‌تر است [۱].

کوران اثر سرمایشی ایجاد می‌کند و این احساس سرمای موضعی، تابع اختلاف دما بین هوا و پوست بدن، سرعت متوسط هوا و شدت اغتشاش^۳ جریان هوا است. منظور از شدت اغتشاش، نسبت انحراف استاندارد سرعت

1. Asymmetric Radiation
2. Draught
3. Turbulence Intensity

اغتشاشی به سرعت میانگین جریان است. در ساختمانهایی که تهویه طبیعی دارند، سرمایش موضعی معمولاً به دلیل وجود پنجره به عنوان سطح سرد یا نفوذ هوا از درزهای در و پنجره رخ می دهد. در ساختمانهایی که تهویه مکانیکی دارند، سرمایش موضعی باعث اثر نامطلوب در آسایش حرارتی و به تبع آن افزایش مصرف انرژی می شود. در فصل زمستان افراد برای مقابله با پدیده سرمایش موضعی ناخواسته تمایل دارند دمای هوای اتاق را افزایش دهند. به بیان دیگر اثر ممتومی جریان را به کمک افزایش دمای جریان هوا جبران می کنند. این باعث افزایش مصرف انرژی در ساختمان می شود.

درصد ناراضایتی افراد و ساکنان اتاق بر اثر احساس پدیده سرمای موضعی بستگی دارد به دمای هوا، سرعت و شدت اغتشاش جریان هوا. افزایش سرعت و شدت اغتشاش جریان هوای داخل اتاق باعث افزایش درصد ناراضایتی ساکنان می شود. با افزایش دمای هوا، میزان ناراضایتی را کاهش می دهد (رابطه ۱۵). بدین ترتیب تنها راه غلبه بر احساس سرمای موضعی، افزایش نسبی دمای هوا است. با افزایش دمای اتاق، گرادیان دمای داخل و خارج ساختمان افزایش یافته و به تبع آن تلفات حرارتی ساختمان بیشتر می شود که این باعث افزایش مصرف انرژی ساختمان در فصل سرما می شود.

همانطور که پیشتر اشاره شد، ساختار حرارتی ساختمان نقش مؤثری در ایجاد کوران دارد. به عنوان مثال در بسیاری از موارد وجود پنجره یا دیوارهای خارجی و عملکرد آن به عنوان سطح سرد می تواند در فصل سرما باعث ایجاد سرمایش موضعی ناخواسته شود. اما علاوه بر ساختار حرارتی ساختمان، نوع سامانه گرمایشی به کار رفته نیز در ایجاد سرمایش موضعی ناخواسته بی تأثیر نیست. یکی از سیستمهای گرم کننده ساختمان، خانواده سیستمهای گرمایش

از کف است. عملکرد این سیستمها بر جابه جایی و تابش استوار است. به دلیل اینکه گرادیان دما و نیروی شناوری هم جهت هستند، فرایند گرمایش به کمک جابه جایی راحت تر انجام می شود. آن بخش از انتقال حرارت مبتنی بر تابش، باعث از بین رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل اتاق می شود. به همین علت پدیده تابش نامتقارن یعنی یکی از عوامل ناراضایتی حرارتی در این گونه سیستمها، بسیار ضعیف است. امکان ایجاد شرایط آسایش حرارتی مطلوب در کنار مصرف بهینه انرژی باعث شده که سیستمهای گرمایش از کف امروز بیشتر از سایر سیستمها مورد توجه قرار گیرند. سیستمهای گرمایش از کف به دو صورت الکتریکی و هیدرونیکی وجود دارند. در انواع الکتریکی، از المانهای الکتریکی برای تولید گرما در ناحیه کف اتاق استفاده می شود. اما در سیستمهای هیدرونیکی از جریان آب گرم در لوله هایی با آرایش خاص در کف ساختمان استفاده می شود. پایین بودن دمای کارکرد سیال عامل، امکان استفاده همزمان و به صورت ترکیبی با پمپهای حرارتی و امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین آب گرم مورد نیاز، از جمله خصوصیات مثبتی است که سیستمهای گرمایش از کف هیدرونیکی را از سایر سیستمها متمایز ساخته است.

