

مروری بر مدل‌های آسایش حرارتی

نگین معلمی خیاوی^{۱*}، سید علیرضا ذوالفقاری^۲، مهدی معرفت^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۲ استادیار دانشگاه بیرجند

^۳ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

*مسئول مکاتبات: negin.moallemi93@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

آسایش حرارتی
مدل‌های ترموفیزیولوژیکی
حسگرهای حرارتی
احساس حرارتی
رویکرد تحلیلی
رویکرد آزمایشگاهی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

آسایش حرارتی حالتی ذهنی است که میزان رضایت فرد از شرایط حرارتی محیط را بیان می‌کند. قضاوت درباره آسایش حرارتی فرایند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل فیزیکی، فیزیولوژیکی و روانشناختی قرار دارد. تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی احساس و آسایش حرارتی، شامل مطالعات تحلیلی، مطالعات آزمایشگاهی و تدوین استانداردها می‌باشد. در رویکرد تحلیلی از طریق معادلات موازنه انرژی برای بدن و یا ارزیابی پاسخ حسگرهای پوستی و نیز شبیه‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی، انتقال حرارت، پاسخ فیزیولوژیکی و توزیع دمای بافت‌های بدن پیش‌بینی می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نیز اغلب به صورت انجام آزمایش روی افراد مختلف در اتاقک‌های کنترل شده به منظور ارزیابی دمای پوست/هسته بدن و در نهایت ارائه شاخص ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی می‌باشد. در این مقاله به دسته بندی، مرور کلی و ارزیابی مزایا و محدودیت‌های مدل‌های آسایش حرارتی پرداخته شده است.

۱ مقدمه

برقراری آسایش حرارتی تأثیر مستقیم بر سلامت، آسایش، بازدهی و عملکرد افراد و ساکنان محیط دارد. به منظور دستیابی به شرایط حرارتی قابل قبول و رضایت بخش لازم است تأثیر هر یک از پارامترهای موثر بر آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گیرد که این امر با بکارگیری مدل‌های آسایش حرارتی امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین هدف از ارائه این نوشتار، مروری کلی بر مدل‌های آسایش حرارتی موجود و بررسی مزایا و معایب آنها به لحاظ میزان کارایی هر یک از آنها در محیط‌های یکنواخت، غیر یکنواخت، پایا/ناپایا و یا در محیط‌های خاص مثل محیط داخل اتومبیل می‌باشد.

۲ مدل‌های آسایش حرارتی

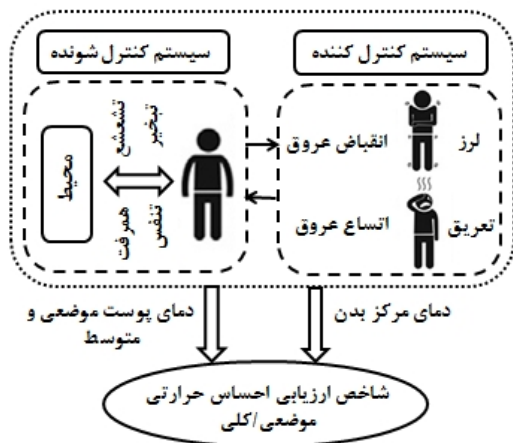
بدن انسان می‌تواند بصورت یک ماشین حرارتی در نظر گرفته شود که قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک در مورد آن صدق می‌کند. به این ترتیب که انرژی تولید شده از طریق سوخت و ساز بدن باید بطور مداوم به صورت حرارت به محیط منتقل شود و یا بدن کار انجام دهد، تا دمای بدن در شرایط طبیعی باقی بماند. در واقع قسمتی از حرارت تولید شده توسط بدن به کار مکانیکی لازم برای کنش اعضای بدن و فعالیت فرد تبدیل می‌شود و بخش دیگر آن از طریق اتلاف حرارت از پوست و اتلاف حرارت تنفسی به محیط دفع می‌گردد و باقیمانده‌ی آن در بدن ذخیره می‌شود.

به علاوه، بدن انسان خود را با محیط بوسیله یک سری فرایندهای فیزیولوژیکی پیچیده وفق می‌دهد. این فرایندها عبارتند از: تعریق، لرز، باز شدگی^۲ و جمع شدگی^۳ عروق خونی [۴].

برقراری آسایش حرارتی، یکی از اهداف اصلی سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع^۱ است. ارزیابی آسایش حرارتی فرایند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل فیزیکی، فیزیولوژیکی و روانشناختی قرار دارد. در حالت کلی آسایش حرارتی افراد تحت تأثیر شش شاخص اساسی می‌باشد که عبارتند از: چهار فاکتور فیزیکی شامل دما، سرعت هوا، متوسط دمای تابش و رطوبت نسبی؛ و دو فاکتور شخصی شامل میزان عایق لباس و میزان فعالیت شخص [۱]. بنابراین بررسی آسایش حرارتی، همواره یک موضوع جذاب و البته پیچیده برای محققان به منظور ارائه مدل‌های آسایش حرارتی برای کاربردهای نظامی و فضایی بوده است [۲]. تحقیقات انجام شده در زمینه آسایش حرارتی، شامل مطالعات تحلیلی، مطالعات آزمایشگاهی و تدوین استانداردها می‌باشد. در این میان، رویکرد تحلیلی به لحاظ صرفه جویی در زمان و هزینه، محبوبیت بیش‌تری نسبت به مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، در میان محققان و طراحان دارد [۳]. رویکرد تحلیلی بر مبنای حل معادلات موازنه انرژی برای بدن، شبیه‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی و یا ارزیابی پاسخ حرارتی حسگرهای پوستی استوار است در حالی که مطالعات آزمایشگاهی شامل انجام آزمایش روی افراد مختلف در شرایط محیطی گوناگون و انجام آنالیز رگرسیون روی نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها می‌باشد. هر دو رویکرد ذکر شده در نهایت منجر به ارائه مدل‌های آسایش حرارتی به منظور پیش‌بینی انتقال حرارت، توزیع دمای پوست/هسته، پاسخ فیزیولوژیکی بافت‌های بدن و در نهایت ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی در شرایط مختلف فردی و محیطی می‌شود.

