

ارزیابی تأثیر ناهمگونی پوشش تابستانه بر احساس حرارتی موضعی مسافران در یک اتوبوس تحت دو نوع سیستم تهویه متداول

سید علیرضا ذوالفقاری^{*}، حسن حسن‌زاده، مرتضی طاهری، محمد ریسی، مهدی افضلیان

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:	<p>چکیده: تأمین شرایط آسایش حرارتی برای سرنشینان وسایل نقلیه و به خصوص وسایل نقلیه عمومی، به دلیل محدود بودن فضا، تراکم حضور افراد و عدم یکنواختی شرایط فردی و محیطی با پیچیدگی‌های زیادی همراه است. یکی از مصادیق عدم یکنواختی و همگونی شرایط فردی در میان مسافران، پوشش متفاوت افراد است؛ به طوری که در بسیاری از مواقع، برخی از مسافران از سطح پوشش بالاتر و برخی دیگر از پوشش کمتری برخوردار هستند. در این تحقیق سعی شده تا تأثیرات ناهمگونی پوشش مسافران یک اتوبوس با دو حالت سیستم تهویه جابه‌جایی کفی و اختلاطی بالاسری بر روی احساس حرارتی موضعی افراد برای اولین بار مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، از گلگر عددی این‌فوم و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل فوم برای حل معادلات حاکم بر جریان و انرژی و برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی موضعی از مدل آسایش حرارتی ۶۵-نقطه‌ای تانابه استفاده شده است. براساس نتایج بدست آمده، سیستم تهویه جابه‌جایی عملکرد بهتری در فراهم آوردن شرایط مطلوب و یکنواخت دارد. به طوری که در تهویه اختلاطی بیشینه شاخص احساس حرارتی حدود ۱/۱ است ولی این مقدار در حالت تهویه جابه‌جایی حدود ۰/۴ است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که عدم وجود پوشش در ناحیه ساعد دست‌ها نه تنها باعث کاهش دمای حدود ۲/۵ درجه سلسیوس در دست می‌شود، بلکه باعث کاهش احساس حرارتی کل بدن در حدود ۰/۱ در تهویه جابه‌جایی کفی و ۰/۴ در تهویه اختلاطی بالاسری می‌شوند. این امر نشان می‌دهد که سطح حساسیت افراد دارای پیراهن آستین کوتاه، تحت سیستم تهویه اختلاطی نسبت به سیستم جابه‌جایی بیشتر است.</p>
کلمات کلیدی:	<p>سیستم تهویه جابه‌جایی سیستم تهویه اختلاطی پوشش غیر یکنواخت احساس حرارتی موضعی اتوبوس</p>

۱- مقدمه

از محیط‌های پرجمعیت خارج نماید؛ با این وجود هنوز از این نوع سیستم در بسیاری از وسایل نقلیه عمومی استفاده می‌شود. در سیستم تهویه جابه‌جایی، هوا از دریچه‌هایی نزدیک به کف وارد فضا شده و از دریچه‌هایی در ارتفاع نزدیک سقف خارج می‌شود [۱]. از جمله مزایای این سیستم می‌توان به بهبود شرایط آسایش حرارتی اشاره کرد [۲]. با توجه به لزوم تأمین هوای با کیفیت بالا در محل حضور افراد، استفاده از این سیستم تهویه در فضاهای پرجمعیت مانند سینماها، تئاتر و سالن‌های اجتماعات بسیار متداول است. یکی از مکان‌های پرجمعیت و در معرض آلاینده‌ها، فضاهای وسایل نقلیه عمومی مانند اتوبوس‌ها و قطارهای شهری هستند که لازم است به یک سیستم تهویه مناسب مجهز شده تا شرایط آسایش حرارتی مناسب برای مسافران فراهم گردد.

بهبود شرایط آسایش حرارتی در وسایل نقلیه عمومی به دلیل محدودیت‌های طراحی در جانمایی دریچه‌ها، جمعیت زیاد و یکسان نبودن شرایط برای تمامی افراد، همواره با چالش‌های زیادی روبه‌رو بوده است. یکی از رایج‌ترین وسایل نقلیه عمومی بین شهری، اتوبوس است که تأمین شرایط آسایش حرارتی مسافران، به خصوص در تابستان و در فواصل طولانی مدت از اهمیت بالایی برخوردار است. فضای داخل اتوبوس جزء فضاهای پرجمعیت محسوب شده و حرارت ورودی از طریق شیشه‌ها، سقف، کف و همچنین حرارت تولیدی توسط مسافران، تأمین شرایط آسایش حرارتی را دشوار می‌کند.

تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی شرایط آسایش حرارتی در وسایل نقلیه عمومی چندان گسترده نیست؛ با این وجود می‌توان از این میان به تحقیقات زیر اشاره کرد. منصور و همکاران [۳] یک استراتژی کنترل جهت صرفه‌جویی انرژی و افزایش آسایش حرارتی مسافران یک اتوبوس دارای سیستم تهویه جدید از سقف اتوبوس را مورد ارزیابی قرار دادند. استراتژی کنترل مورد بررسی بهبود قابل توجهی را به لحاظ آسایش حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تحت شرایط متفاوت حرارتی نشان داد. شایان ذکر است که گرمایش فضای داخل اتوبوس در زمستان توان چندانی

از سیستم‌های تهویه مرسوم در اتوبوس‌ها می‌توان به دو سیستم تهویه اختلاطی^۱ و جابه‌جایی^۲ اشاره کرد. در سیستم تهویه اختلاطی، هوا از دریچه‌های سقفی وارد فضای مورد نظر شده و از دریچه‌هایی در سقف و یا نزدیک کف خارج می‌شود. این نوع سیستم تهویه معمولاً برای محیط‌های مسکونی با میزان آلاینده‌گی کم بسیار متداول است. چرا که الگوی جریان ایجاد شده توسط این نوع از سیستم‌ها، قادر نیست که آلاینده‌ها را به خوبی

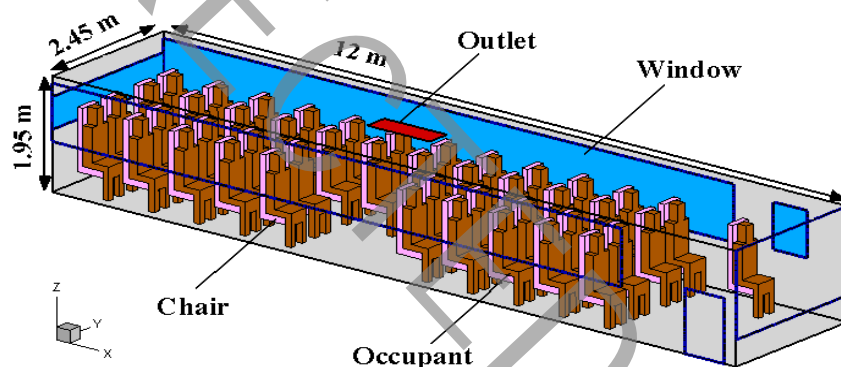
- 1 Mixing Ventilation (MV)
- 2 Displacement Ventilation (DV)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zolfaghari@birjand.ac.ir

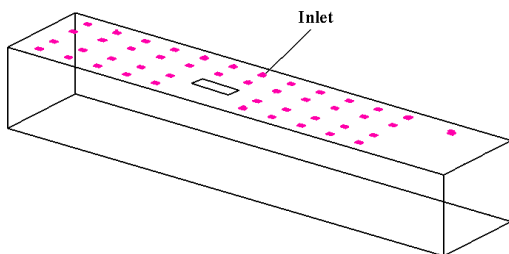
شرایط آب و هوایی گرم تطابق بیشتری با داده‌های تجربی دارد. همچنین، ایشان به منظور بهبود آسایش حرارتی مسافران، محل استقرار دریچه‌ها را تصحیح کردند. ولت و دانن [۸] شرایط آسایش حرارتی و احساس حرارتی ۲۸ مرد و ۷۲ زن درون اتوبوس الکتریکی در یک روز سرد را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، ذوالفقاری و همکاران [۹] در تحقیقی عملکرد دو سیستم تهویه اختلاطی و جابه‌جایی را در حالت سرمایش در یک اتوبوس بر احساس حرارتی مسافران برای یک نوع پوشش یکنواخت و مشخص مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در تهویه جابه‌جایی به دلیل وجود دریچه‌های ورودی در کف اتوبوس و اثرات شناوری، دمای هوا در ناحیه پای افراد حدود ۱۸ درجه سلسیوس است که در مقایسه با سایر بخش‌های بدن پایین‌تر است. همچنین، اختلاف دمای عمودی در تهویه اختلاطی بالاسری نسبت به تهویه جابه‌جایی کمی کمتر است؛ به طوری که اختلاف دمایی قسمتی‌ها در مقایسه با ناحیه سر تنها ۲ درجه سلسیوس است.