در مورد سیستمهای گرمایش از کف تحقیقات نسبتاً زیادی انجام شده است. اولسن^۱ و بیجارن^۲ در سال ۱۹۹۴ به مقایسه سیستمهای گرمایش از کف و پانلهای حرارت دیواری پرداختند [۲]. آنها دریافتند که هر دوی این سیستمها می توانند شرایط آسایش حرارتی را در داخل ساختمان به خوبی فراهم سازند. چن^۳ در سال ۱۹۹۸ با استفاده از نوعی مدل سه بعدی اختلاف محدود، اثر پوشش کف بر توزیع دمای کف و میزان مصرف انرژی

1. Olesen
2. Bjarne
3. Chen

در سیستمهای الکتریکی گرمایش از کف را بررسی کرد [۳]. وی معتقد است که استفاده از فرش، مصرف انرژی را در این گونه سیستمها تقریباً ۹٪ افزایش می‌دهد. هاروا^۱ و هانیبوجی^۲ در سال ۱۹۹۸ در مقاله‌ای به بررسی نحوه عملکرد سیستمهای گرمایش از کف پرداخته‌اند [۴]. طبق نظر آنها ابتدا سطوح داخلی اتاق با دریافت تابش از کف گرم می‌شوند، سپس سازوکار جابه‌جایی باعث مبادله حرارت بین هوا و سطوح داخلی اتاق می‌شود. مکانیزم تابش به‌طور مستقیم بر هوای اتاق اثری ندارد و فقط می‌تواند اختلاف دمای بین سطوح داخلی اتاق را کاهش دهد. یو^۳ و هویلی^۴ در سال ۲۰۰۱ در مقاله‌ای سیستمهای گرمایش از کف تابشی را با رادیاتورهای معمولی از نظر اقتصادی، به روش تحلیل اکسرژی بررسی و مقایسه کردند که نتایج، از اقتصادی‌تر بودن سیستمهای گرمایش از کف حکایت دارد [۵]. همچنین اولسن و بجارن در سال ۲۰۰۲ در زمینه کنترل دمای سیستمهای گرمایش از کف تحقیقاتی را انجام دادند [۶]. علی‌رغم بررسیهای کاملی که درباره عملکرد سیستمهای گرمایش از کف - اعم بر الکتریکی و - هیدرونیک انجام شده، در مورد پدیده کوران یا سرمایش موضعی ناخواسته در این گونه سیستمها کار زیادی انجام نشده است. در ابتدا شاید به‌نظر برسد که در سامانه‌های گرمایش از کف، سرعت جریان هوا به‌حدی نیست که از مقادیر پیشنهاد شده در استانداردها تجاوز کند. تحقیقات انجام شده توسط ملیکف^۵ از این حقیقت حکایت دارد که در بسیاری از موارد، سرمایش موضعی در سرعتهای میانگین کمتر از آنچه در استانداردها پیشنهاد شده رخ می‌دهد [۱]. این

بدان علت است که در سرعتهای میانگین کمتر، شدت اغتشاش جریان هوا معمولاً بیشتر است. در سامانه‌های گرمایش از کف، اغتشاشات ایجاد شده در جریان هوا در نزدیکی کف اتاق محسوس‌تر است. ایجاد این اغتشاشات به‌دلیل وجود پنجره‌ها است. جریان هوا در نزدیکی پنجره‌ها که معمولاً دمای کمتری دارند به‌سمت پایین است. جریان هوای به‌سمت پایین با هوای گرم شده در مجاورت کف اتاق تداخل کرده و در این ناحیه شدت اغتشاش افزایش می‌یابد. توجه به این نکته لازم است که در سامانه‌های گرمایش از کف، بیشینه شدت اغتشاش در ناحیه‌ای رخ می‌دهد که میچ و ساق پای افراد در این ناحیه قرار دارد یعنی تقریباً در ۰/۱ متر بالای کف اتاق. میچ و ساق پا در مقابل سرما حساس است به‌طوری‌که هر گونه احساس سرمای موضعی در این ناحیه باعث ایجاد احساس سرمای کلی در بدن می‌شود [۱]. بنابراین لازم است که امکان رخداد پدیده سرمایش موضعی در این سیستمها مورد مطالعه قرار گیرد. از آنجاکه در سامانه‌های گرمایش از کف، عامل ایجاد اغتشاش در جریان هوای اتاق وجود پنجره‌ها است، در این مقاله تأثیر اندازه پنجره بر ایجاد نارضایتی حرارتی ناشی از پدیده کوران، بررسی شده و با سیستمهای گرمایشی به‌کمک پانلهای گرم‌کننده عمودی مقایسه شده است. نتایج این تحقیق برای طراحان ساختمان، معماران و مهندسان تأسیسات اهمیت دارد.

