

ارزیابی عملکرد سیستم‌های گرمایش کفی، با توجه به سبک زندگی رایج در کشورهای شرقی

سیدعلیرضا ذوالفقاری (دانشجوی فوادکنتری)

مهدی معرفت (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

امیر امیدوار (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شبراز

سیستم‌های گرمایش کفی بر مبنای ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای ساکنان بیدار و نشسته روی صندلی طراحی می‌شود، در حالی که در برخی کشورهای شرقی مردم به نشستن و خوابیدن روی کف عادت دارند. بنابراین، استفاده از سیستم‌های گرمایش کفی در چنین کشورهایی با محدودیت‌هایی مواجه است. در تحقیق حاضر ضمن توسعه مدلی برای بررسی شرایط حرارتی افراد خوابیده روی کف گرم، احساس حرارتی این افراد با افراد خوابیده روی تخت مقایسه شده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که احساس حرارتی افراد خوابیده روی کف گرم به شدت نسبت به مقاومت حرارتی روانداز حساس است. به طوری که تنها در محدوده تغییرات مقاومت حرارتی روانداز از 2 clo تا 1.75 clo فرد در محدوده آسایش حرارتی باقی می‌ماند. در حالی که برای شخص خوابیده روی تخت این گستره از 0.65 clo تا 0.7 clo گسترده است.

a.zolfaghari@modares.ac.ir
maerefat@modares.ac.ir
omidvar@sutec.ac.ir

واژگان کلیدی: سیستم گرمایش کفی، آسایش حرارتی، شرایط خواب.

مقدمه

یکی از سیستم‌های تابشی که استفاده از آن در سال‌های اخیر رو به گسترش بوده است، سیستم گرمایش تابشی کفی است. از آنجا که کف ساختمان یکی از سطوحی است که بخشی از بدن افراد در تماس با آن است، و موقعیت قرارگیری‌شان نسبت به کف از حالت ایستاده تا خوابیده روی کف ممکن است تغییر کند، ایجاد احساس گرما در افراد در سیستم‌های گرمایش کفی وابستگی محسوس به شرایط و موقعیت قرارگیری افراد نسبت به کف دارد.^[۱] نگاهی به شیوه زندگی سنتی در برخی از کشورهای شرقی -- از جمله ایران -- بیان‌گر این حقیقت است که در این‌گونه کشورها مردم به نشستن و خوابیدن روی کف اتاق عادت دارند. به نظر می‌رسد که نوع شرایط اقلیمی، گستردگی محدوده آسایش حرارتی و آداب و رسوم زندگی شرقی، از جمله نشستن و خوابیدن روی کف اتاق، از نظر آسایش حرارتی محدودیت‌هایی بر عملکرد این‌گونه سیستم‌ها تحمیل می‌کند. بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری افراد نسبت به کف گرم بر شرایط حرارتی ساکنان در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیقات بیشتر پیرامون یکی از سیستم‌های سنتی گرمایش کفی مورد استفاده در کره به نام ONDOL متمرکز بوده است.^[۲] تحقیقات تجربی روی این سیستم نشان داد که نشستن افراد روی کف گرم می‌تواند به شدت احساس حرارتی ایشان را متأثر سازد که این تأثیر بسته به نوع پوشش کف می‌تواند متغیر باشد.^[۳] با توجه به این که هنگام خوابیدن روی کف، بخش بیشتری از بدن نسبت به حالت نشسته با کف گرم

در تماس است، می‌توان این حالت را بحرانی‌ترین موقعیت قرارگیری فرد نسبت به کف گرم برشمرد که طی آن به طور چشم‌گیری در فرد احساس گرما ایجاد خواهد شد. هدف از انجام این تحقیق مدل‌سازی شرایط حرارتی برای فرد خوابیده بر کف گرم و بررسی میزان تأثیر پذیری شرایط حرارتی وی از سیستم گرمایش کفی است. برای این منظور استفاده از مدل‌های آسایش حرارتی ضرورت می‌یابد. از اواخر دهه ۷۰ میلادی تاکنون، مدل‌های بسیاری برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن ارائه شده است؛ این مدل‌ها غالباً مبتنی بر معادله بالانس انرژی بدن‌اند. از این میان مدل پایای فنگر^[۴] و مدل ناپایای گایج^[۵] محبوبیت بیشتری پیدا کردند، به طوری که از آن‌ها به عنوان مدل‌های پایه در استانداردهای آسایش حرارتی نام می‌برند.^[۶] اما باید توجه داشت که به کارگیری مدل‌های یادشده در شرایط خاص -- از جمله هنگام خواب -- مستلزم اعمال اصلاحات لازم در این مدل‌هاست. در هنگام خواب، شرایط فیزیولوژیکی بدن و نیز سازوکار تبادل حرارت میان بدن و محیط به طور محسوس دچار تغییرات می‌شود که این امر بر پاسخ حرارتی بدن نسبت به عوامل محیطی تأثیر چشم‌گیری دارد. در خصوص تغییر شرایط حرارتی افراد به هنگام خواب تحقیقات آزمایشگاهی متعددی انجام شده که از آن میان می‌توان به تحقیقات تجربی در زمینه اثرات دمایی اتاق بر شرایط حرارتی بدن در هنگام خواب،^[۷] تحقیق در زمینه سازوکارهای تنظیم حرارت بدن در زمان خواب،^[۸] تحقیقات تجربی در مورد اثرات رطوبت بر شرایط حرارتی افراد خوابیده،^[۹] تحقیق در زمینه خوابیدن در شرایط بسیار گرم یا بسیار سرد^[۱۰] و نیز تحقیقات تجربی در مورد تغییرات سازوکارهای تنظیم حرارت

تاریخ: دریافت ۱۶/۲/۱۳۸۸، اصلاحیه ۲۱/۹/۱۳۸۹، پذیرش ۲۹/۹/۱۳۸۹.