اما آنچه که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که در وسایل حمل و نقل عمومی معمولاً افراد از نظر شرایط بدنی و میزان پوشش لباس شرایط یکسانی ندارند. علاوه بر این، پوشش بخش‌های مختلف بدن برای یک شخص نیز یکسان نیست. پوشش یک بخش از بدن نه تنها بر روی احساس حرارتی آن بخش بلکه بر احساس کل بدن تاثیرگذار است. همچنین دما

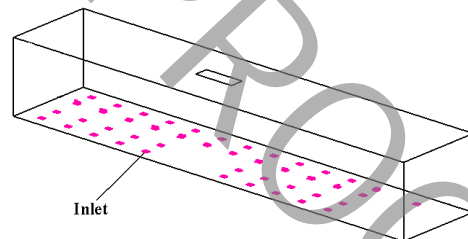
را بر موتور اتوبوس تحمیل نمی‌کند ولی برعکس سرمایش، بخش قابل ملاحظه‌ای از توان تولیدی اتوبوس را مصرف می‌کند. بر این اساس در اکثر مقالات به بررسی تهویه اتوبوس در فصول گرم پرداخته‌اند. لین و همکاران [۴] به ارزیابی آسایش حرارتی مسافران داخل اتوبوس و قطار در مسیرهای کوتاه و بلند با استفاده از روش پیمایش میدانی (جواب دادن به پرسش‌نامه) همراه با اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت هوا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دمای هوای بالا در فضا، تابش شدید و جابه‌جایی هوای کم، دلایل احساس حرارتی نامطلوب مسافران است. ریچی و کلودیک [۵] یک مدل عددی برای پیش‌بینی آسایش حرارتی در اتوبوس‌ها توسعه دادند. از مزایای مدل آن‌ها می‌توان به توانایی محاسبه بارهای حرارتی ناشی از مسافران و تابش خورشید و شبیه‌سازی تأثیر توزیع هوا داخل اتوبوس بر آسایش حرارتی مسافران را نام برد. پالا و ریدوان [۶] به بررسی آسایش حرارتی داخل یک اتوبوس در یک شرایط آب و هوایی گرم با استفاده از مدل آسایش حرارتی گایج^۱ پرداختند. آن‌ها یک مدل ریاضی بر پایه یک روش تجربی را برای استفاده مهندسان تهویه مطبوع خودرو و پژوهش‌گران مرتبط با زمینه آسایش حرارتی وسایل نقلیه ارائه کردند. دیتان کار و همکاران [۷] روشی را برای پیش‌بینی آسایش حرارتی در داخل اتوبوس توسعه دادند و نشان دادند که روش ارائه شده برای سرمایش در



(الف) اتوبوس مدل‌سازی شده و جایگاه صندلی مسافران

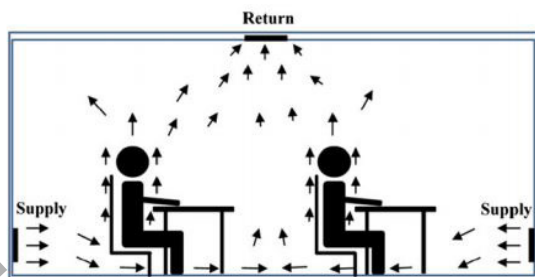


(ج) دریچه‌های ورود در سیستم تهویه اختلاطی



(ب) دریچه‌های ورود در سیستم تهویه جابه‌جایی

شکل ۱: نمای کلی اتوبوس مورد بررسی و وضعیت جانمایی دریچه‌ها



شکل ۳: تهویه جابه‌جایی

وسایل حمل و نقل عمومی مانند اتوبوس‌ها) خارج کند. با این وجود، هنوز از این نوع سیستم در بسیاری از وسایل نقلیه عمومی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، در سیستم تهویه جابه‌جایی، هوا از دریچه‌هایی نزدیک به کف (و در مواردی از کف) وارد فضا شده و از دریچه‌هایی در سقف خارج می‌شود. این نوع از سیستم تهویه، دارای راندمان بالاتری در خارج کردن آلاینده‌ها از فضای داخلی است. با توجه به کیفیت بالای هوای داخل در محل حضور افراد، استفاده از این سیستم تهویه در فضاهای پرجمعیت مانند سینماها، تئاتر و سالن‌های اجتماعات بسیار متداول است. در تحقیق حاضر سعی شده است تا عملکرد هر دو نوع سیستم تهویه مذکور بر شرایط آسایش حرارتی کلی و موضعی افراد دارای پوشش ناهمگون مورد بررسی قرار گیرد.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم در این تحقیق به دو دسته تقسیم شده است. بخش اول معادلات حاکم بر جریان شامل معادله بقای جرم، معادله ممنتوم و معادله بقای انرژی است و بخش دوم معادلات مربوط به احساس حرارتی افراد است که در ادامه ارائه می‌شوند.

۳-۱- معادلات حاکم بر جریان

برای یک جریان پایا، غیر قابل تراکم با خواص ثابت، معادلات حاکم به صورت زیر هستند.
معادله بقای جرم:

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادلات اندازه حرکت خطی:

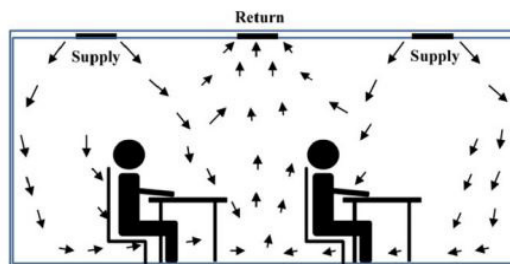
$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \vec{s} \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + s_T \quad (3)$$

همچنین

\vec{s} بیان‌گر نیروی شناوری وارده بر واحد حجم سیال است که به کمک



شکل ۲: تهویه اختلاطی

و سرعت هوای اطراف بخش‌های مختلف نیز با یکدیگر تفاوت دارد. لذا مجموع این عوامل باعث تفاوت در احساس حرارتی بخش‌های مختلف و در نهایت احساس حرارتی کلی می‌شود. بر همین اساس، در تحقیق حاضر احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن در دو پوشش مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از مدل ۶۵ نقطه‌ای تانابه استفاده شده که در ادامه به تفصیل معرفی خواهد شد.

۲- فضای نمونه

فضای نمونه در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، اتوبوس اسکانیا مدل ۴۲۱۲ است که یکی از رایج‌ترین اتوبوس‌های مورد استفاده در ایران است. ابعاد طول، عرض و ارتفاع فضای داخلی آن به ترتیب برابر با ۱۲، ۲/۴۵ و ۱/۹۵ متر می‌باشند. گنجایش این اتوبوس ۴۴ مسافر است که با احتساب راننده به ۴۵ نفر می‌رسد. شماتیک اتوبوس و نحوه چیدمان صندلی‌ها در شکل ۱- الف نشان داده شده است. در این اتوبوس، هوا از ۴۵ دریچه مستطیل شکل کوچک وارد فضا شده و از دریچه مستطیلی بزرگی مستقر بر روی سقف خارج می‌شود. دریچه‌های ورود هوا در سیستم تهویه اختلاطی بالاسری بر روی سقف و نزدیک به سر مسافران و در سیستم تهویه جابه‌جایی کفی بر روی کف اتوبوس، زیر صندلی و نزدیک به پای مسافران قرار گرفته است. دریچه‌های ورودی مستطیلی دارای ابعاد ۰/۱۲ متر در ۰/۱۶ متر و دریچه خروجی به ابعاد ۱/۱ متر در ۰/۳۸ متر هستند. جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی این دو سیستم به ترتیب در شکل ۱ قسمت (ب) و (ج) نشان داده شده است.