۲- معادلات حاکم و مدل‌های ریاضی

به‌منظور بررسی پدیده سرمایش موضعی در ساختمانهایی که از سامانه‌های گرمایش کفی استفاده می‌کنند، لازم است سرعت متوسط جریان هوا، دمای هوا و شدت اغتشاش در اتاق مشخص شود. برای شناسایی و تعیین پارامترهای مذکور لازم است

1. Haruo
2. Hanibuchi
3. Yu
4. Huili
5. Melikov

معادلات میدانی جریان اعم بر معادله پیوستگی، معادلات ممتم در جهتهای x ، y و z و همچنین معادله بقای انرژی به طور هم زمان حل شوند. بنابراین معادلات حاکم را در حالت کلی می توان به صورت معادلات (۱) تا (۵) بیان کرد [۱]:
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

معادله ممتم در جهت x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \\ & \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right) \\ & + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'u'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (2)$$

معادله ممتم در جهت y :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right) \\ & + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'u'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{u'w'}) \\ & - g(1-\beta(T-T_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

معادله ممتم در جهت z :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \\ & \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right) \\ & + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'u'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uT) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vT) + \\ & \frac{\partial}{\partial z}(\rho wT) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial y}\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'T'}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'T'}) \end{aligned} \quad (5)$$

در این معادلات u ، v و w به ترتیب مؤلفه های متوسط زمانی سرعت در جهتهای x ، y ، z بوده و T متوسط زمانی دمای هوا است. لازم است دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی به دست آمده به طور هم زمان حل شود و برای حل معادلات فوق شرایط مرزی لازم است تعیین شود. با توجه به شرط عدم لغزش، سرعت بر روی سایر سطوح داخلی اتاق صفر است. گرادیان فشار نیز بر روی تمامی دیوارها صفر در نظر گرفته می شود. با توجه به این نکته که در سیستمهای گرمایش از کف با هر سه نوع انتقال حرارت هدایت، جابه جایی و تابش به طور هم زمان روبه رو هستیم، لذا به منظور یافتن شرط مرزی حرارتی مناسب برای حل معادلات میدانی جریان، لازم است معادلات موازنه انرژی

انجام می‌شود و در این جابه‌جایی ضریب انتقال حرارتی به دما وابسته است، لذا h_{in} از (۹) به‌دست می‌آید [۸]:

$$h_i = n \times (T_i - T_{air})^{1/4} \quad (9)$$

n برای سطوح افقی برابر $1/52$ و برای سطوح عمودی برابر $1/31$ است. لازم است ذکر شود که در این رابطه، h بر حسب (W/m^2K) به‌دست می‌آید.

با حل همزمان معادلات [۶-۸]، شرایط مرزی مناسب برای معادله انرژی به‌دست می‌آید.

برای بررسی شرایط آسایش حرارتی کلی از مدل فنگر^۱ استفاده شده است. فنگر معادله تعادل گرما را در بدن انسان به‌صورت تابع زیر توصیف می‌کند [۱ و ۹].

$$f(M, W, I_{cl}, t_a, t_{mrt}, v, P_a) = 0 \quad (10)$$

M متابولیک، W کار، I_{cl} میزان مقاومت حرارتی لباس، t_a دمای هوا، t_{mrt} دمای میانگین تابش، v سرعت جریان هوا و P_a فشار جزئی بخار آب موجود در هوا است که با پارامتر رطوبت نسبی به‌طور مستقیم در ارتباط است. تابع f عبارتی را برای آسایش حرارتی نشان می‌دهد که شامل سه پارامتر شخصی M و W و I_{cl} و چهار پارامتر محیطی t_a و t_{mrt} و v و P_a است. رابطه معروف فنگر عبارت است از [۱]:

$$\begin{aligned} PMV = & \left(0.33e^{-0.33M} + 0.028 \right) \\ & \left((M - W) - 3.05 \times 10^{-7} \times (5733 \right. \\ & - 6.99(M - W) - P_a) - 0.42((M \\ & - W) - 58/15) - 1/7 \times 10^{-5} \times M \\ & (5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) \\ & - 3/96 \times 10^{-8} \times f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 \\ & - (t_{mer} + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) \end{aligned} \quad (11)$$

که

برای هر یک از سطوح جانبی اتاق نوشته شود [۴]. بنابراین معادلات حاکم بر فضای بسته اتاقی را که با سیستم گرمایش از کف گرم می‌شود می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۷]:

$$h_{in}A_i(T_{air} - T_i) + \varepsilon(\sigma A_i) \times \left\{ \sum_{j=1}^n F_{ij}(T_j^t - T_i^t) \right\} = \frac{(T_i - T_o)A_i}{(R_{wi} + \frac{1}{h_e})} \quad (6)$$

h_{in} و h_e به‌ترتیب ضریب جابه‌جایی حرارت در داخل و خارج اتاق، A مساحت دیوار، ε ضریب صدور سطح، F_{ij} ضریب دید و T_o دمای هوای خارج است. و $R_w = \frac{L}{k}$ که L ضخامت و k ضریب هدایت حرارتی سطح مورد نظر است. شاخص i در (۶) نمایانگر سطحی است که معادله برای آن نوشته می‌شود. برای سطحی از اتاق که منبع حرارتی در آن قرار دارد، معادله (۶) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$h_{in}A_i(T_{air} - T_i) + \varepsilon(\sigma A_i) \times \left\{ \sum_{j=1}^n F_{ij}(T_j^t - T_i^t) \right\} + Q = 0 \quad (7)$$