بدن در آغاز خواب^[۱۴] اشاره کرد. این در حالی است که در تحقیقات انجام شده، به مدل‌سازی تحلیلی شرایط حرارتی بدن در هنگام خواب چندان توجهی نشده است. تحقیقات انجام شده توسط لین و دنگ یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در خصوص مدل‌سازی تحلیلی شرایط حرارتی بدن به هنگام خواب محسوب می‌شود.^[۱۵] ایشان با بررسی شرایط حرارتی افراد در زمان خواب، مدلی برای ارزیابی احساس حرارتی در این شرایط توسعه دادند. البته در این مدل میان بدن و محیط یک مقاومت حرارتی کلی (R_t) در نظر گرفته شد، به طوری که بدن با محیطی با دمای کارکرد (t_o) و تحت مقاومت حرارتی R_t حرارت خود را مبادله می‌کند. مقدار مقاومت حرارتی کلی به‌ازای دو نوع لباس، دو نوع تشک و ۴ نوع روانداز مختلف، در تحقیق دیگری توسط نامبردگان اندازه‌گیری و گزارش شده است.^[۱۶] اما باید به این نکته توجه داشت که هنگام خوابیدن روی کف گرم، تبادل حرارت بخشی از بدن که در تماس با رختخواب است وابسته به مقاومت حرارتی رختخواب و دمای کف گرم است و سایر بخش‌های بدن حرارت خود را به محیطی با دمای کارکرد منتقل خواهد کرد. لذا برای مدل‌سازی شرایط حرارتی بدن هنگام خواب روی کف گرم، لازم است در مدل لین و دنگ^[۱۵] اصلاحاتی اعمال شود. در تحقیق حاضر سعی شده است که پس از اصلاح این مدل، به طوری که تأثیر هدایت حرارتی را بر بخشی از بدن که در تماس با کف گرم است لحاظ کند، جملات مربوط به جابه‌جایی و تابش توسط بخش‌هایی از بدن که در تماس با کف گرم نیست نیز اصلاح شود. سپس شرایط حرارتی در هنگام خوابیدن روی کف گرم، طبق آداب و رسوم زندگی شرقی بررسی و تشریح شده است.

مدل‌سازی پاسخ حرارتی بدن و معادلات حاکم

در مدل فنگر، معادله‌ی بالانس انرژی برای بدن در شرایط پایا نوشته می‌شود و اختلاف میان تولید و اتلاف حرارت از بدن، به‌عنوان عامل تعیین‌کننده‌ی شرایط حرارتی بدن تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۱):^[۱۷]

$$L = (M - W) - (Q_K + Q_c + Q_r + Q_e + Q_{res}) \quad (1)$$

M نرخ متابولیک، W کار انجام شده توسط شخص، Q_K ، Q_c و Q_r ، Q_e به ترتیب اتلاف حرارت توسط سازوکارهای هدایت، جابه‌جایی، تابش و تبخیر و Q_{res} اتلاف حرارت از طریق تنفس (همگی برحسب W/m^2) است. براین اساس، فنگر رابطه‌ی تجربی ۲ را برای ارزیابی احساس حرارتی فرد پیشنهاد می‌کند:^[۱۸]

$$PMV = [0.303 \exp(-0.196M) + 0.028]L \quad (2)$$

شاخص PMV^۱ بیانگر احساس حرارتی افراد است و مقدار آن بین ۳- تا ۳+ متغیر است و هر عدد صحیح بین این دو مقدار معادل یک احساس معین حرارتی است؛ به طوری که ۳ معادل خیلی گرم، ۲ معادل گرم، ۱ معادل کمی گرم، ۰ معادل خنثی، -۱ معادل کمی سرد، -۲ معادل سرد، و -۳ معادل خیلی سرد است.^[۱۹] همچنین استاندارد ISO۷۷۳۰ معرف محدوده‌ی $0.5 \leq PMV \leq -0.5$ به‌عنوان محدوده‌ی مجاز برای شرایط آسایش حرارتی است.^[۱۸] در این شرایط میانگین میزان ناراضیاتی حرارتی افراد نسبت به محیط، از ۱۰٪ فراتر نخواهد رفت.^[۱۸]

هنگام خواب، شرایط فیزیولوژیکی بدن -- اعم از نرخ متابولیک، و میزان تعرق -- تغییر می‌کند و سازوکارهای فیزیکی تبادل حرارت میان بدن و محیط نیز دستخوش تغییرات چشم‌گیر می‌شود. براین اساس، برای مدل‌سازی شرایط حرارتی بدن به هنگام

خواب، باید تغییرات مذکور در مدل فنگر اعمال شود. اما باید به این نکته توجه داشت که در مدل فنگر، اتلاف حرارت ناشی از تعرق تنها به نرخ متابولیک و نیز نرخ کار انجام شده توسط فرد مرتبط است؛ این مدل‌سازی کاملاً بر مبنای برازش اطلاعات تجربی در شرایط خاص صورت گرفته و مبنای فیزیکی ندارد. این در حالی است که سازوکار تبخیر به پارامترهای فیزیکی -- مقاومت تبخیری کل میان بدن و محیط، و اختلاف فشار بخار جزئی هوا و فشار بخار اشباع در سطح پوست -- و نیز پارامترهای فیزیولوژیکی -- میزان رطوبت ناشی از تعرق در پوست -- وابسته است. بنابراین اصلاح نحوه‌ی مدل‌سازی اتلافات ناشی از تبخیر در مدل فنگر ضروری است. لین و دنگ با اعمال این اصلاح و ایجاد تغییرات مربوط به شرایط خواب در مدل فنگر، رابطه‌ی ۳ را برای پیش‌بینی احساس حرارتی افراد به هنگام خواب پیشنهاد کرده‌اند:^[۱۵]

$$PMV = 0.0998 \{ 40 - 0.056(34 - t_a) - 0.692(5.87 - p_a) - \frac{1}{R_t} [(34.6 - t_o) + 0.3762(5.52 - p_a)] \} \quad (3)$$

که در آن R_t مقاومت حرارتی کلی میان بدن و محیط ($m^2 C/W$)، t_o دمای کارکرد ($^{\circ}C$)، t_a دمای هوا ($^{\circ}C$)، و p_a فشار جزئی بخار هوا (kPa) است. اما رابطه‌ی فوق برای مدل‌سازی احساس حرارتی افراد در شرایط خوابیده روی کف گرم، رابطه‌ی چندان مناسبی نیست؛ زیرا در رابطه‌ی ۳ به دلیل فرض نزدیک بودن دمای هوا و دمای متوسط تابش با دمای رختخواب، سازوکار هدایت حرارتی میان بدن و رختخواب مدل‌سازی نشده و تمام سطح بدن در حال تبادل حرارت تابشی و جابه‌جایی به محیطی با دمای کارکرد (t_o) فرض شده است. این در حالی است که هنگام خوابیدن روی کف گرم، بخشی از بدن که در تماس با رختخواب است، براساس سازوکار هدایت با کف گرم به دما t_f حرارت مبادله می‌کند و باقی سطح بدن توسط سازوکارهای تابش و جابه‌جایی حرارت بدن را دفع می‌کند. براین اساس، برای مدل‌سازی شرایط حرارتی شخص خوابیده روی کف گرم، باید در رابطه‌ی ۳ تغییراتی اعمال شود.