¹HVAC (Heating, Ventilation and Air conditioning) ²Vasodilation

³Vasoconstriction



شکل ۱: شکل شماتیک مدل‌های ترموفیزیولوژیکی

مدل‌های ترموفیزیولوژیکی را می‌توان به صورت مدل‌های ساده یک بخشی و یا مدل‌های چندبخشی در نظر گرفت که مدل‌های یک بخشی شامل مدل‌های یک گرهی و یا دو گرهی هستند و مدل‌های چند بخشی شامل مدل‌های دو گرهی، چند گرهی و یا چند المانی هستند [۴].

۱.۱.۲ مدل‌های یک بخشی

در مدل‌های یک بخشی کل بدن انسان بصورت یک بخش واحد در نظر گرفته می‌شود که آن بخش یا بصورت یک گره پوست یا دو گره متشکل از پوست و هسته در نظر گرفته می‌شود. از جمله مدل‌های یک بخشی یک گرهی و دو گرهی می‌توان به مدل‌های فنکر [۶] و گایچ [۷] اشاره نمود که برای محیط‌های یکنواخت توسعه پیدا کرده‌اند. از بین مدل‌های آسایش حرارتی این دو مدل به عنوان پر کاربردترین مدل‌های آسایش حرارتی هستند که به لحاظ سادگی ساختار توانسته‌اند به استانداردهای آسایش حرارتی راه پیدا کنند. این مدل‌ها بر اساس خواص حرارتی و فیزیولوژیکی متوسط برای کل بدن بوده و انتقال حرارت و دمای متوسط برای کل بدن و یا برای پوست/هسته بدن پیش‌بینی می‌شود. مدل آسایش حرارتی فنکر، اولین مدل برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی بر پایه یک سری از آزمایشات کنترل شده در محفظه آب و هوایی^۴ در حالت پایا می‌باشد [۶]. فنکر بدن را به صورت یک نقطه در نظر می‌گیرد که توسط پوشش یکنواختی از لباس پوشیده شده است. از این رو مدل فنکر به مدل یک گرهی^۵ مشهور می‌باشد [۳]. فنکر در نهایت احساس حرارتی کل بدن را با استفاده از شاخص PMV^۶ که بر مبنای دمای متوسط پوست بدن می‌باشد ارزیابی می‌نماید. در سال ۱۹۸۶، گایچ مدل دو گرهی خود را بر مبنای معادله موازنه انرژی بدن در شرایط گذرا (وابسته به زمان) ارائه نمود. در مدل گایچ، بدن به صورت دو استوانه هم مرکز مدل می‌شود که استوانه داخلی نماینده هسته بدن (اسکلت، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) و استوانه خارجی نشانگر پوست بدن می‌باشد [۸]. در این مدل برخی فرآیندهای کنترل دمای بدن، از جمله تعرق تنظیمی، لرز و اتساع و انقباض رگ‌ها مدل‌سازی شده است. این فرآیندهای کنترلی، از طریق سیگنال‌های فرستاده شده توسط حس‌گرهای سرمایی و گرمایی بدن فعال می‌شوند. یک سری مدل‌های یک بخشی و دو گرهی بر اساس مدل گایچ [۷] توسعه داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل فردی تاکادا [۴]، مدل بیوفیزیکی

همین دو اصل ساده سال‌ها به عنوان پایه و اساس توسعه مدل‌های تحلیلی آسایش حرارتی مد نظر قرار گرفته است. در حالت کلی مدل‌های آسایش حرارتی به سه دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند: مدل‌های ترموفیزیولوژیکی، مدل‌های ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی در محیط‌های غیریکنواخت و مدل‌های مبتنی بر پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی. در ادامه هریک از مدل‌های ذکر شده با جزئیات بیشتری توضیح داده می‌شوند.

۱.۲ مدل‌های ترموفیزیولوژیکی

افراد در طول فعالیت‌های روزانه خود، در معرض شرایط محیطی گوناگون و غیریکنواخت قرار می‌گیرند. پیش‌بینی پاسخ حرارتی و فیزیولوژیکی بدن انسان در شرایط مختلف محیطی، هدف اصلی از توسعه مدل‌های ترموفیزیولوژیکی می‌باشد. مدل‌های ترموفیزیولوژیکی یک سری مدل‌های ریاضی برای ارزیابی دما و انتقال حرارت بدن انسان در شرایط مختلف فردی و محیطی می‌باشند [۴]. این مدل‌ها در واقع بخشی از فرایند ارزیابی احساس و آسایش حرارتی هستند. به این ترتیب که خروجی این مدل‌ها (دمای پوست و هسته) به عنوان ورودی برای مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی احساس حرارتی در نظر گرفته می‌شوند.