همانطور که در بالا مختصراً اشاره شد، سیستم‌های تهویه مکانیکی متداول که امروزه در وسایل نقلیه عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند، غالباً در دو دسته سیستم‌های تهویه اختلاطی و سیستم‌های تهویه جابه‌جایی دسته‌بندی می‌شوند. طبق تعریف، در سیستم تهویه اختلاطی، هوا از سقف (یا نزدیک به سقف) وارد فضای مورد نظر شده و غالباً از دریچه‌هایی در سقف (و در مواردی از دریچه‌های نزدیک کف) خارج می‌شود (شکل ۲). این نوع سیستم تهویه معمولاً برای محیط‌های مسکونی با میزان آلاینده‌گی کم، بسیار متداول است؛ چرا که الگوی جریان ایجاد شده توسط این نوع سیستم تهویه، قادر نیست آلاینده‌ها را به خوبی از محیط‌های پر جمعیت (و همچنین

Central blood :

$$C(65) \frac{dT(65)}{dt} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 B(i, j) \quad (10)$$

در روابط فوق، $Q(i, j)$ برابر مجموع حرارت تولید شده توسط سازوکارهای فعالیت بدنی و لرز است که فقط در لایه ماهیچه تولید می‌شود. عبارت $B(i, j)$ نیز بیانگر میزان حرارت انتقال یافته به‌وسیله جریان خون بین بخش‌ها و لایه‌های مختلف بدن است. همچنین میزان حرارت انتقال یافته از طریق هدایت بین لایه‌های مختلف هر بخش بدن توسط عبارت $D(i, j)$ بیان می‌شود. $RES(2,1)$ نیز نشان دهنده میزان حرارت اتلافی از طریق تنفس است که تنها از لایه مرکزی بخش سینه خارج می‌شود. همچنین اتلاف حرارت تبخیری و انتقال حرارت محسوس از روی پوست به ترتیب توسط عبارت‌های $E(i, 4)$ و $Q_i(i, 4)$ بیان می‌شوند. معادله (۱۰) نیز تغییرات دمای خون را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه عبارت‌های به کار رفته در معادلات توازن حرارت در ۶۵ نقطه بدن در مرجع [۹] به‌طور کامل شرح داده شده است.

۴- روش حل و شرایط مرزی

۴-۱- روش حل عددی

در تحقیق حاضر برای رسم هندسه و شبکه‌بندی از نرم‌افزار کمکی سالوم استفاده شده است. لذا برای حل مسئله، یک شبکه بندی غیر سازمان یافته ایجاد شده است که در نواحی با گرادیان زیاد مانند دریچه‌های ورود و خروج هوا و مجاور منابع گرمایی تراکم شبکه محاسباتی افزایش یافته است. همچنین، به منظور انتخاب شبکه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی عددی مسئله، استقلال نتایج از شبکه مورد بررسی قرار گرفته است که در نهایت، شبکه‌ای با ۴/۵ میلیون سلول محاسباتی به عنوان شبکه مناسب برای انجام محاسبات انتخاب شده است.

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از حلگر عددی اپن‌فوم و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل فوم استفاده شده است. حلگر مذکور برای حل عددی از روش حجم محدود استفاده می‌کند. ضمن این‌که در این حلگر از تقریب بوزینسک برای در نظر گرفتن اثرات جابه‌جایی طبیعی در معادله جریان و از الگوریتم سیمپل برای تصحیح جفت شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی و بررسی توانایی مدل‌های استفاده شده، در شکل ۴ نتایج حلگر با نتایج آزمایشگاهی کوباباشی [۱۴] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی نسبتاً مناسبی میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی به چشم می‌خورد. همچنین برای ارزیابی احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن از مدل ۶۵ نقطه‌ای نوشته شده توسط نویسندگان این مقاله به وسیله نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

در این قسمت برای بررسی صحت نتایج حاصل از مدل ۶۵ نقطه‌ای

تقریب بوزینسک به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\bar{s} = \rho \bar{g} [1 - \beta(T - T_0)] \quad (4)$$

در این رابطه β ضریب انبساط حجمی و \bar{g} بردار شتاب جاذبه زمین است. μ_{eff} لزجت مؤثر سیال است که برای جریان آشفته به صورت حاصل جمع لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال بیان می‌شود. لزجت اغتشاشی سیال با استفاده از مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد محاسبه می‌شود:

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (5)$$

۳-۲- معادلات مدل ۶۵ نقطه‌ای تانابه

از آنجایی که هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی شرایط آسایش حرارتی موضعی در بخش‌های مختلف بدن و تأثیر پوشش بر درک حرارتی افراد است، لذا در این تحقیق، از مدل آسایش حرارتی ۶۵ نقطه‌ای تانابه و همکاران [۱۰] که توسعه یافته مدل استالویچک [۱۱ و ۱۲] می‌باشد، استفاده شده است. در مدل ۶۵ نقطه‌ای، بدن به شانزده بخش (سر، سینه، پشت، لگن، بازوها، ساعدها، دست‌ها، ران‌ها، ساق‌ها و پاها)، تقسیم می‌شود که هر بخش خود دارای چهار لایه (مرکز، ماهیچه، چربی و پوست) می‌باشد. ۶۵ امین بخش این مدل، خون است که ارتباط دهنده بین اجزا و لایه‌های مختلف بدن می‌باشد. حرارت بین بافت‌های مختلف از طریق انتقال حرارت هدایت مبادله می‌شود. تبادل حرارت بدن شخص و محیط اطراف از طریق جابه‌جایی، تابش، تبخیر و تنفس انجام می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش و همچنین مقاومت لباس به کمک آزمایش استخراج شده است [۱۳].

۳-۲-۱- معادلات موازنه انرژی برای ۶۵ نقطه بدن

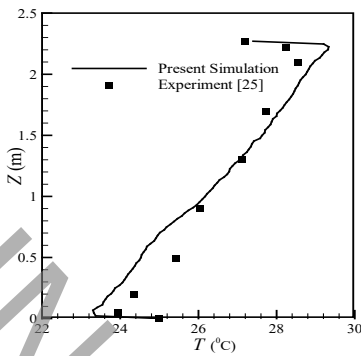
معادلات موازنه انرژی بین چهار لایه مرکز، ماهیچه، چربی، پوست و بخش خون به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Core layer : } C(i, 1) \frac{dT(i, 1)}{dt} = Q(i, 1) - B(i, 1) - D(i, 1) - RES(i, 1) \quad (6)$$

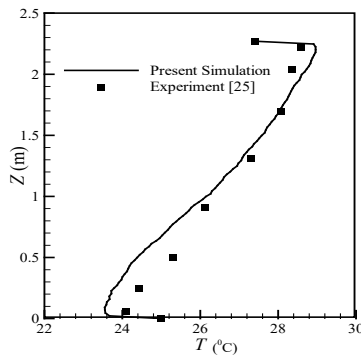
$$\text{Muscle layer : } C(i, 2) \frac{dT(i, 2)}{dt} = Q(i, 2) - B(i, 2) - D(i, 2) + D(i, 1) \quad (7)$$

$$\text{Fat layer : } C(i, 3) \frac{dT(i, 3)}{dt} = Q(i, 3) - B(i, 3) - D(i, 3) + D(i, 2) \quad (8)$$

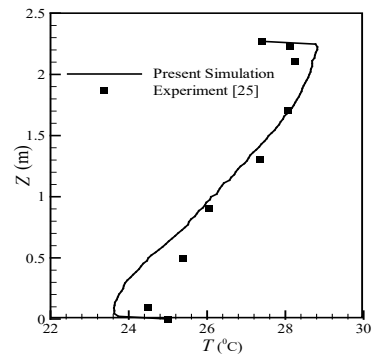
$$\text{Skin layer : } C(i, 4) \frac{dT(i, 4)}{dt} = Q(i, 4) - B(i, 4) + D(i, 3) - Q_i(i, 4) - E(i, 4) \quad (9)$$