میزان مبادله‌ی حرارت بدن با کف گرم از طریق سازوکار هدایت به اختلاف دمای کف با پوست، مقاومت حرارتی میان بدن و کف، و نیز سطح تماس بدن وابسته است. بنابراین:

$$Q_K = \frac{\lambda_f(t_{sk} - t_f)}{R_f} \quad (4)$$

λ_f نسبت سطح تماس بدن با کف (یا تشک) به سطح کل بدن (بی‌بعد)، t_{sk} دمای پوست ($^{\circ}C$)، t_f دمای کف ($^{\circ}C$) و R_f مقاومت حرارتی کل میان بدن و کف ($m^2 C/W$) است:

$$\lambda_f = \frac{A_f}{A_D} \quad (5)$$

$$R_f = R_{cl} + R_m \quad (6)$$

A_f سطح تماس بدن با کف یا تشک (m^2)، A_D سطح کل بدن (m^2)، R_{cl} مقاومت حرارتی لباس ($m^2 C/W$)، و R_m مقاومت حرارتی تشک ($m^2 C/W$) است. همچنین سطح کل بدن از رابطه‌ی ۷ (رابطه‌ی معروف Dubois) محاسبه می‌شود:^[۱۷]

$$A_D = 0.202 m^{0.725} l^{0.725} \quad (7)$$

پوست، و نیز اختلاف فشار بخار هوا با فشار بخار اشباع در سطح پوست بستگی دارد. بنابراین:

$$Q_e = \frac{w(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,t}} \quad (16)$$

w میزان رطوبت پوست (نسبت سطح پوست خیس شده به سطح کل بدن)، $p_{sk,s}$ فشار بخار اشباع در سطح پوست (kPa)، p_a فشار جزئی بخار هوا (kPa) و $R_{e,t}$ مقاومت تبخیری کل میان بدن و محیط ($m^2 \text{ kPa/W}$) است. با استفاده از رابطه ی لوئیس^۲ داریم:

$$i_m L_R = \frac{R_t}{R_{e,t}} \quad (17)$$

رابطه ی ۱۶ را می توان چنین بازنویسی کرد:

$$Q_e = \frac{i_m L_R w (p_{sk,s} - p_a)}{R_t} \quad (18)$$

که در آن i_m بازده کلی نفوذ بخار (بی بعد)، R_t مقاومت حرارتی کل میان بدن و محیط ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)، L_R و ضریب لوئیس است که در محیط های معمول در حدود 16.5 K/kPa است.^[۷] مقدار مقاومت حرارتی کل میان بدن و محیط از رابطه ی ۱۹ محاسبه می شود:

$$R_t = \left(\frac{\lambda_f}{R_f + R_{cl}} + \frac{\lambda_b}{R_b + R_{cl} + \sqrt{(f_{cl} h)}} + \frac{1 - \lambda_b - \lambda_f}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl} h)}} \right)^{-1} \quad (19)$$

در واقع میزان رطوبت پوست به دو سازوکار مختلف وابسته است: ۱. سازوکار انتشار طبیعی آب از میان پوست؛ ۲. تعرق وابسته به سیستم تنظیم دمای بدن. رطوبت ناشی از انتشار طبیعی آب در پوست برابر 0.06 است، در حالی که میزان رطوبت پوست با وجود تعرق تنظیمی می تواند تا ۱ افزایش یابد. از سوی دیگر، به دلیل پایین بودن نرخ متابولیک، سازوکار تعرق تنظیمی به هنگام خواب کمیته می شود. فنرگر رابطه ی ۲۰ را برای تخمین مقدار اتلاف حرارت ناشی از تعرق تنظیمی به منظور دست یابی به شرایط آسایش ارائه کرده است:^[۷]

$$E_{rsw,req} = \text{Max}\{0, 0.42(M - W - 58.15)\} \quad (20)$$

با توجه به این که نرخ متابولیک در زمان خواب حدود 0.4 W/m^2 است، سازوکار تعرق تنظیمی حین خواب کمیته می شود. بنابراین می توان رطوبت پوست را به هنگام خواب معادل 0.06 در نظر گرفت.

علاوه بر تبادل حرارت بدن و محیط از طریق پوست (با سازوکارهای هدایت، جابه جایی، تابش و تبخیر)، بخشی از حرارت بدن از طریق تنفس به محیط دفع می شود. اتلاف حرارت تنفسی شامل دو بخش محسوس ($Q_{res,S}$) و نهان ($Q_{res,L}$) است:

$$Q_{res} = Q_{res,S} + Q_{res,L} \quad (21)$$

که در آن:

$$Q_{res,S} = 0.0014M(34 - t_a) \quad (22)$$

$$Q_{res,L} = 0.0173M(57.87 - p_a) \quad (23)$$

که در آن m جرم شخص (kg) و l قد شخص (m) است. بقیه ی سطح بدن که در تماس با تشک نیست از طریق سازوکارهای تابش و جابه جایی با محیط حرارت مبادله می کند. تبادل حرارت از طریق این سازوکارها چنین محاسبه می شود:

$$Q_c = (1 - \lambda_f) f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (8)$$

و

$$Q_r = (1 - \lambda_f) f_{cl} h_r (t_{cl} - \bar{t}_r) \quad (9)$$

که در آن f_{cl} ضریب تصحیح سطح لباس (بی بعد)، t_{cl} دمای سطح لباس ($^\circ\text{C}$)، t_a دمای هوا ($^\circ\text{C}$)، \bar{t}_r دمای متوسط تابش ($^\circ\text{C}$)، h_c ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای بدن ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)، و h_r ضریب خطی شده ی انتقال حرارت تابشی برای بدن ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) است. در متون مربوط به آسایش حرارتی چنین معمول است که تبادل حرارت جابه جایی و تابشی میان بدن و محیط را با هم ترکیب، و آنها را در قالب یک رابطه بیان می کنند:^[۷]

$$Q_c + Q_r = (1 - \lambda_f) f_{cl} h (t_{cl} - t_o) \quad (10)$$

h ضریب کلی انتقال حرارت ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) و t_o دمای کارکرد ($^\circ\text{C}$) است و چنین محاسبه می شوند:

$$h = h_c + h_r \quad (11)$$

و

$$t_o = \frac{h_c t_a + h_r \bar{t}_r}{h_c + h_r} \quad (12)$$

از سوی دیگر، می توان مجموع تبادل حرارت تابشی و جابه جایی از سطح پوست را چنین نوشت:

$$Q_c + Q_r = (1 - \lambda_f) \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}} \quad (13)$$

با ترکیب روابط ۱۰ و ۱۳ می توان رابطه ی مجموع تبادل حرارت تابشی و جابه جایی میان بدن و محیط را مستقل از دمای سطح لباس نوشت:

$$Q_c + Q_r = (1 - \lambda_f) \frac{t_{sk} - t_o}{R_{c-r}} \quad (14)$$

R_{c-r} مقاومت حرارتی کلی مربوط به سازوکارهای جابه جایی و تابشی ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) است. از آنجا که به هنگام خواب افراد معمولاً از روانداز استفاده می کنند، بخشی از سطح بدن با روانداز و لباس، و بخشی دیگر فقط توسط لباس پوشیده می شود. براین اساس، مقاومت حرارتی کلی مربوط به سازوکارهای جابه جایی و تابش چنین تعریف می شود:

$$R_{c-r} = \frac{1 - \lambda_f}{\left(\frac{\lambda_b}{R_b + R_{cl} + \sqrt{(f_{cl} h)}} + \frac{1 - \lambda_b - \lambda_f}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl} h)}} \right)} \quad (15)$$