Q حرارت تولید شده توسط سیستم گرمایشی است. موازنه انرژی برای هوای داخل اتاق به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n h_i A_i (T_i - T_{air}) = \dot{m}_{inf} \times C_{p,air} (T_{air} - T_{inf}) \quad (8)$$

T_{inf} دمای هوای نفوذی به اتاق است که معمولاً با دمای محیط خارج برابر است. با توجه به اینکه مبادله انرژی بین سطوح داخلی و هوا از طریق جابه‌جایی آزاد

PD درصد نارضایتی، t_a دمای هوا ($^{\circ}C$)، $\bar{v}$ سرعت متوسط جریان هوا (m/s) و TI درصد شدت اغتشاش است. بر طبق استاندارد ایزو، $PD < 10\%$ به عنوان محدوده آسایش حرارتی معرفی شده است. ملیکف و همکاران نیز به منظور پیش‌بینی درصد نارضایتی ناشی از پدیده سرمایش موضعی، نمودارهایی را ارائه کرده‌اند که به کمک آنها می‌توان شدت اغتشاش جریان را به یک سرعت متوسط معادل تبدیل کرده و از این سرعت متوسط معادل در مدل آسایش حرارتی فنگر استفاده کرد [۱].

۳- روش حل عددی

با توجه به اینکه برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی و تحلیل رخداد پدیده سرمایش موضعی لازم است دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی بیان شده در بخش قبل، بطور همزمان حل شود، به ناچار برای حل معادلات باید از روشهای عددی مناسبی استفاده شود. برای حل معادلات میدانی جریان اعم بر پیوستگی، ممتم و انرژی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. اما همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد برای تعیین شرایط مرزی حاکم بر مسأله لازم است معادلات انتقال حرارت چندگانه بر روی سایر سطوح داخلی اتاق نوشته و حل شوند. بدین منظور از برنامه کامپیوتری فترن استفاده شده است. در این برنامه معادلات غیرخطی ناشی از انتقال حرارت تابش در داخل محیط بسته^۲ به روش تکرار حل می‌شوند. در حل دستگاه معادلات غیرخطی مذکور از ضریب زیر تخفیف استفاده شده است. در حل معادلات انتقال حرارت چندگانه اغلب استفاده از ضریب زیر تخفیف بین ۰/۲ تا ۰/۶ مفید واقع می‌شود. پس از تعیین شرایط مرزی، معادلات میدانی جریان به کمک نرم‌افزار فلوئنت حل می‌شوند. در نهایت لازم است برای تحلیل آسایش حرارتی، داده‌های به دست آمده از فلوئنت

$$t_{cl} = 35/5 - 0.28(M - W) - 0.155I_{cl} \\ (3/96 \times 10^{-8} \times f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)) \quad (12)$$

و

$$t_{mrt} = t_1 F_{p-1} + t_2 F_{p-2} + \dots + t_N F_{p-N} \quad (13)$$

عبارتهای F_{p-1} تا F_{p-N} ضرایب دید بدن انسان با هر یک از سطوح جانبی است. این مقادیر با توجه به موقعیت اشخاص در اتاق و وضعیت افراد اعم بر اینکه نشسته یا ایستاده‌اند، قابل محاسبه است.

f_{cl} ضریب لباس بر حسب I_{cl} به صورت زیر بیان می‌شود [۱].

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0.2I_{cl} : I_{cl} < 0.5Clo \\ 1/0.5 + 0.1I_{cl} : I_{cl} > 0.5Clo \end{cases} \quad (14)$$

مقاومت حرارتی لباس معمولاً بر حسب واحد clo بیان می‌شود: $1 clo = 0.155 (m^2 K / W)$.

معادلات فنگر در حالتی که فعالیت افراد اندک است جوابهای خوبی را نسبت به آزمایشهای تجربی ارائه می‌کند. اما وقتی فعالیت افراد زیاد باشد، استفاده از این معادلات با خطا همراه است [۹]. منظور از PMV میانگین احساس حرارتی افراد از شرایط محیط است. مطابق استانداردهای آسایش حرارتی، محدوده $-0.5 < PMV < +0.5$ محدوده قابل قبول برای آسایش حرارتی است. همچنین فنگر و همکاران درصد نارضایتی ناشی از وزش در ناحیه سر و گردن را به کمک رابطه (۱۵) بیان کرده‌اند [۱]:

$$PD = (34 - t_a)(\bar{v} - 0.05)^{0.7233} (3/314 + 0.3696 \bar{v} TI) \quad (15)$$