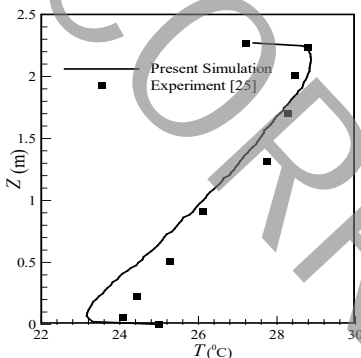
(ج) $x = 0.186m, z = 1.125$



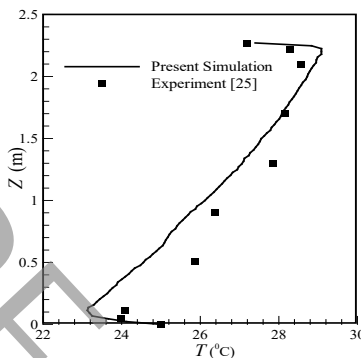
(ب) $x = 2.58m, z = 3.45$



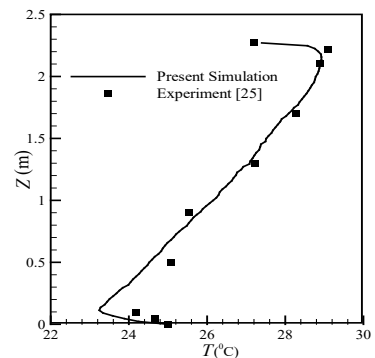
(الف) $x = 2.58m, z = 0.65$



(و) $x = 2.58m, z = 2.435$



(ه) $x = 1.72m, z = 1.125$



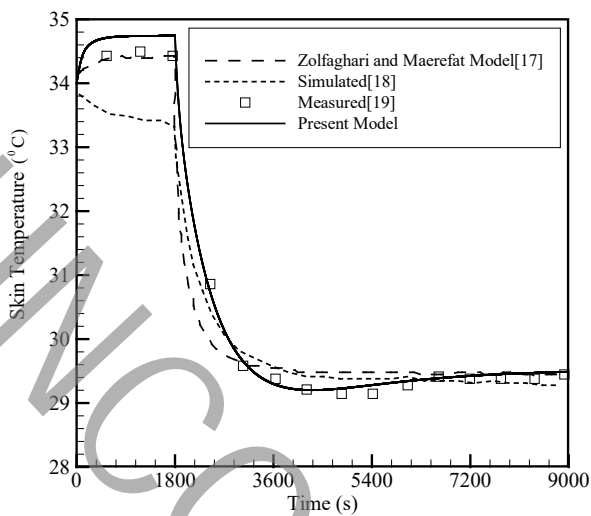
(د) $x = 4.3m, z = 1.125$

شکل ۴: اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در نواحی مختلف با استفاده از نمودار توزیع دما [۱۴]

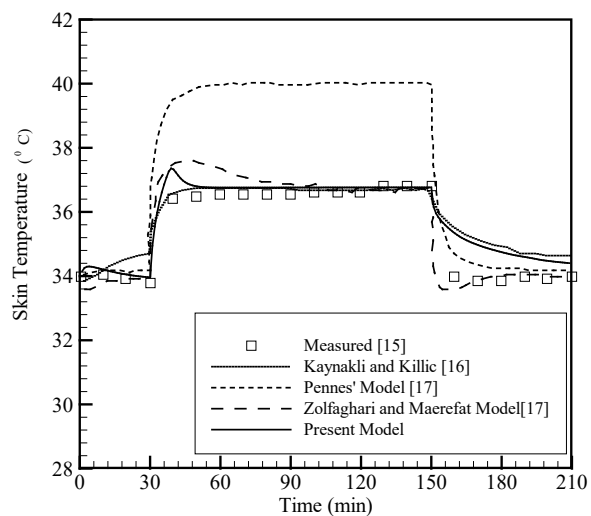
۴-۲- شرایط حل مساله

در این تحقیق، عملکرد سیستم‌های تهویه جابه‌جایی و اختلاطی در شرایط سرمایش با توجه به توان مصرفی زیاد حالت سرمایش نسبت به گرمایش، برای یک اتوبوس متداول مورد تحلیل قرار گرفته است. بر این اساس، طبق فرضیات انجام شده در تحقیقات مشابه و با توجه به مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده اتوبوس و اعمال شرایط طرح خارج، از شرط مرزی شار ثابت برای شیشه‌های جانبی، دیوارها، سقف و کف اتوبوس به ترتیب برابر با ۲۰، ۱۰، ۵ و ۵ وات بر متر مربع استفاده شده است. همچنین، شرط شار ثابت ۵۰ وات بر متر مربع روی شیشه جلو اتوبوس در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه نرخ متابولیک تمامی افرادی که در اتوبوس هستند در حالت نشسته برابر ۱ met فرض شده است. همچنین، ابعاد دریاچه‌ها و سرعت ورودی در هر دو حالت سیستم تهویه به گونه‌ای تعیین شده است که مطابق با استاندارد اشری [۲۰] برای وسایل نقلیه مقدار ۲۰ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر هوای تازه تأمین شود. دمای هوای ورودی از دریاچه‌ها در دو حالت برابر ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. ضمناً وضعیت آسایشی افراد حاضر برای دو پوشش متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر دو حالت پوشش افراد شامل شلوار، جوراب، کفش و پیراهن در نظر

که توسط نویسندگان این مقاله در نرم‌افزار متلب توسعه یافته است، به مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی پرداخته می‌شود. اولین مقایسه با داده‌های تجربی استالویچک و هاردی [۱۵] انجام گرفته است. در آزمایشات استالویچک و هاردی [۱۵] افراد ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در شرایط دمای ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰٪ قرار دارند. سپس، به مدت دو ساعت به محیطی با دمای ۴۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۰ درصد منتقل می‌شوند و پس از آن به مدت یک ساعت به محیط اولیه بازگردانده می‌شوند. در شکل ۵-الف نتایج حاصل از کد مدل تانابه در تحقیق حاضر با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط استالویچک و هاردی [۱۵]، داده‌های شبیه‌سازی توسط کایناکلی و کیلیک [۱۶]، مدل پس و مدل ارائه شده توسط ذوالفقاری و معرفت [۱۷] مقایسه شده است. همچنین، در شکل ۵-ب به مقایسه نتایج حل گذرا مدل ۶۵ نقطه‌ای حاضر با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شده است که در این بررسی ابتدا فرد به مدت ۳۰ دقیقه در محیطی با دمای ۳۰ حضور می‌یابد و به دنبال آن، به مدت ۱۲۰ دقیقه در معرض یک محیط سرد با دمای ۴/۷ قرار می‌گیرند. در این مقایسه، نتایج حاصل از کد مدل تانابه در تحقیق حاضر با نتایج آزمایش‌های گوردون و همکاران [۱۸] و نتایج شبیه‌سازی شده توسط فریرا و یاناکیهارا [۱۹] مورد مقایسه قرار گرفته است.



(ب)



(الف)

شکل ۵: بررسی صحت مدل ۶۵- نقطه‌ای در مقایسه با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی

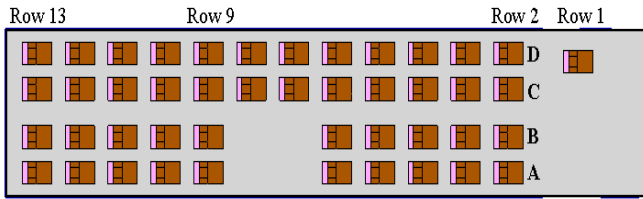
سیستم تهویه تعیین شود. در شکل ۷ توزیع دما در ناحیه حضور افراد نشان داده شده است. بر اساس توزیع دما و شاخص آسایش حرارتی نشان داده شده، هر دو سیستم تهویه، وضعیت نسبتاً مطلوبی را در همه ردیف‌ها به وجود آورده است. با این حال، سیستم تهویه جابه‌جایی با فراهم آوردن شرایط دمایی در حدود ۲۱ درجه‌ی سلسیوس در تمامی ردیف‌ها، وضعیت یکنواخت‌تری بین ردیف‌های اتوبوس ایجاد کرده است. در شکل ۷ (الف) و (ب) توزیع دما در صفحه $y=0/96$ m به ترتیب در دو سیستم تهویه اختلاطی و جابه‌جایی نشان داده شده است. به دلیل گستردگی نتایج و به منظور خلاصه کردن آنها، تنها به بیان نتایج در دو ردیف پرداخته شده است. مطابق شکل ۷، در دو ردیف ۹ و ۲ بیشترین اختلاف دما بین نتایج حاصل از دو سیستم تهویه مذکور مشاهده می‌شود. لذا این دو ردیف برای نمونه انتخاب و فقط نتایج افراد حاضر در جایگاه A ارائه می‌شود.