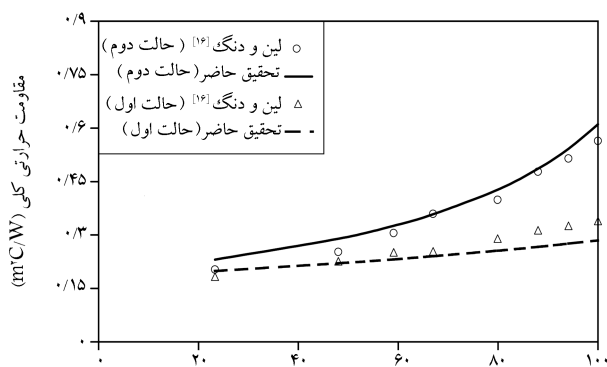
λ_b نسبت سطح پوشیده شده از بدن توسط روانداز به سطح کل بدن (بی بعد)، و R_b مقاومت حرارتی روانداز ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) است.

بدن انسان علاوه بر تبادل حرارت محسوس با محیط از طریق سازوکارهای هدایت، جابه جایی و تابش، بخشی از حرارت خود را به صورت نهان و توسط سازوکار تبخیر عرق به محیط دفع می کند. اتلاف حرارت از طریق تعرق به میزان رطوبت

عملکرد این روابط در پیش‌بینی مقادیر R_{t_1} ، مقادیر به دست آمده از این روابط با نتایج تجربی حاصل از تحقیقات لین و دنگ^[۱۶] مقایسه شده است. آنان با انجام آزمایشاتی روی یک مانکن در شرایط خوابیده، مقاومت حرارتی میان بدن و محیط را برای سه حالت بدن لخت، لباس خواب تابستانی و لباس خواب زمستانی و به‌ازای چهار نوع روانداز مختلف (ملحفه، روانداز نازک، روانداز متوسط و روانداز ضخیم) اندازه‌گیری کردند. همچنین این اندازه‌گیری‌ها را برای کم‌ترین میزان پوشش (بدون روانداز) تا پوشش کامل بدن توسط هر نوع رواندازی انجام دادند.

در تحقیق حاضر، برای دو حالت مختلف نتایج مدل‌سازی رابطه‌ی ۱۹ با نتایج تجربی لین و دنگ^[۱۶] مقایسه شده است. در حالت اول، شرایط برای شخص خوابیده با لباس خواب تابستانی (معادل 0.57clo) و با روانداز ملحفه (از جنس 100% پنبه‌یی با ضخامت 3 mm و جرم 0.3308 kg/m^2) و در حالت دوم، شرایط برای شخص خوابیده با لباس خواب زمستانی (معادل 0.96clo) و روانداز متوسط (از جنس 100% پلی‌استر با ضخامت 3 mm و جرم 0.5612 kg/m^2) در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به نتایج تجربی پیشین^[۱۶] هنگام خوابیدن حدود 23.3% درصد از سطح بدن در تماس با رختخواب است و بنابراین $\lambda_f = 0.233$ ، بقیه‌ی سطح بدن می‌تواند توسط روانداز پوشانده شود و براین اساس: $\lambda_b \leq 0.767$ ، در شکل ۱ مقاومت حرارتی کلی بین بدن و محیط به‌ازای درصد پوشش سطح بدن توسط رختخواب و روانداز در دو حالت مختلف با نتایج تجربی لین و دنگ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصله حاکی از هم‌خوانی مناسب این حالات است.

مورد دیگری که باید صحت عملکرد آن سنجیده شود، شاخص احساس حرارتی پیش‌بینی شده توسط مدل جدید (رابطه‌ی ۲۸) است. برای این منظور، نتایج حاصل از مدل لین و دنگ^[۱۵] در پیش‌بینی شاخص احساس حرارتی افراد (PMV) با استفاده از داده‌های تجربی ایشان برای مقاومت حرارتی کلی میان بدن و محیط^[۱۶] با نتایج مدل جدید مقایسه شده است. این مقایسه برای شرایط محیطی پایه (دمای هوای 25°C ، دمای متوسط تابش 25°C و رطوبت نسبی 50%) و برای دو حالت مختلف برای پوشش و نوع روانداز افراد انجام گرفته است. شکل ۲ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نتایج مدل جدید هم‌خوانی مطلوبی با نتایج تحقیقات لین و دنگ^[۱۵] دارد.



شکل ۱. درصد پوشش سطح بدن توسط رختخواب و روانداز (%)

شکل ۱. مقاومت حرارتی کلی بین بدن و محیط به‌ازای درصد پوشش سطح بدن توسط رختخواب و روانداز در دو شرایط تابستانه و زمستانه.

براساس آنچه که تاکنون گفته شد، می‌توان رابطه‌ی ۱ را برای شرایط خوابیدن روی کف چنین بازنویسی کرد:

$$L = (M - W) - \frac{\lambda_f(t_{sk} - t_f)}{R_f} + (1 - \lambda_f) \frac{t_{sk} - t_o}{R_{c-r}} + \frac{i_m L R w (p_{sk,s} - p_a)}{R_t} + 0.10014M(34 - t_a) + 0.10173M(51.87 - p_a) \quad (24)$$

برای استفاده از رابطه‌ی ۲۴، لازم است دمای پوست معین باشد. فنگر رابطه‌ی ۲۵ را برای تخمین متوسط دمای مناسب پوست برای دست‌یابی به شرایط آسایش ارائه کرده است:^[۱۷]

$$t_{sk,req} = 35.7 - 0.10275(M - W) \quad (25)$$

بنابراین رابطه‌ی ۲۴ به شکل رابطه‌ی ۲۶ درمی‌آید:

$$L = (M - W) - \left\{ \frac{\lambda_f(35.7 - 0.10275(M - W) - t_f)}{R_f} + (1 - \lambda_f) \frac{35.7 - 0.10275(M - W) - t_o}{R_{c-r}} + \frac{i_m L R w (p_{sk,s} - p_a)}{R_t} + 0.10014M(34 - t_a) + 0.10173M(51.87 - p_a) \right\} \quad (26)$$

و خواهیم داشت:

$$PMV = [0.303 \exp(-0.1036M) + 0.1028] \times \left\{ (M - W) - \frac{\lambda_f(35.7 - 0.10275(M - W) - t_f)}{R_f} - (1 - \lambda_f) \frac{35.7 - 0.10275(M - W) - t_o}{R_{c-r}} - \frac{i_m L R w (p_{sk,s} - p_a)}{R_t} - 0.10014M(34 - t_a) - 0.10173M(51.87 - p_a) \right\} \quad (27)$$

با جایگذاری پارامترهای مربوط به هنگام خواب از جمله $M = 40 \text{ W/m}^2$ ، $W = 0 \text{ W/m}^2$ ، $w = 0.06$ و مقدار ثابت $L R = 16.5 \text{ K/kPa}$ در رابطه‌ی ۲۷ خواهیم داشت:

$$PMV = 0.9998 \left\{ 40 - \frac{\lambda_f(34.6 - t_f)}{R_f} - \frac{(1 - \lambda_f)(34.6 - t_o)}{R_{c-r}} - \frac{0.999 i_m (51.52 - p_a)}{R_t} - 0.1056(34 - t_a) - 0.6992(51.87 - p_a) \right\} \quad (28)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ می‌توان احساس حرارتی افراد هنگام خوابیدن روی کف گرم را پیش‌بینی کرد.