مدل‌های ترموفیزیولوژیکی در حالت کلی از دو قسمت اصلی تشکیل شده‌اند: قسمت کنترل شونده^۱ و قسمت کنترل کننده^۲ [۴]. در قسمت کنترل شونده، انتقال حرارت در داخل بدن انسان و همچنین بین بدن انسان و محیط اطراف شبیه سازی می‌شود. انتقال حرارت در داخل بدن شامل انتقال حرارت هدایت بین بافت‌های مختلف بدن انسان و انتقال حرارت همرفت بواسطه جریان خون است در حالی که انتقال حرارت از بدن انسان به محیط اطراف شامل اتلاف حرارت از طریق تشعشع، همرفت، تبخیر عرق از سطح پوست و اتلاف حرارت بواسطه تنفس از قفسه سینه می‌باشد. قسمت کنترل کننده که توسط سیگنال‌های سرد/گرم بدن فعال می‌شود شامل چهار فرایند ترموفیزیولوژیکی تعریق، لرز، بازشدگی و یا جمع شدگی عروق خونی می‌باشد. در واقع بدن از طریق چهار فرایند ذکر شده، قسمت کنترل شونده و در نتیجه دمای بافت‌های بدن را زمانی که بدن احساس نارضایتی حرارتی می‌کند، کنترل و تنظیم می‌نماید.

در شرایط گرما و زمانی که دمای هسته بدن بالاتر از دمای خنثی^۳ است، فرایند بازشدگی عروق خونی فعال می‌شود که باعث افزایش میزان جریان خون به پوست می‌شود که در نتیجه آن گرمای بیشتری از داخل بدن به پوست و از پوست به محیط اطراف منتقل می‌شود. در صورتی که فرایند بازشدگی عروق برای اتلاف حرارت از بدن کافی نباشد، فرایند تعریق به منظور افزایش اتلاف حرارت از بدن فعال می‌شود. فرایند جمع شدگی عروق خونی در نتیجه کاهش دمای بدن می‌باشد که باعث کاهش میزان جریان خون پوست و در نتیجه کاهش اتلاف حرارت از بدن می‌شود. اما زمانی که بدن در معرض محیط سرد قرار دارد و فرایند جمع شدگی عروق خونی برای حفظ دمای بدن کافی نباشد، بدن برای حفظ حرارت شروع به لرزیدن می‌کند که سبب تولید حرارت اضافی در بدن می‌شود [۵]. شکل شماتیک مدل‌های ترموفیزیولوژیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹Passive ²Active ³Setpoint Temperature ⁴Climate Chamber

⁵One-Node Model ⁶Predictive Mean Vote

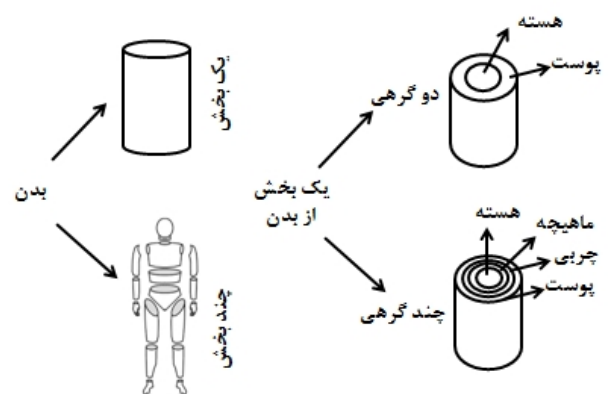
توسط استالویک برای استفاده در کاربردهای فضایی توسعه داده شده است. در این مدل، بدن به شش جزء استوانه‌ای شکل تقسیم شده است که شامل دست‌ها، پاها، تنه و سر می‌باشد [۱۴] و هر قسمت دارای چهار لایه در جهت شعاعی می‌باشد که عبارتند از: هسته، ماهیچه، چربی و پوست. ارتباط قسمت‌های مختلف بدن از طریق جریان خون برقرار می‌شود. دیگر مدل‌های چند جزئی و چند گرهی تفاضل محدود، بیش‌تر در راستای توسعه و اصلاح مدل استالویک [۱۴] پایه‌گذاری شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل ۲۰ بخشی فیالا [۱۵]، مدل دانشگاه برکلی [۱۶]، مدل تانابه [۱۷]، مدل زیست گرمایی و ۱۵ بخشی سلوم [۱۸]، مدل اوتمانی و همکاران [۱۹]، مدل احساس حرارتی [۲۰]، مدل سیستم سیرکولاسیون یکپارچه [۲۱]، مدل دو بعدی لی و چن [۲۲] اشاره نمود. در هر یک از مدل‌های مذکور بعضی از نقص‌ها و محدودیت‌های مدل استالویک برطرف شده است. از جمله در مدل فیالا [۱۵] بدن به بیست المان استوانه‌ای تقسیم شده و انتقال حرارت تشعشع با جزئیات بیش‌تری نسبت به مدل استالوی [۱۴] شبیه‌سازی شده است. در واقع هر بخش از بدن به سه قسمت تقسیم شده است که این امر باعث می‌شود که مدل بتواند غیریکنواختی‌های بیش‌تری از محیط به لحاظ تشعشعی را تحت پوشش قرار بدهد. در ادامه فیالا و همکاران [۲۳]، با انجام آزمایش‌های جداگانه و تحلیل رگرسیون یک سیستم دینامیکی برای مدل ۲۰ بخشی [۱۵] تعریف نمودند که به بررسی پاسخ فیزیولوژیکی هر یک از فرایندهای فیزیولوژیکی در شرایط مختلف محیطی می‌پردازد [۲۳]. مدل دانشگاه برکلی