در شکل ۹ دمای بخش‌های مختلف بدن در دو حالت لباس آستین‌دار و بدون آستین برای افراد حاضر در جایگاه A در دو ردیف ۲ و ۹ برای دو سیستم تهویه اختلاطی بالاسری و جابه‌جایی کفی نشان داده شده است. در نمودار توزیع دمایی ارائه شده برای هر دو ردیف ۲ و ۹ در سیستم جابه‌جایی کفی (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب) می‌توان مشاهده نمود که دمای بخش‌های تحتانی بدن مانند پاها و ساق‌ها تقریباً ۳۳ درجه سلسیوس است که در حدود ۲ درجه سلسیوس کمتر از سایر بخش‌های بدن و حتی سر می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان نزدیکی درجه‌های خروجی به این بخش‌ها و حرکت هوای سرد به سمت پایین دانست. ضمن اینکه مقایسه دمایی این بخش‌ها برای فرد مستقر در جایگاه A ردیف ۲ در سیستم تهویه اختلاطی بالاسری (شکل‌های ۹-ج) نشان می‌دهد که دمای بخش‌های تحتانی بدن در فاصله

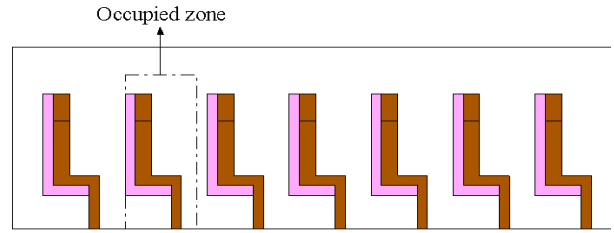
گرفته شده است. ولی در حالت اول پیراهن به صورت آستین بلند و در حالت دوم پیراهن به صورت نیم آستین فرض شده است.

۵- بحث و نتایج

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی اثرات عدم یکنواختی پوشش افراد بر احساس حرارتی کلی بدن در یک اتوبوس با دو سیستم تهویه جابه‌جایی کفی و اختلاطی بالاسری است. عوامل بسیاری بر درک حرارتی افرادی از محیط اطراف و احساس حرارتی آنها تأثیرگذار است که از این میان می‌توان به دو عامل مهم پوشش و مقاومت لباس اشاره کرد. از آنجایی که پوشش لباس فرد برای هر بخش از بدن متفاوت است، در نتیجه حساسیت هر بخش از بدن نیز نسبت به شرایط محیط اطراف متفاوت است. از طرف دیگر در یک محیط شلوغ همواره تأمین شرایط یکنواخت محیطی برای تمامی افراد حاضر امکان‌پذیر نیست، زیرا دما و سرعت جریان در نزدیکی بخش‌های مختلف بدن متفاوت است و این امر می‌تواند سبب ایجاد نارضایتی حرارتی موضعی در بخش‌هایی از بدن شود که به دلیل عدم پوشش در این بخش‌ها، میزان این نارضایتی تا حد بسیار زیادی افزایش می‌یابد. به این دلیل در این مطالعه، اثرات پوشش لباس بر احساس حرارتی افراد مورد بررسی قرار گرفته است. به بیان دیگر، در این تحقیق اثرات لباس آستین‌دار و بدون آستین بر احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن و تأثیر آن بر روی احساس حرارتی کل بدن بررسی شده است. مطابق شکل ۶-الف ناحیه حضور افراد برای هر ردیف به صورت مجزا تعریف شده است. ردیف‌ها و جایگاه‌های صندلی‌ها مطابق شکل ۶-ب نامگذاری شده است. در ابتدا لازم است، متوسط دما در ناحیه حضور افراد برای هر دو



(ب) ردیف و جایگاه هر صندلی



(الف) ناحیه حضور افراد تعیین شده برای هر ردیف

شکل ۶: مشخصات کلی انتخابی برای ردیف و جایگاهها در اتوبوس

حالت سیستم تهویه کمتر از سایر بخش‌های بدن است. علاوه بر این، با توجه به نمودارهای شکل ۹، دمای سطح پوست بازوها در حالت لباس بدون آستین در مقایسه با حالت آستین‌دار که تقریباً ۳۴/۵ درجه سلسیوس است، در حدود ۲/۵ درجه سلسیوس کاهش پیدا کرده است. از طرفی با توجه به دمای سطح پوست سایر بخش‌ها مشاهده می‌شود که عدم پوشش بازوها تاثیری هر چند کم بر دمای سایر بخش‌ها دارد.

با توجه به شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که دمای سطح پوست بخش سر در تمامی موارد دارای مقداری ثابت و حدود ۳۴ درجه سلسیوس بوده، که دلیل این امر را می‌توان به توانمندی فیزیولوژیکی بدن در ثابت نگه داشتن دمای سر با توجه به فاقد پوشش بودن این بخش در اکثر مواقع بیان نمود. در صورتی که دمای سطح پوست برای بخش ساعدها در دو حالت لباس آستین‌دار و بدون آستین (ساعدها فاقد پوشش‌اند) در حدود ۲ درجه سلسیوس با یکدیگر تفاوت دارند.

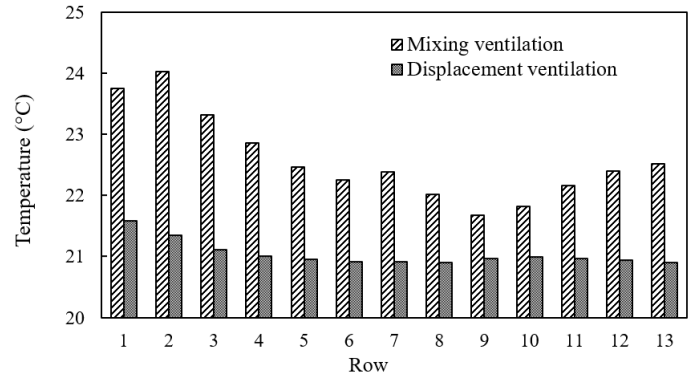
در تحقیق حاضر، به منظور بررسی احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن، از معیار ارائه شده توسط جین و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۲ استفاده شده است. ایشان رابطه (۱۱) را برای بیان احساس حرارتی فرد در بخش‌های مختلف بدن و رابطه (۱۲) را نیز برای بیان احساس حرارتی کلی بدن ارائه نمودند:

$$TSV_i = \begin{cases} +3 & \Delta T_i > \ln 4 / W_i \\ \left[\exp(W_i \Delta T_i) - 1 \right] - (k_{1,i} \Delta T_i + A_i) \Delta T_{mean} & 0 \leq \Delta T_i \leq \ln 4 / W_i \\ \left[1 - \exp(C_i \Delta T_i) \right] - (k_{2,i} \Delta T_i + A_i) \Delta T_{mean} & \ln 4 / C_i \geq \Delta T_i \geq 0 \\ -3 & \Delta T_i < \ln 4 / C_i \end{cases} \quad (11)$$

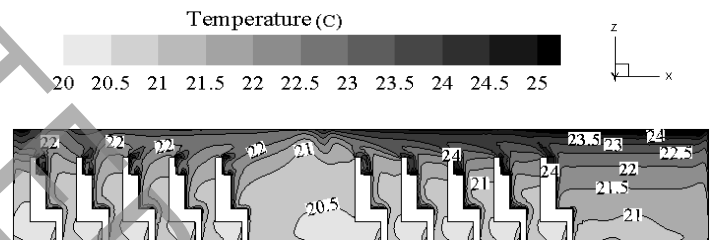
$$TSV_o = \sum_{i=1}^n w_i TSV_i \quad (12)$$

که در رابطه (۱۱)، W_i ، C_i ، $k_{1,i}$ ، $k_{2,i}$ و A_i ضرایب رگرسیون برای هر بخش بدن است و ΔT_i اختلاف میان دمای پوست هر بخش و دمای خنثی پوست هر بخش و ΔT_{mean} نیز اختلاف میان دمای متوسط پوست و دمای میانگین خنثی پوست است که در مرجع [۲۱] آورده شده است. همچنین در رابطه (۱۲)،

TSV_o بیانگر احساس حرارتی کلی بدن و w_i ضریب وزنی مربوط به هر بخش است که در مرجع [۲۱] ذکر شده است و TSV_i نیز احساس حرارتی مربوط به هر بخش از بدن است که محدوده مجاز تعیین شده برای بیان رأی احساس حرارتی هر بخش بین ۳- تا ۳+ می‌باشد.