1. Predicted mean Vote

2. Enclosure

به برنامه نوشته شده به منظور پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی منتقل و تحلیل شوند. در گسسته‌سازی معادلات ممنتم و انرژی، از رهیافت کوئیک^۱ استفاده شده است. برای حل هم‌زمان دستگاه معادلات گسسته‌سازی شده، الگوریتم سیمپل به کار رفته است. در حل معادلات از مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. از آنجاکه استانداردهای آسایش حرارتی، محدوده‌ای را به عنوان شرایط قابل قبول برای آسایش حرارتی معرفی می‌کنند، تمامی مقادیر PMV که در محدوده مذکور قرار می‌گیرند قابل قبول بوده و معتبرند. بنابراین تغییرات اندک شدت اغتشاش ناشی از تغییر مدل‌های اغتشاشی، تغییرات اندکی را در مقادیر PMV ایجاد می‌کند که باعث خروج آن از محدوده‌های آسایش نمی‌شود. بنابراین در مدلسازی آسایش حرارتی، مقادیر بسیار دقیق شدت اغتشاش مدنظر نیست؛ لذا انتخاب نوع مدل اغتشاشی برای کاربرد موردنظر این مقاله - یعنی پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی - چندان حائز اهمیت نیست. نکته دیگری که در حل عددی معادلات باید به آن توجه داشت، استقلال جوابها از اندازه شبکه محاسباتی است. در این بررسیها از عدم وابستگی جوابها به اندازه شبکه اطمینان حاصل شده است.

۴- اعتبار و صحت مدل‌های ریاضی و روشهای حل عددی

قبل از اینکه به بررسی اثر اندازه پنجره بر رخداد پدیده سرمایش موضعی و تأثیر آن بر عملکرد سیستمهای گرمایش از کف پردازیم، لازم است از اعتبار ساختارهای ریاضی طراحی شده، اطمینان حاصل کنیم. بیانچی^۲ و همکاران در پژوهشی به بررسی انواع سیستمهای گرمایش تابشی از نظر مصرف انرژی پرداخته‌اند [۱۰]. آنها در بخشی از کارشان، پانلهای حرارتی تابشی در سقف و کف

ساختمان را از نظر مصرف انرژی مقایسه کردند. نتایج گزارش شده حاکی از آن است که در شرایط آسایش حرارتی یکسان، مصرف انرژی در ساختمانهایی که از پانلهای گرمایش تابشی سقفی استفاده می‌کنند ۳٪ بیشتر از ساختمانهایی است که با پانلهای کفی گرم می‌شوند.

با استفاده از مدلها و ساختارهای ریاضی بیان شده در این مقاله، سیستمهای گرمایش سقفی و کفی مقایسه شده است. برای بررسی سیستمهای گرمایش تابشی کفی و سقفی، مدل‌های فوق برای اتاق مکعب شکلی به ابعاد ۳ متر به کار گرفته شد. همچنین فرض شد که به جز دیوار شامل پنجره و سقف اتاق، سایر سطوح جدار داخلی هستند. دمای هوای بیرون اتاق 5°C و دمای هوای نفوذی به اتاق صفر درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در خارج از اتاق برابر $50 (W/m^2K)$ و ضریب صدور تابشی تمامی سطوح برابر 0.9 در نظر گرفته شده است. در تمامی موارد، شرایط آسایش حرارتی برای فرد در حالت استراحت و نشسته بر روی صندلی با لباس معمولی (1 Clo) در محیطی با رطوبت نسبی ۵۰٪ محاسبه شده است. تمامی محاسبات برای دو عایق حرارتی متفاوت با $(R = 1/5 m^2K/W)$ و $(R = 3 m^2K/W)$ ، برای سطوح جانبی ساختمان انجام شد. بررسیها نشان داد که در شرایط آسایش حرارتی مشابه، استفاده از سیستمهای گرمایش سقفی بسته به میزان عایقکاری حرارتی سطوح جانبی ساختمان، مصرف انرژی را ۲ تا ۳ درصد افزایش می‌دهد. این نتایج با آنچه در [۱۰] آمده، مطابقت خوبی دارد.