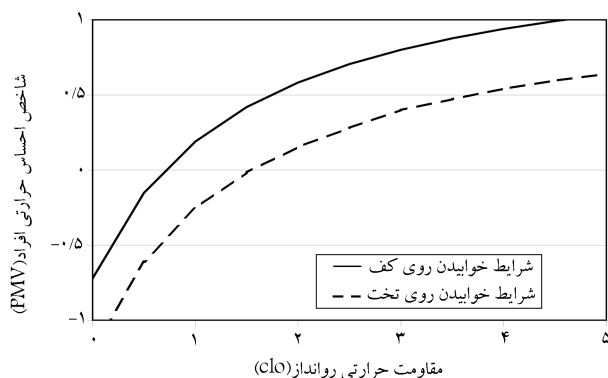
اعتبارسنجی مدل جدید

در مدل جدید با استفاده از روابط شناخته‌شده‌ی انتقال حرارت، مقاومت حرارت کلی میان بدن شخص خوابیده و محیط محاسبه می‌شود. به‌منظور ارزیابی صحت

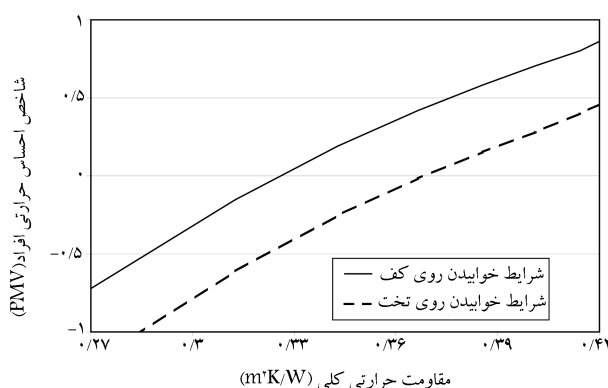
برای فرد در حالت خوابیده لحاظ شود. براین اساس احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم و نیز تخت به‌ازای تغییر در مقاومت حرارتی روانداز محاسبه شده است.

شکل ۳ نتایج مقایسه‌ی شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم با فرد خوابیده روی تخت را به‌ازای تغییر در مقاومت حرارتی روانداز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افراد خوابیده روی کف نسبت به تغییر مقاومت حرارتی روانداز حساسیت بیشتری دارند، به‌طوری که در گستره‌ی تغییرات مقاومت حرارتی روانداز از ۰٫۲ clo تا ۱٫۷۵ clo فرد در محدوده‌ی آسایش حرارتی باقی می‌ماند. این در حالی است که برای شخص خوابیده روی تخت این گستره از ۰٫۶۵ clo تا ۳٫۷ clo گسترده است. بنابراین گستره‌ی تغییرات مقاومت حرارتی روانداز برای فرد خوابیده روی تخت حدود دو برابر فرد خوابیده روی کف گرم است.

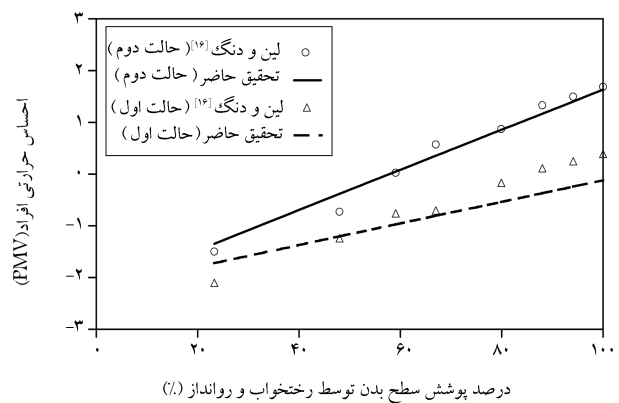
در شکل ۴ نتایج مقایسه‌ی شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم با فرد خوابیده روی تخت به‌ازای تغییر در مقاومت حرارتی کلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شاخص احساس حرارتی افراد خوابیده روی کف گرم با دمای $29^{\circ}C$ ، حدود 0.42 واحد نسبت به شاخص احساس حرارتی خوابیده روی تخت در شرایط مشابه بیشتر است. همچنین شکل ۵ شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم به‌ازای تغییرات دمای کف و مقاومت حرارتی روانداز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش هر $1^{\circ}C$ در دمای کف گرم، شاخص احساس حرارتی افراد خوابیده به‌میزان حدود 0.1 واحد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش دمای کف گرم در هنگام خواب، آزادی عمل افراد برای استفاده



شکل ۳. مقایسه‌ی شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم و تخت به‌ازای تغییر در مقاومت حرارتی روانداز.



شکل ۴. مقایسه‌ی شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم و تخت به‌ازای تغییر در مقاومت حرارتی کلی.



شکل ۲. شاخص احساس حرارتی افراد به‌ازای درصد پوشش سطح بدن توسط رختخواب و روانداز (٪)

روند انجام تحقیق

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی شرایط حرارتی افراد در اثر خوابیدن روی کف گرم و مقایسه‌ی آن با شرایط حرارتی هنگام خوابیدن روی تخت است. یادآور می‌شود مدل‌سازی شرایط حرارتی برای افراد خوابیده روی تخت مشابه خوابیدن روی کف است؛ با این تفاوت که در شرایط خوابیدن روی کف گرم، دمای زیرین تشک در تماس با کف گرم با دمایی مشخص است ولی سطح زیرین تشک تخت با هوای محیط در تماس است و باید از شرط مرزی جابه‌جایی روی سطح زیرین تخت استفاده کرد.