شکل ۷ نمودار توزیع دما در ردیف‌های مختلف اتوبوس برای دو سیستم تهویه مورد استفاده



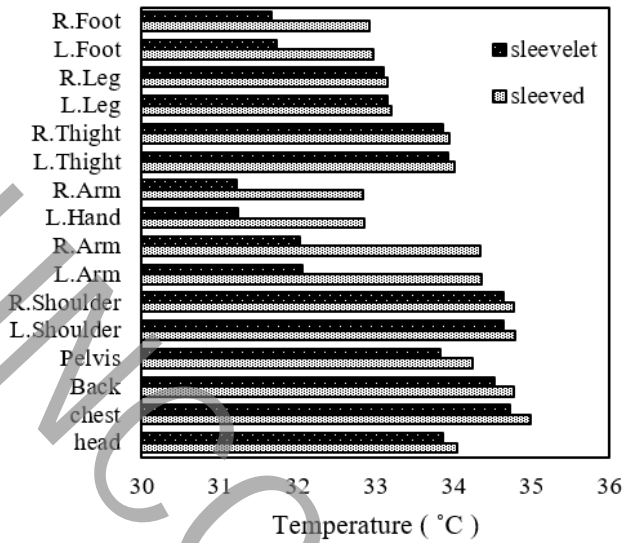
(الف) سیستم تهویه اختلاطی



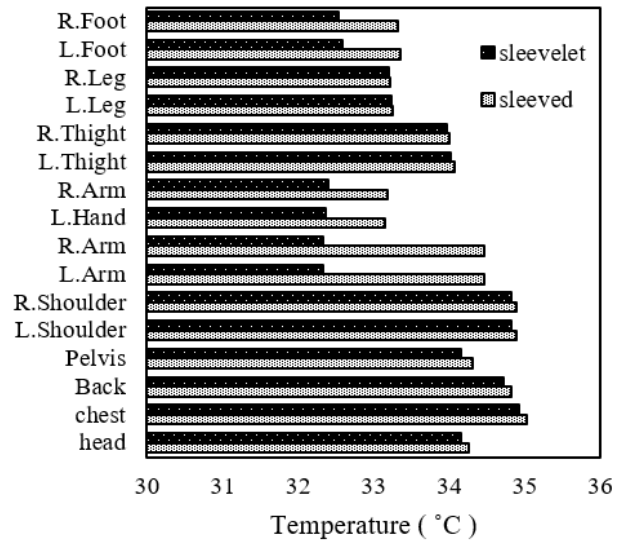
(ب) سیستم تهویه جابه‌جایی

شکل ۸ توزیع دما در اتوبوس برای دو سیستم تهویه مختلف (الف) سیستم تهویه اختلاطی (ب) سیستم تهویه جابه‌جایی.

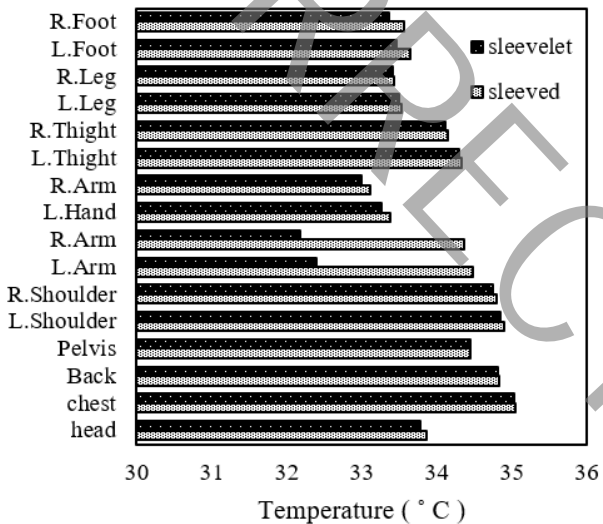
بین ۳۴ تا ۳۵ درجه سلسیوس واقع شده‌اند که در مقایسه با دمای این بخش‌ها برای فرد یکسان در سیستم تهویه جابه‌جایی کفی (شکل‌های ۹-الف) افزایش یافته است و دلیل این امر، جانمایی دریچه‌های ورودی در سقف اتوبوس و دور بودن از این بخش‌ها در مقایسه با سیستم جابه‌جایی کفی می‌باشد. همچنین، دمای بخش‌های فاقد پوشش از جمله دست‌ها در هر دو



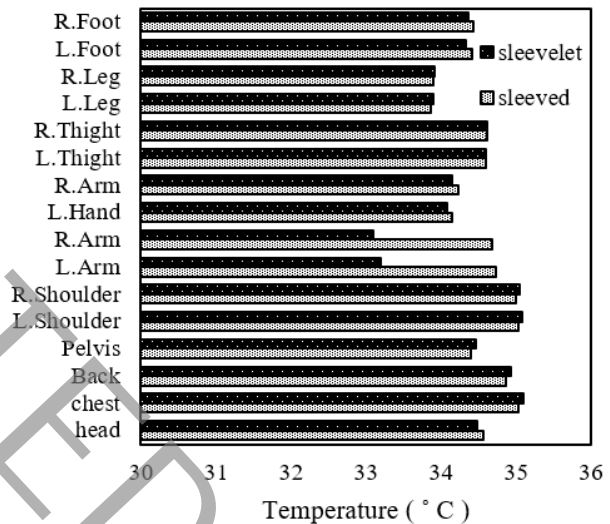
(ب) سیستم تهویه جابه‌جایی برای نفر جایگاه A ردیف ۹



(الف) سیستم تهویه جابه‌جایی برای نفر جایگاه A ردیف ۲



(د) سیستم تهویه اختلاطی برای نفر جایگاه A ردیف ۹

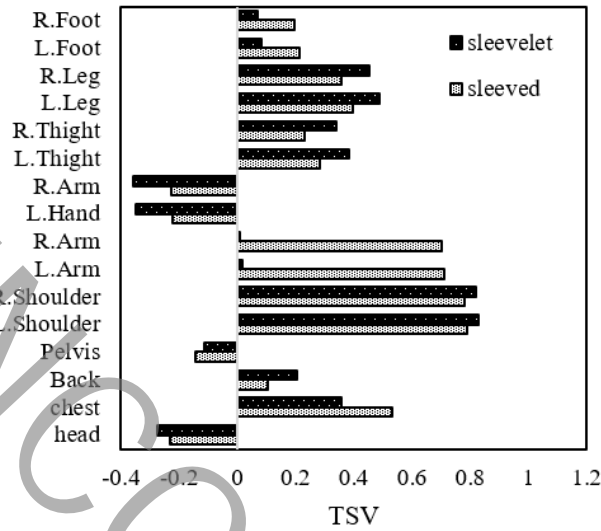


(ج) سیستم تهویه اختلاطی برای نفر جایگاه A ردیف ۲

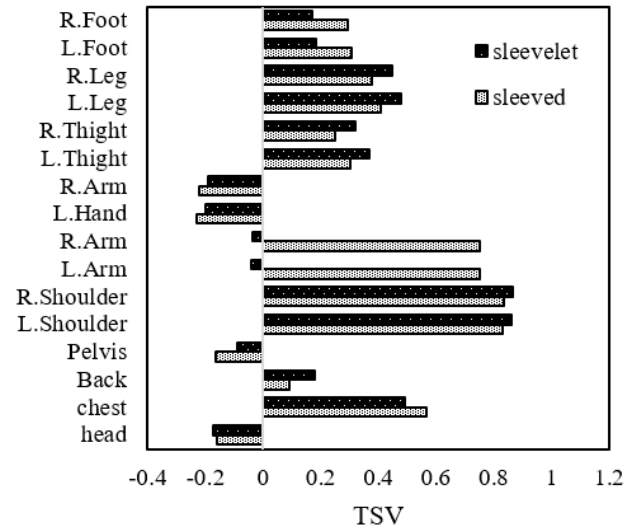
شکل ۹: دمای بخش‌های مختلف بدن در دو حالت لباس بدون آستین و آستین‌دار