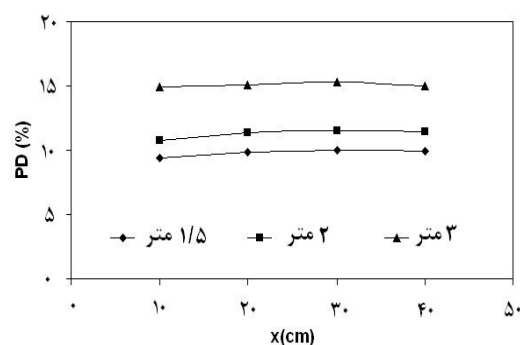
۵- پدیده سرمایش موضعی و تأثیر آن بر مصرف انرژی در سامانه‌های گرمایش از کف

در سامانه‌های گرمایش از کف ساختمان، هوای مجاور پنجره‌ها که معمولاً نسبت به سایر سطوح جانبی ساختمان دمای کمتری

1. Quick
2. Bianchi

در شکل ۲ دو ناحیه $PD = 10\%$ و $PD = 15\%$ نشان داده شده است. بر طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰، درصد نارضایتی کمتر از 10% به عنوان ناحیه مطلوب از نظر آسایش حرارتی معرفی شده است. اما دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا (آشری) نارضایتی کمتر از 15% را مجاز می‌داند [۱]. به همین دلیل این دو ناحیه با خطوط افقی پر رنگ در شکل مشخص شدند. همانطور که ملاحظه می‌شود وقتی ارتفاع پنجره $1/5$ متر است؛ درصد نارضایتی از 10% بیشتر نمی‌شود. بنابراین در این حالت، پدیده سرمایش موضعی ظاهر نمی‌شود. در حالتی که ارتفاع پنجره 2 متر است، حتی تا فاصله 1 متری پنجره نیز درصد نارضایتی بالای 10% خواهد بود. سایر نقاط بیشتر است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در شکل ۲، میزان نارضایتی حرارتی بر حسب فاصله از دیوار شامل پنجره، برای پنجره‌هایی با ارتفاع $1/5$ ، 2 و 3 متر ترسیم شده است.

در شکل ۲ دو ناحیه $PD = 10\%$ و $PD = 15\%$ نشان داده شده است. بر طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰، درصد نارضایتی کمتر از 10% به عنوان ناحیه مطلوب از نظر آسایش حرارتی معرفی شده است. اما دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا (آشری) نارضایتی کمتر از 15% را مجاز می‌داند [۱].

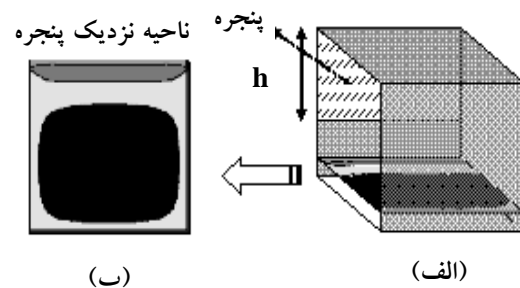


شکل ۲ تغییرات درصد نارضایتی بر حسب فاصله از پنجره (x)، با توجه به تغییرات اندازه ارتفاع پنجره (h)

دارند سرد شده و به سمت پایین و کف اتاق حرکت می‌کند. این جریان هوای رو به پایین در نزدیکی کف با جریان هوای گرم شده در مجاورت کف اتاق تداخل کرده و باعث افزایش شدت اغتشاش جریان هوا در این ناحیه می‌شود.

به منظور بررسی نقش پنجره و اندازه آن بر احتمال رخداد کوران و به تبع آن افزایش مصرف انرژی، درصد نارضایتی حرارتی در صفحه‌ای به فاصله $0/1$ متر از کف اتاق بررسی شده است. بیشتر نارضایتی‌های گزارش شده ناشی از سرمایش موضعی در ناحیه میچ پا یعنی در $0/1$ متری بالای کف اتاق بوده و به همین دلیل بررسیها در این ناحیه انجام شده است.

در شکل ۱ نمایی از اتاق موردنظر و تغییرات درصد نارضایتی ایجاد شده در $0/1$ متری بالای کف ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در نوار باریکی در نزدیکی پنجره، نارضایتی حرارتی از سایر نقاط بیشتر است. ناحیه تیره رنگ میانی نیز ناحیه‌ای است که در آن اثر سرمایشی ناشی از پنجره نامحسوس است.



شکل ۱ - (الف) نمایی کلی از اتاق و پنجره، (ب) تغییرات درصد نارضایتی به دلیل کوران در صفحه‌ای به فاصله $0/1$ متر بالای کف اتاق

برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در شکل ۲، میزان نارضایتی حرارتی بر حسب فاصله از دیوار شامل پنجره، برای پنجره‌هایی با ارتفاع $1/5$ ، 2 و 3 متر، ترسیم شده است.