[۱۶]، شامل تعداد جزءهای افزایش یافته، مدل جریان خون بهبود یافته برای تبادل حرارت جریان غیر همسو در اعضا بدن، افزودن گره لباس و اصلاح ضرایب انتقال حرارت همرفت و تشعشع می‌باشد. مدل تانابه [۱۷]، یک مدل یک بعدی بوده که در آن بدن به ۱۶ بخش تقسیم شده است که هر بخش شامل چهار لایه پوست، ماهیچه، چربی و هسته می‌باشد. گره ۱۶۵ مربوط به مخزن خون می‌باشد که دارای تبادل حرارت از طریق همرفت و جریان خون با سایر گره‌ها می‌باشد. در این مدل ضرایب انتقال حرارت تشعشع، هدایت و عایق لباس توسط آزمایش‌های آدمک حرارتی بدست آمده است. مدل سلوم و همکاران [۱۸] دارای ۱۵ جزء بوده که هر جزء شامل هسته، پوست، جریان خون سرخرگ و سیاهرگ می‌باشد و نرخ جریان خون را بر اساس اطلاعات فیزیولوژیکی دقیق، وضعیت آناتومیک سرخرگ‌ها در بدن و ضربان قلب محاسبه می‌کند در ضمن در این مدل گره لباس در نظر گرفته نشده است. مدل زیست گرمایی اوتمانی و همکاران [۱۹] در راستای اصلاح و بهبود مدل سلوم به منظور بررسی پاسخ حرارتی بدن انسان در شرایط محیطی غیریکنواخت به لحاظ تشعشعی ارائه شده است. در این مدل بدن به ۱۵ بخش استوانه‌ای تقسیم شده و هر بخش دارای گره هسته، ۶ گره پوستی، گره سرخرگ و گره سیاهرگ می‌باشد. مدل احساس حرارتی [۲۰] که در راستای مدل فیالا [۱۵] توسعه داده شده است این مدل در قسمت غیرفعال دارای تفاوت‌های خیلی کمی با مدل فیالا می‌باشد و تفاوت اصلی این مدل با مدل فیالا مربوط به قسمت فعال می‌باشد. بدین ترتیب که مفاهیم نوروفیزیولوژیکی و مسیرهای عصبی در سیستم تنظیم دمایی و سیستم ترموفیزیولوژیکی کنترل

کینگما [۴]، مدل سه گرهی ذوالفقاری و معرفت [۹]، مدل چهار گرهی دونگمی [۱۰] و مدل سه گرهی و فردی داوودی و همکاران [۱۱] اشاره نمود. در مدل یک بخشی و سه گرهی ذوالفقاری و معرفت [۹] به اصلاح ساختار مدل دو گرهی گایج پرداخته شده است. به این ترتیب که به جای مدل‌سازی یکدست لباس بر روی تمام سطح بدن، شرایط حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن بطور مجزا مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، بدن انسان به سه گره پوست لخت، پوست پوشیده با لباس و هسته تقسیم شده است. دونگمی و همکاران [۱۰] نیز به اصلاح مدل دو گرهی گایج برای بدست آوردن توزیع دمای بدن افراد خوابیده پرداختند به طوری که گره پوست را به سه گره پوست لخت، پوست پوشیده و پوست در تماس با رختخواب تقسیم نمودند. داوودی و همکاران [۱۱] به فردی سازی مدل سه گرهی ذوالفقاری و معرفت [۹] پرداختند به طوری که تاثیر ویژگی‌های فردی از جمله قد، وزن، جنسیت و شاخص توده بدن^۱ را بر دمای پوست/هسته بدن تحت شرایط محیطی یکنواخت و ناپایا در مدل سه گرهی لحاظ نمودند.

۲.۱.۲ مدل‌های چند بخشی

در مدل‌های ترموفیزیولوژیکی چند بخشی، بدن به اجزاء مختلف تقسیم می‌شود و هر جزء ممکن است به صورت دو گره، چند گره و یا چند المان در نظر گرفته شود. در این مدل‌ها دما، هندسه، عایق لباس، نرخ جریان خون، انتقال حرارت، خواص حرارتی و فیزیولوژیکی منحصر بفردی برای هر یک از اجزاء بدن و گره‌های مربوط به آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲ به صورت شماتیک یک مقایسه بین مدل‌های یک بخشی، چند بخشی، دو گرهی و چند گرهی انجام شده است.



شکل ۲: مقایسه بین مدل‌های یک بخشی، چند بخشی، دو گرهی و چند گرهی

از جمله مدل‌های چند بخشی دو گرهی می‌توان به مدل‌های ۱۶ بخشی کاینکلی و کلیک [۱۲] مدل چند بخشی پیرس^۲ [۱۳] اشاره نمود که در این مدل‌ها بدن به چندین بخش تقسیم شده و هر بخش به صورت دو گره پوست و هسته در نظر گرفته شده است در واقع در این مدل‌ها، معادلات موازنه انرژی مدل دو گرهی گایج [۷] برای بخش‌های مختلف بدن اعمال شده است. در این مدل‌ها مقاومت حرارتی و تبخیری لباس برای هر بخش از بدن بصورت جداگانه محاسبه شده است.