سبب ایجاد نارضایتی موضعی در فرد و در نهایت ایجاد نارضایتی کلی بدن شود. همچنین با بررسی احساس حرارتی افراد در هر دو حالت سیستم تهویه، مشاهده می‌شود که احساس حرارتی بخش‌های تحتانی بدن در حالت تهویه جابه‌جایی کفی نشان داده شده در شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب، به دلیل جانمایی دریچه‌ها در کف اتوبوس در مقایسه با شکل‌های ۸-ج و ۸-د که مربوط به حالت تهویه اختلاطی بالاسری می‌باشد، خنک‌تر است؛ به‌گونه‌ای که در حالت تهویه اختلاطی بیشینه شاخص احساس حرارتی ۱/۱ است که مربوط به قسمت ساق فرد جایگاه A در ردیف دو است که این مقدار برای فرد و همچنین بخش یکسان در حالت تهویه جابه‌جایی برابر ۰/۴ است. در شکل ۱۱ احساس حرارتی کل بدن در دو حالت لباس آستین‌دار و

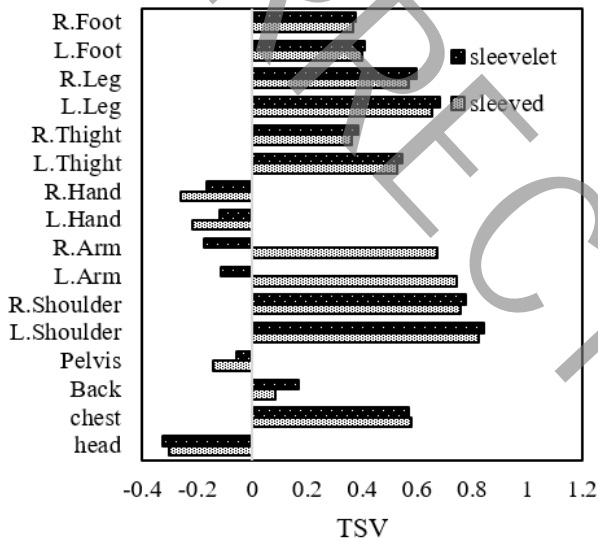
در شکل ۱۰ احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن در دو حالت لباس آستین‌دار و بدون آستین برای افراد حاضر در جایگاه A در دو ردیف ۲ و ۹ تحت دو سیستم تهویه اختلاطی و جابه‌جایی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش‌های فاقد پوشش همواره در هر دو حالت سیستم تهویه از احساس حرارتی کمتر از مقدار صفر برخوردارند و بر این اساس، امکان ایجاد نارضایتی در این بخش‌ها بسیار محتمل است. از طرفی شاخص رأی احساس حرارتی مربوط به بخش ساعد تمامی افراد در حالت دارای پوشش حدود ۰/۶ تا ۰/۸ است که در مقایسه با حالت بدون پوشش تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد؛ به‌گونه‌ای که در حالت بدون پوشش رأی احساس حرارتی این بخش کمتر از مقدار صفر است که این امر می‌تواند



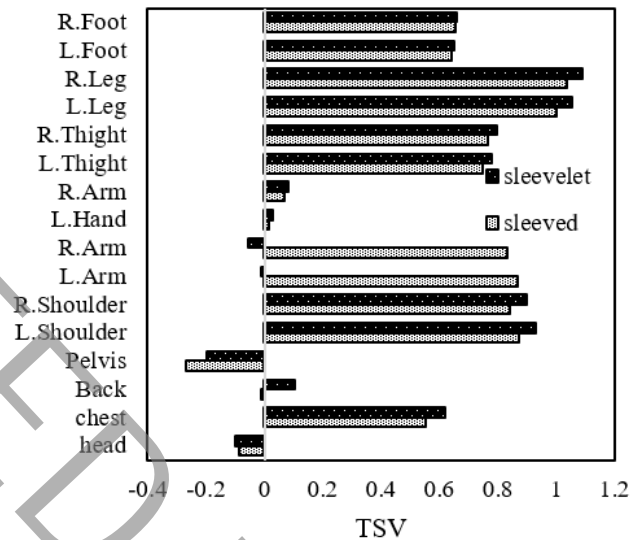
(ب) سیستم تهویه جابه‌جایی برای نفر جایگاه A ردیف ۹



(الف) سیستم تهویه جابه‌جایی برای نفر جایگاه A ردیف ۲



(د) سیستم تهویه اختلاطی برای نفر جایگاه A ردیف ۹

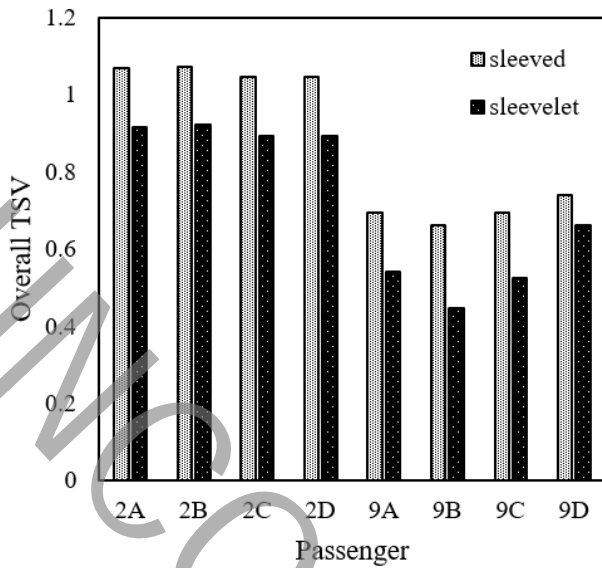


(ج) سیستم تهویه اختلاطی برای نفر جایگاه A ردیف ۲

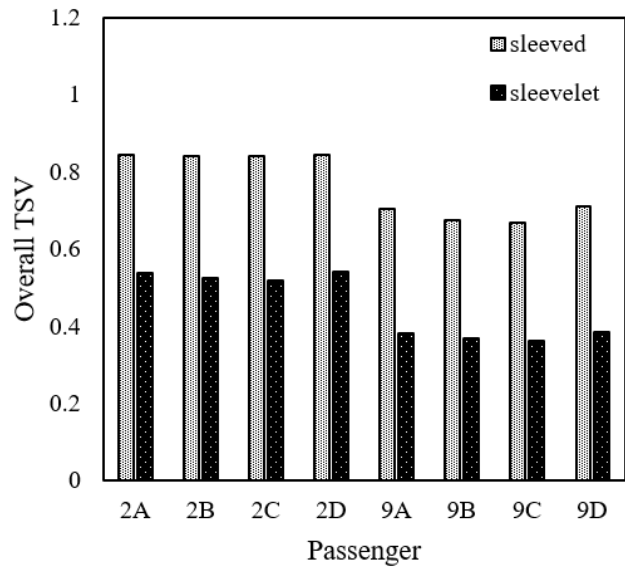
شکل ۱۰ احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن در دو حالت لباس بدون آستین و آستین‌دار

آستین، به‌طور متوسط ۰/۷ و ۰/۴ بوده و در هر ردیف میزان احساس حرارتی کلی بدن افراد تفاوت چندانی ندارد. با مقایسه احساس حرارتی کلی بدن افراد در دو سیستم تهویه به‌کار گرفته شده و با توجه به کاربرد سرمایه‌ی بودن دو سیستم، می‌توان دریافت که سیستم تهویه جابه‌جایی با میانگین احساس حرارتی کلی پایین‌تر نسبت به سیستم تهویه اختلاطی بالاسری توانسته شرایط مطلوب‌تری را فراهم کند. همچنین در سیستم تهویه جابه‌جایی کفی، اختلاف میان احساس حرارتی کلی بدن در دو ردیف در حدود ۰/۱ است که این مقدار در سیستم تهویه اختلاطی سقفی در حدود ۰/۴ است که خود تأییدی بر مناسب‌تر بودن سیستم تهویه جابه‌جایی کفی است.