برای بررسی اثر خوابیدن روی کف گرم و مقایسه‌ی آن با شرایط حرارتی هنگام خوابیدن روی تخت، فضایی با سیستم گرمایش از کف در نظر گرفته شده، و شرایط حرارتی محیط مسکونی به‌نحوی طراحی شده که افراد در حالت نشسته روی صندلی احساس حرارتی خنثی را تجربه کنند. به‌بیان دیگر، معیار طراحی حرارتی فضای مسکونی برپایه‌ی ایجاد شرایط حرارتی مطلوب برای آنان که روی صندلی نشسته‌اند استوار است. پس از طراحی حرارتی فضای مسکونی، شاخص احساس حرارتی هنگام خوابیدن روی کف توسط مدل جدید محاسبه می‌شود و با احساس حرارتی افراد خوابیده روی تخت مقایسه می‌شود.

نتایج

به‌منظور طراحی حرارتی فضای مسکونی، احساس حرارتی فردی که روی صندلی نشسته با میزان پوششی معادل 0.96 clo (مطابق با استاندارد ASHRAE [7] برای پوشش معمول خانگی) و نرخ متابولیک 1 met به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفته می‌شود. همچنین رطوبت نسبی هوا 50 درصد فرض شده است. براین اساس، یک سیستم گرمایش کفی با دمای کف $29^{\circ}C$ و دمای هوای $22.4^{\circ}C$ قادر است در فردی با شرایط یادشده، احساس حرارتی خنثی ایجاد کند. به‌عبارت دیگر، فضایی با شرایط فوق از نظر شرایط آسایش حرارتی برای افراد در حالت نشسته مناسب است. اما باید به خاطر داشت که در هنگام خواب، تغییرات محسوس در شرایط فیزیولوژیکی بدن و نیز سازوکارهای انتقال حرارت میان بدن و محیط اتفاق می‌افتد. ازجمله این تغییرات می‌توان به کاهش نرخ متابولیک، کاهش اتلافات تنفسی و افزایش سهم سازوکار هدایت در تبادل حرارت میان بدن و محیط اشاره کرد. [10، 11، 12] در رابطه‌ی ۲۸ سعی شده است تغییر شرایط فیزیکی و فیزیولوژیکی

۲۹ خواهیم داشت:

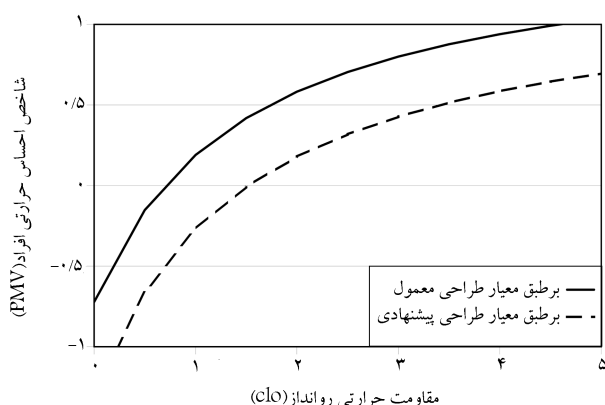
$$PMV = 0,06535 \{ 58,15 - \frac{\lambda_f(34,1 - t_f)}{R_f} - \frac{(1 - \lambda_f)(34,1 - t_o)}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl}h)}} - 0,99i_m(5,35 - p_a) \left(\frac{\lambda_f}{R_f + R_{cl}} + \frac{1 - \lambda_f}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl}h)}} \right) - 0,08141(34 - t_a) - 1,006(5,87 - p_a) \} \quad (30)$$

با توجه به این که سطح تبادل حرارت هدایت میان بدن و کف ناچیز است [۱۹] ($\lambda_f \approx 0,29$) و نیز به دلیل تفاوت اندک میان دمای کف و پوست در محل تماس آنها (به ویژه در شرایط پایا)، رابطه‌ی ۳۰ را می‌توان چنین ساده کرد:

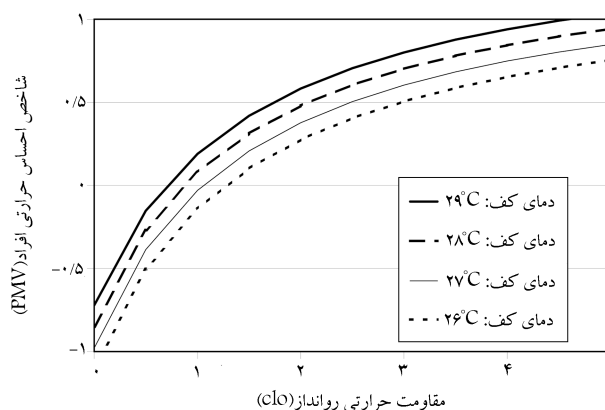
$$PMV = 0,06535 \{ 58,15 - \frac{0,97(34,1 - t_o)}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl}h)}} + 0,96i_m(5,35 - p_a) - 0,08141(34 - t_a) - 1,006(5,87 - p_a) \} \quad (31)$$

حال شرایط حرارتی محیط باید به گونه‌ی طراحی شود که شاخص احساس حرارتی برای شخص نشسته روی کف گرم برابر صفر (شرایط خنثی) شود. در این شرایط، میزان اثرگذاری کف گرم بر احساس حرارتی افراد بیشتر از حالتی است که افراد روی صندلی نشسته باشند. بنابراین دمای هوای مطلوب برای افراد در هنگام نشستن روی کف نسبت به حالت نشستن روی صندلی کم‌تر است و بر این اساس، اگر طراحی حرارتی محیط بر مبنای احساس حرارتی خنثی برای شخص نشسته روی کف گرم صورت پذیرد، افراد خوابیده روی کف نسبت به شرایط طراحی معمول احساس خنک‌تری خواهند داشت. در شکل ۶ شاخص احساس حرارتی افراد خوابیده روی کف گرم با دمای $29^\circ C$ در دو حالت طراحی بر مبنای شرایط مطلوب برای شخص نشسته روی صندلی، و طراحی بر مبنای شرایط مطلوب برای شخص نشسته روی کف گرم با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن احساس شخص نشسته روی کف گرم به عنوان معیار طراحی، حساسیت افراد به میزان مقاومت حرارتی روانداز کاهش می‌یابد و افراد در گستره‌ی وسیع‌تری از مقاومت حرارتی برای روانداز، در محدوده‌ی مطلوب آسایش حرارتی باقی می‌مانند.

همچنین در شکل ۷ با در نظر گرفتن احساس حرارتی خنثی برای شخص نشسته روی کف گرم به عنوان معیار طراحی، شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم به ازای تغییرات دمای کف و مقاومت حرارتی روانداز با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش هر $1^\circ C$ در دمای کف گرم، شاخص



شکل ۶. احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم به ازای دو معیار طراحی حرارتی مختلف برای محیط.



شکل ۵. شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم به ازای تغییرات دمای کف و مقاومت حرارتی روانداز.