اولین مدل ترموفیزیولوژیکی چند بخشی و چند گرهی تفاضل محدود

¹BMI (Body Mass Index) ²MS-Pierce (Multi Segment Pierce) ³Thremo-SEM ⁴JOS-2 (Jointed Circulation system2)

[۳۳] و مدل هاگینو و هارا [۳۴] اشاره نمود. اینگرسول و همکاران [۳۰] ابتدا برای سه عضو بدن، PMV را محاسبه نموده و سپس یک PMV متوسط برای کل بدن بر اساس میانگین‌گیری بر اساس سطح آن سه عضو بدن بدست آوردند. در مدل ماتسوناگا و همکاران [۳۱] که برای محیط داخل اتومبیل توسعه داده شده است یک دمای معادل از طریق میانگین‌گیری وزنی بر اساس سطح سه عضو بدن و با استفاده از آدمک حرارتی بدست آمده است و در نهایت با استفاده از دمای معادل، PMV برای کل بدن محاسبه شده است که PMV بدست آمده برای کل بدن اعمال شده است به عبارت دیگر در این مدل اجزای مختلف بدن دارای همان احساس حرارتی کل بدن هستند [۳۱]. در مدل کوهری [۳۲] که برای یک شرکت اتومبیل‌سازی توسعه داده شده است، با اعمال مدل دو گرهی گایج [۷] برای ۱۱ عضو بدن، یک دمای موثر استاندارد^۳ بدست آمده است. در این مدل اثرات انتقال حرارت همرفت، تشعشع و تبخیر روی بدن لحاظ شده است و از یک آدمک حرارتی برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت در قسمت‌های مختلف بدن استفاده شده است. به کار بردن مدل دو گرهی بدون در نظر گرفتن تبادل حرارتی بین قسمت‌های مختلف بدن بواسطه جریان خون، یک نقص برای مدل می‌باشد. در مدل لباس دانشگاه ایالت کانزاس [۳۳]، برای رفع محدودیت مدل دو گرهی گایج در ارزیابی محیط‌های غیریکنواخت، پوست و لباس به قسمت‌های خیلی کوچک تقسیم شده است. این تقسیم‌بندی موجب در نظر گرفتن اثرات محیط و لباس غیر یکنواخت شده است. اما هسته به قسمت‌های ریز تقسیم نشده و در نتیجه تغییرات دمای هسته در محیط غیریکنواخت در نظر گرفته نشده است و همانند مدل‌های قبلی انتقال حرارت بین قسمت‌های مختلف بدن بواسطه جریان خون در نظر گرفته نشده است. در مدل هاگینو و هارا [۳۴] یک سری آزمایش برای یافتن رابطه‌ای میان احساس حرارتی کلی و احساس حرارتی موضعی اجزاء مختلف بدن در داخل اتومبیل انجام شده است. در این آزمایش‌ها ۱۹ جز از بدن در نظر گرفته شده و در نهایت یک رابطه برای احساس حرارتی کلی بر اساس آرای احساس حرارتی افراد ارائه شده است. بدین ترتیب که در این رابطه، فقط تاثیر احساس حرارتی قسمت‌هایی از بدن که بیشترین تاثیر را روی احساس حرارتی کلی دارند و در داخل اتومبیل در معرض تابش نور خورشید و یا وزش هوا قرار دارند، در نظر گرفته شده است [۳۴].

مدل معروف دیگر برای شرایط غیریکنواخت و پایا، مدل روش دمای معادل می‌باشد که برای اولین بار برای قسمت‌های موضعی بدن توسط ویون و همکارانش [۲۹] برای ارزیابی احساس حرارتی افراد در داخل وسایل نقلیه با استفاده از آدمک حرارتی معرفی شد. دمای معادل، دمای یک محیط مجازی با شرایط یکنواخت می‌باشد که اتلاف حرارت محسوس از بدن در آن محیط برابر اتلاف محسوس از بدن در یک محیط واقعی می‌باشد. در این مدل دو دیاگرام یکی برای شرایط تابستان و دیگری برای شرایط زمستانی ارائه شده است، که در این دیاگرام‌ها محدوده‌های دمایی قابل قبول به لحاظ آسایش حرارتی برای اجزاء مختلف بدن مشخص شده است [۲۹]. نیلسون و همکاران [۳۵] در ادامه کار ویون و همکاران [۲۹]، نمودارهایی برای دمای معادل با محدوده‌های وسیع‌تر هم با استفاده از آدمک حرارتی و هم با استفاده از افراد شرکت کننده در آزمایش‌ها ارائه داده‌اند که با استفاده از بررسی

کننده جریان خون پوست لحاظ شده است [۲۴]. مدل سیستم سیرکولاسیون یکپارچه [۲۱] در راستای مدل تانابه [۱۷] توسعه داده شده که در آن بدن به ۱۷ بخش تقسیم شده و دارای شبیه‌سازی جریان خون بهبود یافته نسبت به مدل تانابه می‌باشد به طوری که هر بخش از بدن دارای سرخرگ و سیاهرگ می‌باشد. در مدل لی و چن [۲۲] بدن به ۱۲ عضو تقسیم شده و انتقال حرارت از هر بخش از بدن بصورت دو بعدی شبیه سازی شده است.