به همین دلیل این دو ناحیه با خطوط افقی پر رنگ در شکل مشخص شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود وقتی ارتفاع پنجره ۱/۵ متر است؛ درصد نارضایتی از ۱۰٪ بیشتر نمی‌شود. بنابراین در این حالت، پدیده سرمایش موضعی ظاهر نمی‌شود. در حالتی که ارتفاع پنجره ۲ متر است، حتی تا فاصله ۱ متری از پنجره نیز درصد نارضایتی بالای ۱۰٪ خواهد بود. لذا بر طبق استاندارد ایزو، نارضایتی حرارتی ایجاد شده بر اثر پدیده سرمایش موضعی در ناحیه میچ پا، خارج از حد استاندارد است. این در حالی است که دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا، این حالت را کاملاً قابل قبول می‌داند. وقتی ارتفاع پنجره به ۳ متر می‌رسد، یعنی پنجره تمام قاب یا دیوار شیشه‌ای، در فاصله تقریباً ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتری از پنجره، نارضایتی حرارتی کمی از ۱۵٪ نیز بیشتر می‌شود. اما این تجاوز از استاندارد چندان چشمگیر نیست. از آنجاکه استاندارد اروپایی دین نارضایتی حرارتی کمتر از ۲۰٪ را به عنوان معیار آسایش حرارتی معرفی می‌کند، به نظر می‌رسد که در حالت پنجره تمام قاب نیز این انحراف اندک از استاندارد، چندان مشکل ساز نیست. اگر دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا را به عنوان معیاری منطقی برای درصد نارضایتی قبول کنیم، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تبعات نامطلوب ناشی از پدیده کوران یا سرمایش موضعی در ساختمانهایی که از سامانه‌های گرمایش از کف استفاده می‌کنند، چندان چشمگیر نیست. علاوه بر سایر مزیت‌هایی که برای سامانه‌های گرمایش از کف بیان شد - مانند پایین بودن دمای کارکرد سیال عامل و کاهش پدیده نامطلوب تابش نامتقارن - می‌توان گفت که در این گونه سیستمها به دلیل کنترل وزش

می‌توان از پدیده سرمایش موضعی در ناحیه میچ پای افراد جلوگیری و به تبع آن از افزایش مصرف انرژی ممانعت کرد. در ادامه لازم است پدیده سرمایش موضعی در سیستمهای گرمایش کفی و پانلهای گرمایش عمودی مقایسه شود. در این حالت فرض شده که تمام گرمای لازم به منظور تأمین بار حرارتی اتاق از طریق یک صفحه عمودی گرم شده واقع در پایین پنجره، به اتاق وارد می‌شود. در این حالت ارتفاع پنجره ۲ متر در نظر گرفته شده است. سایر شرایط مانند حالت قبل فرض شده است. تنها تفاوتی که در این حالت با حالت گرمایش از کف وجود دارد این است که در گرمایش عمودی، جریان هوای سرد مجاور پنجره با جریان هوای گرم نزدیک صفحه گرم‌کننده در ۱ متری بالای کف اتاق تداخل می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که بیشینه شدت اغتشاش در گرمایش به کمک صفحات عمودی در فاصله ۱ متری از کف رخ دهد. لذا در این حالت لازم است که احتمال رخداد سرمایش موضعی در این ناحیه بررسی شود.

در شکل ۳ نارضایتی ناشی از پدیده کوران یا سرمایش موضعی در دو حالت گرمایش از کف و گرمایش به کمک صفحات گرم عمودی رسم شده است.

در حالت گرمایش از کف بر طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰، کمی انحراف از حالت استاندارد دیده می‌شود، اما بر طبق دستورالعمل مهندسان تأسیسات امریکا تمامی، نقاط نمودار در ناحیه قابل قبول قرار گرفته‌اند. در حالت گرمایش به کمک صفحات عمودی، تا فاصله ۵۰ سانتیمتری پنجره، اثر کوران محسوس است. افرادی که در این ناحیه قرار دارند از احساس وزش در ناحیه پشت سر شکایت دارند.

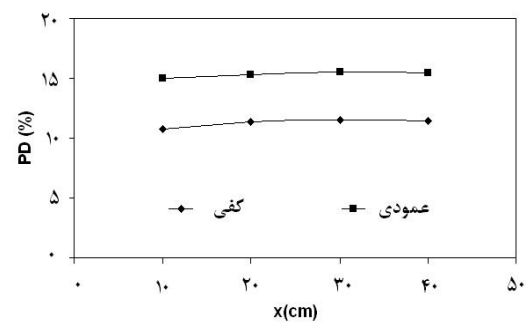
سرمایش موضعی را نادیده گرفت. در بیشتر موارد نارضایتی‌های ناشی از سرمایش موضعی در سرعت‌های بسیار کمتری از آنچه استانداردها مجاز می‌دانند رخ می‌دهد. این به دلیل شدت اغتشاش جریان هوا است. در ساختمانهای مسکونی پنجره‌ها به صورت سطح سرد عمل کرده و هوای مجاور خود را سرد می‌کنند. هوای سرد شده در نزدیکی پنجره به سمت پایین حرکت می‌کند. جریان هوای سرد در حرکت به سمت پایین با جریان هوای گرم در نزدیکی کف اتاق تداخل کرده، شدت اغتشاش را در این ناحیه افزایش می‌دهد. همانطور که گفته شد، شدت اغتشاش یکی از عوامل مؤثر در ایجاد سرمایش موضعی است.