بدون آستین برای تمامی افراد حاضر در دو ردیف ۲ و ۹ برای دو سیستم تهویه اختلاطی و جابه‌جایی نشان داده شده است. همچنین همانطور که قبلاً اشاره شد، دما در سیستم تهویه جابه‌جایی در حدود ۲۱ درجه سلسیوس است که در مقایسه با سیستم تهویه اختلاطی از توزیع یکنواخت‌تری برخوردار می‌باشد. این یکنواختی در وضعیت آسایشی افراد حاضر در ردیف‌های مورد بررسی نیز دیده می‌شود. بر اساس نمودارهای به دست آمده جایگزین کردن یک لباس بدون آستین با آستین‌دار، به‌طور چشمگیری بر احساس حرارتی کلی بدن تأثیر گذار است. با توجه به شکل ۱۱- الف می‌توان دریافت که میزان احساس حرارتی کلی بدن تمامی افراد برای دو حالت لباس آستین‌دار و بدون



(ب) سیستم تهویه اختلاطی



(الف) سیستم تهویه جابه جایی

شکل ۱۱: احساس حرارتی کلی بدن در دو حالت لباس بدون آستین و آستین‌دار برای (الف) سیستم تهویه جابه جایی (ب) سیستم تهویه اختلاطی

یکنواختی به سر می‌برند و سیستم تهویه جابه‌جایی کفی با توجه به توزیع دما در بخش‌های مختلف و رای احساس حرارتی موضعی و کلی بدن توانسته شرایط مناسبی را برای مسافران فراهم کند.

فهرست علائم

$B(i, j)$	نرخ تبادل مابین خون و گره (i, j) (W)
$C(i, j)$	ظرفیت گرمایی $(Wh/^\circ C)$
$D(i, j)$	نرخ تبادل حرارت هدایت با لایه مجاور (W)
$E(i, j)$	اتلاف حرارت تبخیری از سطح پوست (W)
g	شتاب گرانش (ms^2)
i	شمارشگر تعداد بخش (۱-۱۶)
j	شمارشگر لایه (۱-۴)
P	فشار (kPa)
PMV	شاخص میانگین رای پیش‌بینی شده (بی بعد)
$Q(i, j)$	نرخ تولید حرارت (W)
$Q_i(i, j)$	نرخ تبادل حرارت جابه‌جایی و تشعشعی سطح پوست و محیط (W)
$RES(2, I)$	اتلاف حرارت از طریق تنفس (W)
S	جمله چشمه (Nm^2)
T	دما $(^\circ C)$
$T(65)$	دمای خون در مرکز بدن $(^\circ C)$
$T(i, j)$	دما هر گره $(^\circ C)$

۶- نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی اثرات پوشش بر روی احساس حرارتی کلی و موضعی بخش‌های مختلف بدن در یک اتوبوس با دو نوع سیستم تهویه اختلاطی و جابه‌جایی انجام شده است. لذا دو نوع لباس آستین‌دار و بدون آستین برای بررسی این موضوع در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به توزیع دما و همچنین احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن نشان می‌دهد که سیستم تهویه جابه‌جایی با توزیع دمایی در حدود ۲۱ درجه سلسیوس در تمامی ردیف‌ها وضعیت مطلوب‌تری را بین ردیف‌های اتوبوس ایجاد کرده است؛ در حالی که در سیستم تهویه اختلاطی بالاسری، اختلاف دمایی چشم‌گیری بین ردیف‌ها دیده می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های فاقد پوشش همواره در هر دو حالت سیستم تهویه دارای احساس حرارتی خنک هستند و در نتیجه، امکان ایجاد ناراضی موضعی در این بخش‌ها وجود دارد. از طرفی رای احساس حرارتی بخش ساعد در حالتی که فرد با لباس بدون آستین می‌باشد تقریباً خنثی است که در مقایسه با حالت لباس آستین‌دار که احساس حرارتی ساعد دارای مقداری حدود ۰/۷ است، تفاوت چشمگیری نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن بود که تغییر پوشش یک بخش بدن، نه تنها بر احساس حرارتی سایر بخش‌های بدن تاثیرگذار است، بلکه باعث تغییر چشمگیری در احساس حرارتی کلی بدن می‌شود. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، سیستم تهویه جابه‌جایی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سیستم تهویه اختلاطی بالاسری از خود نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که میزان احساس حرارتی کلی افراد تحت سیستم جابه‌جایی، برای هر دو حالت پوشش فرد به‌طور متوسط ۰/۷ و ۰/۴ بوده است و همین امر نشان می‌دهد که تمامی افراد مورد مطالعه در شرایط نزدیک به هم و نسبتاً

model. *Modares Mechanical Engineering*, 2017. 17(2): p. 333-342 (in Persian).

10. Tanabe, S.-i., et al., Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 2002. 34(6): p. 637-646.
11. J.A.J, S., Mathematical Model of Thermoregulation. *Physiological and Behavioral Temperature Regulation*, 1970: p. 703-721.
12. Stolwijk, J.A.J., et al., A mathematical model of physiological temperature regulation in man. 1971: National Aeronautics and Space Administration.
13. Ichihara, M., et al., Measurement of convective and radiative heat transfer coefficients of standing and sitting human body by using a thermal manikin. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 1997. 62(501): p. 45-51.
14. Kobayashi, N. and Q. Chen, Floor-Supply Displacement Ventilation in a Small Office. *Indoor and Built Environment*, 2003. 12(4): p. 281-291.
15. Stolwijk, J.A.J. and J.D. Hardy, Temperature regulation in man — A theoretical study. *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 1966. 291(2): p. 129-162.
16. Kaynakli, O. and M. Kilic, Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 2005. 40(2): p. 165-174.
17. Zolfaghari, A. and M. Maerefat, A new simplified thermoregulatory bioheat model for evaluating thermal response of the human body to transient environments. *Building and Environment*, 2010. 45(10): p. 2068-2076.
18. Gordon, R.G., R.B. Roemer, and S.M. horvath, A mathematical model of the human temperature regulatory system--transient cold exposure response. *IEEE Transactions Biomedical Engineering*, 1976. 239(6): p. 439-44.
19. Ferreira, M.S, J.I. Yanagihara, A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009. 36(7): p. 718-724.
20. Standard, A., Standard 55-2010: "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy"; ASHRAE. Atlanta USA, 2010.
21. Jin, Q., et al., Predictive model of local and overall thermal sensations for non-uniform environments. *Building and Environment*, 2012. 51: p. 330-344

V سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

α نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})

β ضریب انبساط حجمی ($\text{K}/1$)

ρ چگالی (kg/m^3)

ρC ظرفیت گرمایی حجمی خون ($\text{Wh}/(\text{lit}^\circ\text{C})$)

μ ضریب لزجت دینامیکی (kg/ms)

مراجع

1. Awbi, H.B., *Ventilation of buildings*. 2003: Taylor & Francis.
2. Fathollahzadeh, M.H., G. Heidarinejad, and H. Pasharshahi, Investigating the effect of supply air temperature on thermal comfort and indoor air quality for a displacement ventilated room in summer. *Modares Mechanical Engineering*, 2014. 14(9): p. 35-44.
3. Mansour, K.M., et al., Development of novel control strategy for multiple circuit, roof top bus air conditioning system in hot humid countries. *Energy Conversion and Management*, 2008. 49(6): p. 1455-1468.
4. Lin, T.-P., et al., Passenger thermal perceptions, thermal comfort requirements, and adaptations in short- and long-haul vehicles. *International Journal of Biometeorology*, 2010. 54(3): p. 221-230.
5. Riachi, Y. and D. Clodic, A numerical model for simulating thermal comfort prediction in public transportation buses. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 2014. 2(1): p. 1-8.
6. Pala, U. and H.R. Oz, An investigation of thermal comfort inside a bus during heating period within a climatic chamber. *Applied Ergonomics*, 2015. 48: p. 164-176.
7. Daithankar, N., K.D. Udawant, and N.V. Karanth, Prediction of Thermal Comfort Inside a Midibus Passenger Cabin Using CFD and Its Experimental Validation. 2015. SAE Technical Paper.
8. Velt, K.B. and H.A.M. Daanen, Optimal bus temperature for thermal comfort during a cool day. *Applied Ergonomics*, 2017. 62: p. 72-76.
9. Zolfaghari, S.A., et al., Cooling performance evaluation of overhead mixing and floor displacement ventilation systems inside a bus by using 65-nodes thermal comfort

Please cite this article using:

S. A. Zolfaghari, H. Hassanzadeh, M. Taheri, M. Raeesi, M. Afzalian, Evaluating the Effect of Non-Uniform Summer Wearing on Local Thermal Sensation of Passengers in a Bus under Two Common Ventilation Systems, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-12.

DOI:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



UNCORRECTED PROOF