۳.۱.۲ مدل‌های چند المانی

در مدل‌های چند بخشی المان محدود، بدن به چندین جزء و هر جزء به چند المان سه بعدی تقسیم شده و هندسه دقیق تری از بدن انسان ارائه شده است. یک مدل سه بعدی دقیق با عنوان مدل دانشگاه ایالت کانزاس^۱ در ابتدا بوسیله اسمیت و سپس بوسیله فو برای در نظر گرفتن عایق لباس توسعه داده شده است [۲۵]. مدل دانشگاه ایالت کانزاس بدن را به ۱۵ جزء استوانه‌ای تقسیم کرده و از ۳۰۰۰ گره برای نشان دادن سیستم سیرکولاسیون، مخزن خون و سیستم تنفسی استفاده می‌کند از آنجا که مدل خیلی پیچیده است، به منابع محاسباتی زیادی نیاز دارد. در مدل فو [۲۶]، هم مقاومت حرارتی و هم مقاومت رطوبتی لباس در نظر گرفته شده است. یک مدل ترموفیزیولوژیکی المان محدود دیگر، توسط فنگی و همکارانش [۲۷] در راستای اصلاح مدل اسمیت- فو توسعه داده شده است.

۲.۲ مدل‌های ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی در محیط‌های غیریکنواخت

مدل‌های تحلیلی که در بخش قبل توضیح داده شده‌اند، مدل‌های تنظیم دمایی ترموفیزیولوژیکی هستند که انتقال حرارت بدن انسان را بر اساس سیستم فعال و غیرفعال شبیه‌سازی می‌کنند و در واقع توزیع دمای متوسط و موضعی را برای پوست و هسته بدن تحت شرایط حرارتی مختلف پیش‌بینی می‌کنند اما این مدل‌ها در نهایت شاخصی برای ارزیابی احساس حرارتی ارائه نمی‌کنند. اگرچه مدل‌های فنگر [۶] و گایج [۷] شاخص ارزیابی احساس حرارتی برای بدن ارائه کرده‌اند اما این شاخص‌ها برای محیط‌های یکنواخت توسعه پیدا کرده‌اند و احساس کلی برای بدن را پیش‌بینی می‌کنند بنابراین برای محیط‌های غیریکنواخت کارایی لازم را ندارند. در محیط‌های ناپایا و غیریکنواخت، قسمت‌های مختلف بدن ممکن است محدوده وسیعی از پارامترهای فیزیکی از جمله دمای هوا، دمای تابش و سرعت هوا را تجربه کنند و در ضمن میزان عایق لباس برای بخش‌های مختلف بدن متفاوت می‌باشد. بنابراین در این شرایط، ارزیابی آسایش حرارتی موضعی ضروری به نظر می‌رسد و در نتیجه در این گونه شرایط محیطی، مدل‌های متداول و استاندارد آسایش حرارتی کافی نخواهند بود [۲۸].

یک سری مدل آسایش حرارتی که برای شرایط غیر یکنواخت و پایا توسعه یافته‌اند شامل مدل‌های مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی و مدل دمای همگن معادل^۲ می‌باشند که توسط ویون و همکاران [۲۹] ارائه شده است. از جمله مدل‌های مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی می‌توان به مدل اینگرسول [۳۰]، مدل ماتسوناگا [۳۱]، مدل کوهری [۳۲]، مدل لباس دانشگاه ایالت کانزاس

¹KSU (Kansas State University) ²EHT (Equivalent Homogeneous Temperature) ³SET (Standard Effective Temperature)

اطلاعات فیزیولوژیکی بدست آمده از مدل چند بخشی پیرس به عنوان ورودی به مدل آسایش دانشگاه برکلی در نظر گرفته و احساس حرارتی را ارزیابی نمودند. جین و همکاران [۴۳] یک مدل تطبیقی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بر اساس دمای پوست موضعی با استفاده از آزمایش های انجام شده در اتاق های کنترل شده ارائه نمودند. در تحقیق ایشان، بخش های بدن به صورت جداگانه تحت تهویه موضعی قرار داده شده و تاثیر احساس حرارتی موضعی آن عضو بدن روی احساس حرارتی کل بدن ارزیابی شده است. در نهایت یک مدل تطبیقی ارائه شده است که توانایی ارزیابی احساس حرارتی کلی با استفاده از فاکتورهای وزنی بدست آمده برای بخش های مختلف بدن را دارد. ینگ هی و همکاران [۴۴] با استفاده از آنالیز رگرسیون نتایج بدست آمده از افراد دانشجو در محیط خوابگاهی و تحت شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب، روابطی برای احساس حرارتی موضعی و کلی پرداختند. رابطه احساس حرارتی موضعی ارائه شده در این تحقیق رابطه خطی با دمای هوا دارد و بنابراین تاثیر سایر پارامترها بر احساس حرارتی موضعی در آن لحاظ نشده است. معلمی و همکاران [۴۵] یک مدل ترکیبی احساس حرارتی موضعی و کلی^۲ در محیط های غیریکنواخت ارائه نمودند. در مدل ایشان، در ابتدا با استفاده از مدل فیزیولوژیکی و ۱۶ بخشی تانابه [۱۷]، اثرات غیریکنواختی محیط لحاظ شده و دما و فرایندهای فیزیولوژیکی بخش های مختلف بدن محاسبه می گردد. سپس اطلاعات بدست آمده از مدل تانابه [۱۷] به عنوان ورودی برای مدل دانشگاه برکلی [۴۰] در نظر گرفته شده و سپس حرارتی موضعی و کل بدن پیش بینی می شود. فانگ و همکاران [۴۶] بصورت آزمایشگاهی به بررسی رابطه بین احساس حرارتی موضعی و کلی پرداختند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، ایشان بدن را به سه بخش سر، بالاتنه و پایین تنه تقسیم نموده و با تخصیص فاکتور وزنی برای این سه بخش بدن، احساس حرارتی کل بدن را بر مبنای احساس حرارتی موضعی این سه بخش از بدن محاسبه نمودند.