۲- بررسیهای انجام شده بر روی سامانه‌های گرمایش از کف نشان داد که اگرچه اندازه پنجره بر گستردگی حریم نارضایتی ایجاد شده به دلیل پدیده سرمایش موضعی مؤثر است، اما این تأثیر به حدی نیست که میزان نارضایتی از مقادیر مجاز فراتر رود. بنابراین تبعات نامطلوب ناشی از پدیده سرمایش موضعی در ساختمانهایی که از سامانه‌های گرمایش از کف استفاده می‌کنند چندان چشمگیر نیست.

۳- در مواردی که معماران و طراحان ساختمان به منظور دستیابی به چشم‌انداز بهتر، علاقمند به استفاده از پنجره‌های تمام قاب یا دیوار خارجی کاملاً شیشه‌ای هستند؛ می‌توان با استفاده از سامانه‌های گرمایش از کف، اثر نامطلوب سرمایش موضعی را کاهش داد.

۴- بررسیها نشان داد که امکان رخداد پدیده سرمایش موضعی در نزدیکی پنجره، در حالت گرمایش به کمک پانلهای گرمایش عمودی نسبت به حالت گرمایش کفی بیشتر است.

در ساختمانهایی که از کف گرم می‌شوند، به دلیل کنترل پدیده سرمایش موضعی، مصرف انرژی نسبت به سایر ساختمانها کمتر است.



شکل ۳ مقایسه حریم نارضایتی ایجاد شده در نزدیکی پنجره به دلیل کوران، در دو حالت گرمایش از کف و گرمایش به کمک پانلهای عمودی. در هر دو حالت ارتفاع پنجره ۲ متر در نظر گرفته شده است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

پدیده سرمایش موضعی یکی از عوامل عمده ایجاد نارضایتی حرارتی در ساکنان ساختمان است. در بسیاری از ساختمانها افراد فقط در ناحیه میج یا پشت گردن به علت وزش هوا، احساس سرما می‌کنند. این احساس سرمای موضعی در بدن اغلب باعث می‌شود که افراد دمای هوای اتاق را افزایش دهند و این باعث افزایش مصرف انرژی در ساختمان می‌شود. بنابراین کنترل پدیده سرمایش موضعی و عوامل مؤثر بر آن در طراحی سیستمهای گرمایشی نقش مؤثری را ایفا می‌کند. در ساختمانهای مسکونی با تهویه طبیعی، رخداد سرمایش موضعی ناشی از وجود پنجره‌ها است. به همین علت در این مقاله به بررسی تأثیر اندازه پنجره بر رخداد سرمایش موضعی پرداخته شده است. به طور کلی نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان در موارد مهم زیر خلاصه کرد:

۱- در سامانه‌های گرمایش از کف ساختمان، اگر چه سرعت جریان هوا در داخل اتاق چندان محسوس نیست، اما نمی‌توان به علت کم بودن سرعت جریان هوا، نقش

۷- منابع

- [5] Yu, Huili, Economic analysis of low temperature radiant floor heating system, proceeding of the international conference on energy conversion and applications (ICECA2001), 989-992.
- [6] Olesen, Bjarne W; Radiant floor heating in theory and practice, ASHRAE journal, v44, n7, (July 2002), 19-26.
- [7] Richard D. Watson, Kirby S. Chapman; Radiant heating and cooling handbook, McGraw-Hill, (2001).
- [8] J. P. Holman, Heat transfer, 8'th ed, McGraw-Hill, (1997).
- [9] P. O. Fanger; Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering, McGraw-Hill, (1970).
- [10] Laszlo J. Banhidi; Radiant heating systems, design and applications, Pergamon Press, London, (1991).
- [1] H. B. Awbi, Ventilation of Buildings, E & FN Spon, London, (1998).
- [2] Olesen, B. W. Comparative experimental study of performance of radiant floor heating systems and wall panel heating systems under dynamic conditions, ASHRAE Transactions, v100, n1, (1994), 1011-1023.
- [3] Chen. Y. Andreas K. Athenitist; A three-dimensional numerical investigation of the effect of cover materials on heat transfer in floor heating systems, ASHRAE Transactions, v104, n2, (1998), 1350-1355.
- [4] Hanibuchi, haruo; Basic study of radiative and convective heat exchange in a room with floor heating, ASHRAE Transactions, v104, n Pt 1 B, SF-98-9-3, (1998), 1098-1105.