از رواندازهای مختلف افزایش می‌یابد. به طوری که به ازای دمای $29^\circ C$ برای کف گرم، احساس حرارتی افراد فقط به ازای مقاومت حرارتی روانداز بین $0,2$ clo تا $1,75$ clo در محدوده‌ی مجاز قرار خواهد داشت. در حالی که با پایین آوردن دمای کف گرم تا $26^\circ C$ ، این محدوده از $0,5$ clo تا 3 clo گسترش خواهد یافت. به این ترتیب کاهش دمای کف منجر به کاهش حساسیت احساس حرارتی افراد در هنگام خواب می‌شود.

راهکار پیشنهادی

نتایج حاصله بیانگر این است که چنانچه شرایط حرارتی فضای مسکونی بر مبنای احساس حرارتی خنثی برای شخص نشسته روی صندلی طراحی شود، احساس حرارتی هنگام خوابیدن روی کف گرم به شدت نسبت به میزان مقاومت حرارتی روانداز حساسیت نشان می‌دهد، و تغییر اندکی در مقاومت حرارتی روانداز می‌تواند احساس حرارتی افراد را از محدوده‌ی مجاز خارج کند. از سوی دیگر، در مناطقی که از کف اتاق به عنوان فضای خواب استفاده می‌شود، معمولاً از همین فضا برای نشستن نیز استفاده می‌شود و نشستن روی صندلی چندان مرسوم نیست. از این رو، پیشنهاد می‌شود که در مناطقی با آداب و رسوم شرقی، به جای در نظر گرفتن احساس حرارتی شخص نشسته روی صندلی به عنوان معیار طراحی حرارتی محیط‌های مسکونی، احساس حرارتی شخص نشسته روی کف معیار طراحی قرار گیرد. با توجه به رابطه‌ی ۲۷ و این که در هنگام نشستن روی کف، مقدار λ_b برابر صفر است، شاخص احساس حرارتی برای شخص نشسته روی کف از رابطه‌ی ۲۹ محاسبه می‌شود:

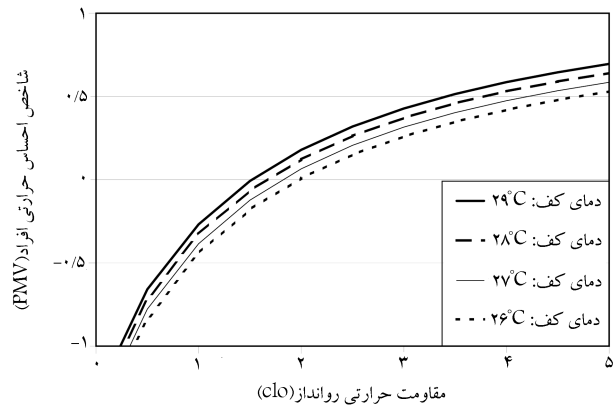
$$PMV = [0,303 \exp(-0,36M) + 0,28] \times (M - W) - \frac{\lambda_f(35,7 - 0,275(M - W) - t_f)}{R_f} - (1 - \lambda_f) \frac{35,7 - 0,275(M - W) - t_o}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl}h)}} - i_m L_R w (p_{sk,s} - p_a) \left(\frac{\lambda_f}{R_f + R_{cl}} + \frac{1 - \lambda_f}{R_{cl} + \sqrt{(f_{cl}h)}} \right) - 0,014M(34 - t_a) - 0,173M(5,87 - p_a) \quad (29)$$

با جای‌گذاری پارامترهای مربوط به هنگام نشستن از جمله $M = 58,15 W/m^2$ ، $w = 0,06$ ، $L_R = 16,5 K/kPa$ و مقدار ثابت $W = 0 W/m^2$

کف گرم به صورت وابسته به زمان مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد و دما و شرایط حرارتی بخش‌های مختلف بدن به‌ویژه سر که نسبت به گرما حساسیت بالایی دارد، تحلیل و ارزیابی شود.

فهرست علائم

- AD : سطح کل بدن m^2
 - A_f : سطح تماس بدن با کف یا تشک m^2
 - f_{cl} : ضریب تصحیح سطح لباس بی‌بعد
 - h : ضریب کلی انتقال حرارت $W/m^2 \cdot C$
 - h_c : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای بدن $W/m^2 \cdot C$
 - h_r : ضریب خطی‌شده انتقال حرارت تابشی $W/m^2 \cdot C$
 - i_m : بازدهی کلی نفوذ بخار بی‌بعد
 - l : قد شخص m
 - L : نرخ ذخیره‌ی حرارت در بدن W/m^2
 - L_R : ضریب لويس K/kPa
 - m : جرم شخص kg
 - M : نرخ متابولیک W/m^2
 - p_a : فشار جزئی بخار هوا kPa
 - $p_{sk,s}$: فشار بخار اشباع در سطح پوست kPa
 - PMV: شاخص احساس حرارتی افراد بی‌بعد
 - Q_c : اتلاف حرارت توسط سازوکار جابه‌جایی W/m^2
 - Q_e : اتلاف حرارت توسط سازوکار تبخیر W/m^2
 - Q_K : اتلاف حرارت توسط سازوکار هدایت W/m^2
 - Q_r : اتلاف حرارت توسط سازوکار تابش W/m^2
 - Q_{res} : اتلاف حرارت از طریق تنفس W/m^2
 - R_b : مقاومت حرارتی روانداز $m^2 \cdot C/W$
 - R_{c-r} : مقاومت حرارتی کلی جابه‌جایی و تابش $m^2 \cdot C/W$
 - R_{cl} : مقاومت حرارتی لباس $m^2 \cdot C/W$
 - $R_{e,t}$: مقاومت تبخیری کل میان بدن و محیط $m^2 \cdot kPa/W$
 - R_f : مقاومت حرارتی کل میان بدن و کف $m^2 \cdot C/W$
 - R_m : مقاومت حرارتی تشک $m^2 \cdot C/W$
 - R_t : مقاومت حرارتی کلی میان بدن و محیط $m^2 \cdot C/W$
 - t_a : دمای هوا $^{\circ}C$
 - t_{cl} : دمای سطح لباس $^{\circ}C$
 - t_f : دمای کف $^{\circ}C$
 - t_o : دمای کارکرد $^{\circ}C$
 - \bar{t}_r : دمای متوسط تابش $^{\circ}C$
 - t_{sk} : دمای پوست $^{\circ}C$
 - w : میزان رطوبت پوست بی‌بعد
 - W : کار انجام‌شده توسط شخص W/m^2
- علائم یونانی**
- λ_b : سهم سطح پوشیده‌شده از بدن با روانداز بی‌بعد
 - λ_f : سهم سطح تماس بدن با کف یا تشک بی‌بعد



شکل ۷. شاخص احساس حرارتی برای فرد خوابیده روی کف گرم به‌ازای تغییرات دمای کف و مقاومت حرارتی روانداز (با طراحی بر مبنای ایجاد شرایط حرارتی خنثی برای شخص نشسته روی کف گرم).