با توجه به مطالب ذکر شده، مدل های آسایش حرارتی ارائه شده برای پیش بینی احساس حرارتی موضعی در محیط های ناپایا و غیریکنواخت، یا مبتنی بر میانگین گیری وزنی هستند، یا برای محیط داخل اوتومبیل و یا با استفاده از مدل دو گرهی توسعه یافته اند که این مدل محدودیت هایی برای ارزیابی آسایش حرارتی موضعی دارد. می توان گفت در حال حاضر آسایش حرارتی موضعی با استفاده از دو روش معروف ارزیابی می گردد [۲۸]: روش دمای همگن معادل [۲۹] و مدل آسایش دانشگاه برکلی [۴۰] روش دمای معادل اگرچه محدوده های دمایی قابل قبول به لحاظ آسایش حرارتی را برای اجزاء مختلف بدن در شرایط غیریکنواخت ارائه می دهد اما این مدل یک مدل تجربی بوده و استفاده از آن محدود به شرایط خاصی است که نتایج در آن شرایط بدست آمده است و اثرات رطوبت و انتقال حرارت نامحسوس در آن در نظر گرفته نشده است و مدل دانشگاه برکلی [۴۰] یک مدل مستقل نیست و باید با یک مدل تنظیم دمایی و ترموفیزیولوژیکی بدن انسان کوپل شود و یا از طریق داده های آزمایشگاهی تغذیه شود و از طرفی، آزمایش های انجام شده در این مدل بیش تر بر روی سرمایش موضعی اجزاء در محیط گرم متمرکز کرده اند تا گرمایش در محیط سرد. علاوه بر این اثرات شدت و مدت سرمایش یا

احساس حرارتی اشخاص در بیش از ۳۰ نوع شرایط آب و هوایی بدست آمده است.

مدل های دیگری نیز برای شرایط ناپایا اما یکنواخت توسعه یافته اند که تاثیر احساس حرارتی موضعی قسمت های مختلف بدن را بر احساس حرارتی کلی بررسی نموده اند اما در این مدل ها شاخصی برای احساس حرارتی موضعی بصورت مستقل ارائه نشده است. از جمله این مدل ها می توان به مدل فیالا و همکاران [۳۶]، مدل وانگ [۳۷] و مدل دی دیر [۳۸] و همکاران اشاره نمود. در مدل فیالا و همکاران [۳۶] با استفاده از اطلاعات فیزیولوژیکی بدست آمده از ترکیبی از مدل های انتقال حرارت فیالا [۱۵] و مدل دینامیکی فیالا [۲۳] و نیز با استفاده از یک سری آزمایش روی افراد مختلف، یک شاخص احساس حرارتی برای کل بدن بر اساس تحلیل رگرسیون آرای احساس حرارتی افراد در شرایط ناپایا بدست آمده است [۳۶]. وانگ [۳۷] یک شاخص احساس حرارتی برای شرایط ناپایا ارائه نمود که شامل دو قسمت استاتیک و دینامیک می باشد. قسمت استاتیک بستگی به دمای متوسط پوست دارد در حالی که قسمت دینامیکی بر اساس آنالیز رگرسیون آراء احساس حرارتی افراد و نتایج بدست آمده از یک مدل ترموفیزیولوژیکی ۶ جزئی در طول تغییرات دمایی محیط می باشد. در این مدل شاخصی برای ارزیابی آسایش حرارتی موضعی ارائه نشده است. دی دیر و همکاران [۳۸] یک شاخص احساس حرارتی کلی بر مبنای پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی ارائه کرده اند. در این شاخص، احساس حرارتی بخش های مختلف بدن بر حسب حساسیت حسگرهای حرارتی پوستی در نظر گرفته شده است. اما در این شاخص فقط تاثیر دمای پوست موضعی در نظر گرفته شده و تاثیر دمای هسته بدن بر شاخص احساس حرارتی کلی در نظر گرفته نشده است. هرسه مدل ذکر شده برای شرایط ناپایا و یکنواخت بوده و در آنها شاخصی برای ارزیابی آسایش حرارتی موضعی بصورت مستقل ارائه نشده است.

اخیرا تحقیقاتی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی که هم شرایط محیطی ناپایا و هم غیریکنواخت را تحت پوشش قرار می دهد، توسط ژانگ و همکاران [۳۹] در دانشگاه برکلی توسعه یافته که منجر به ارائه مدل دانشگاه برکلی^۱ شده است. این مدل، بر اساس آنالیز رگرسیون نتایج بدست آمده از آرای احساس حرارتی افراد مختلف در شرایط گسترده محیطی در یک اتاق کنترل شده آب و هوایی^۲ می باشد. مدل احساس حرارتی موضعی شامل یک ترم استاتیک می باشد که بر مبنای دمای موضعی پوست می باشد و یک ترم دینامیک که بر مبنای مشتق زمانی دمای پوست و هسته است. شاخص احساس حرارتی موضعی بدست آمده در این آزمایش ها منطبق بر مقیاس استاندارد اشری [۱] می باشد [۴۰] ژانگ و همکاران [۴۱] در نهایت یک مدل برای ارزیابی احساس حرارتی کلی بر اساس احساس حرارتی موضعی اجزای مختلف بدن بر اساس استفاده از یک سری فاکتورهای وزنی ارائه کرده اند که این فاکتورهای وزنی نشان دهنده میزان تاثیر احساس حرارتی بخش های مختلف بدن بر احساس حرارتی کل بدن هستند. فودا و همکاران [۴۲] با ترکیب کردن مدل چند بخشی پیرس [۱۳] و مدل آسایش دانشگاه برکلی [۴۰] به بررسی احساس حرارتی موضعی و کلی بخش های مختلف بدن تحت شرایط محیطی غیریکنواخت پرداختند. به این ترتیب که دما و