احساس حرارتی افراد خوابیده به‌میزان حدود 0.76 واحد کاهش می‌یابد و بر آزادی عمل افراد برای استفاده از رواندازهای مختلف افزوده می‌شود. اما باید توجه داشت که وقتی احساس حرارتی شخص نشسته روی کف گرم معیار طراحی قرار گیرد، در هنگام خواب افراد برای قرار گرفتن در محدوده‌ی آسایش به رواندازی با مقاومت حرارتی حداقل 0.77 clo تا 0.78 clo نیاز دارند.

در اینجا لازم است برای درک فیزیکی بهتر خوانندگان از مقدار مقاومت حرارتی روانداز به ذکر چند مثال برای رواندازهای مختلف پرداخته شود. مقاومت حرارتی برای ملحفه تقریباً 0.72 clo، برای روانداز دولایه‌ی پارچه‌ی در حدود 0.78 clo، برای پتوی معمولی نزدیک 1.75 clo و برای لحاف ضخیم از 2.75 clo تا 3 clo است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ضمن توسعه‌ی مدلی به‌منظور بررسی شرایط حرارتی افراد در هنگام خوابیدن روی کف گرم، محدودیت خوابیدن افراد روی کف در محیطی با سیستم گرمایش کفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که به‌کارگیری سیستم‌های گرمایش کفی در شرایطی که ساکنان از کف ساختمان برای خوابیدن استفاده می‌کنند، به‌طور چشم‌گیری احساس حرارتی افراد را متأثر می‌کند. به‌طوری که در این شرایط حساسیت احساس افراد نسبت به مقاومت حرارتی روانداز مورد استفاده، بالاست و با تغییر اندکی در میزان مقاومت حرارتی روانداز احساس حرارتی افراد به‌شدت تغییر می‌کند و از محدوده‌ی مجاز شرایط آسایش حرارتی خارج می‌شود. این در حالی است که برای افراد خوابیده روی تخت در شرایط مشابه، این حساسیت به‌مراتب کم‌تر است. همچنین براساس نتایج حاصله، چنین به نظر می‌رسد که پایین آوردن دمای کف در هنگام خواب، می‌تواند تا حدی در حفظ شرایط آسایش حرارتی افراد در محدوده‌ی مجاز مؤثر باشد.

طبق نتایج تحقیق حاضر، پیشنهاد می‌شود که در مناطقی با آداب و رسوم شرقی که نشستن و خوابیدن روی کف مرسوم است، احساس حرارتی مطلوب برای افراد نشسته روی کف اتاق به‌عنوان معیار طراحی حرارتی فضای مسکونی در نظر گرفته شود. براین اساس می‌توان احساس حرارتی افراد خوابیده روی کف گرم را در محدوده‌ی مجاز آسایش حرارتی حفظ کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، با استفاده از مدل‌های آسایش حرارتی گذرا، شرایط حرارتی افراد خوابیده روی

پانوشت

1. Predicted Mean Vote (PMV)
2. Lewis relation

منابع

1. Watson, R.D. and Chapman, K.S., *Radiant Heating and Cooling Handbook*, New York: McGraw-Hill (2001).
2. Yeo, M.S.; Yang, I.H. and Kim, K.W. "Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea", *Energy and Buildings*, **35**(7), pp. 715-27 (2003).
3. Song, G.S. "Buttock temperature in a sedentary posture on plywood flooring of varying thickness over the ONDOL heating system", *Journal of Wood Science*, **50**(6), pp. 498-503 (2004).
4. Song, G.S. "Buttock responses to contact with finishing materials over the ONDOL floor heating system in Korea", *Energy and Buildings*, **37**(1), pp. 65-75 (2005).
5. Fanger, P.O., *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, New York, McGraw-Hill (1970).
6. Gagge, A.P.; Stolwijk, J.A.J. and Nishi, Y. "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", *ASHRAE Transactions*, **77**(1), pp. 247-62 (1971).
7. ASHRAE, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, Atlanta, ASHRAE (2001).
8. ISO7730, *Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*, International Standards Organization (1994).
9. Teramoto, Y.; Tokura, H.; Ioki, I.; Suho, S.; Inoshiri, R. and Masuda, M. "The effect of room temperature on rectal temperature during night sleep", *Journal of Thermal Biology*, **23**(1), pp. 15-21 (1998).
10. Heuvel, C.J.; Ferguson, S.A.; Gilbert, S.S. and Dawson, D. "Thermoregulation in normal sleep and insomnia: The role of peripheral heat loss and new applications for digital thermal infrared imaging (DITI)", *Journal of Thermal Biology*, **29**(7-8), pp. 457-61 (2004).
11. Okamoto-Mizuno, K.; Tsuzuki, K.; Mizuno, K. and Iwaki, T. "Effects of partial humid heat exposure during different segments of sleep on human sleep stages and body temperature", *Physiology & Behavior*, **83**(5), pp. 759-65 (2005).
12. Tsuzuki, K.; Okamoto-Mizuno, K. and Mizuno, K. "Effects of humid heat exposure on sleep, thermoregulation, melatonin, and microclimate", *Journal of Thermal Biology*, **29**(1), pp. 31-36 (2004).
13. Buguet, A. "Sleep under extreme environments: Effects of heat and cold exposure, altitude, hyperbaric pressure and microgravity in space", *Journal of the Neurological Sciences*, **262**(1-2), pp. 145-52 (2007).
14. Rogers, N.L.; Bowes, J.; Lushington, K. and Dawson, D. "Thermoregulatory changes around the time of sleep onset", *Physiology & Behavior*, **90**(4), pp. 643-47 (2007).
15. Lin, Z. and Deng, S. "A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments", *Building and Environment*, **43**(1), pp. 70-81 (2008).
16. Lin, Z. and Deng, S. "A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics", *Building and Environment*, **43**(5), pp. 905-16 (2008).
17. DuBois, D. and DuBois, E.F. "A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known", *Archives of Internal Medicine*, **17**, pp. 863-71 (1916).
18. Zhang, K.; Sun, M.; Werner, P.; Kovera, A.J.; Albu, J.; Pi-Sunyer, F.X. and Boozer, C.N. "Sleeping metabolic rate in relation to body mass index and body composition", *International Journal of Obesity*, **26**, pp. 376-83 (2002).
19. Kurazumi, Y.; Tsuchikawa, T.; Matsubara, N. and Horikoshi, T. "Effect of posture on the heat transfer areas of the human body", *Building and Environment*, **43**(10), pp. 1555-65 (2008).
20. Kurazumi, Y.; Tsuchikawa, T.; Ishii, J.; Fukagawa, K.; Yamato, Y. and Matsubara, N. "Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection", *Building and Environment*, **43**(12), pp. 2142-53 (2008).