¹UCB (University of California, Berkeley) ²Climate Chamber ³LOTS (Local and Overall Thermal Sensation Model)

عدم توسعه مدل زیست- گرمایی منطبق با شرایط حرارتی بدن و عدم مطابقت روابط فرکانسی رینگ و دی دیر [۵۰] با شاخص استاندارد اشری [۱] است. با توجه به مطالب بیان شده، میتوان نتیجه گرفت که به منظور ارزیابی پاسخ حسگرهای پوست، تعیین دقیق دمای پوست و نحوه تغییرات آن با زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از معروفترین و پرکاربردترین معادلات موجود در زمینه تعیین دمای بافت، معادله ارائه شده توسط پنس [۵۱] است. معادله پنس یک معادله زیست- گرمایی برای ارزیابی انتقال حرارت در داخل بافت‌های بدن در حالت ناپایا می‌باشد که شامل انتقال حرارت هدایت بین لایه‌های مختلف بافت‌های بدن، انتقال حرارت همرفت بواسطه جریان خون و انرژی تولید شده از طریق سوخت و ساز بدن می‌باشد. تاکنون، در تحقیقات مختلف بطور گسترده‌ای و با استفاده از شرایط مرزی مختلف، از معادله معروف پنس برای تعیین دمای بافت بدن استفاده شده است. اما شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این تحقیقات چندان با شرایط حرارتی حاکم بر بدن افراد منطبق نیست. لیو و الوی [۵۲] در تحقیق خود از شرط مرزی دما ثابت برای بخش مرکزی بدن و شرط مرزی جابجایی-تشنش-تبخیر برای پوست استفاده نمودند. اگر چه این شرایط مرزی به لحاظ انطباق با شرایط حرارتی بدن وضعیت مناسب‌تری دارد، ولی دارای دو اشکال اساسی می‌باشد. اول این که در شرایط مرزی مذکور دمای مرکز بدن در طول زمان ثابت فرض شده است و دوم این که به دلیل در نظر نگرفتن سیگنال‌های حرارتی بدن و ساز و کارهای تنظیم حرارت بدن، تری پوست به صورت یک پارامتر ثابت مدل‌سازی شده و از سایر عوامل تنظیم دما مانند جمع شدگی و باز شدگی رگ‌های خونی و همچنین لرز صرف نظر شده است. ذوالفقاری و معرفت [۵۳] یک مدل زیست گرمایی تنظیم دمایی ساده^۱، با اصلاح ساختار زیست- گرمایی معادله پنس برای شرایط حرارتی منطبق با بدن ارائه نمودند. در مدل ایشان به منظور رفع نواقص معادله پنس [۵۱]، از ترکیب این معادله با مدل گایج [۷] استفاده شده و تاثیر عوامل تنظیم حرارت بدن مانند تعرق تنظیمی، لرز و باز شدگی و جمع شدگی رگ‌ها در نظر گرفته شده است. به علاوه، در مدل زیست گرمایی تنظیم دمایی ساده، شاخص پاسخ حرارتی^۲ جدیدی بر مبنای پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی ارائه شده است که میان دمای حسگرهای حرارتی بدن و شاخص احساس حرارتی اشری رابطه‌ای برقرار نموده است و بنابراین مطابق با شاخص استاندارد اشری است [۵۴]. در ضمن، در مدل زیست گرمایی تنظیم دمایی ساده، با استفاده از شاخص پاسخ حرارتی جدید، یک شاخص جامع برای برآورد میزان نارضایتی کلی افراد و با در نظر گرفتن اثرات متقابل عوامل سراسری ایجاد نارضایتی حرارتی و عامل موضعی کوران معرفی شده است. از آنجا که فاکتورهای شخصی از جمله سن، جنسیت، وزن، قد و شاخص جرمی بدن می‌تواند بر عملکرد سیستم تنظیم دمایی^۳ و همچنین پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی تاثیرگذار باشد، داوودی و همکاران [۵۵] اثرات تفاوت‌های فردی را بر پاسخ حسگرها و همچنین توزیع دمای بافت بدن در مدل زیست گرمایی تنظیم دمایی ساده لحاظ نمودند. اگر چه مدل ارزیابی دمای حسگرها [۵۳]، مدل ارزیابی احساس حرارتی ذوالفقاری و معرفت [۵۴] و مدل داوودی و همکاران [۵۵] برای محیط‌های یکنواخت و ناپایا جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌کنند

گرمایش موضعی در این مدل بررسی نشده است. بنابراین می‌توان گفت که تاکنون یک مدل تحلیلی آسایش حرارتی موضعی مستقل که به تنهایی توانایی ارزیابی احساس حرارتی موضعی و سپس برآورد احساس حرارتی کلی را در محیط‌های غیریکنواخت و ناپایا داشته باشد، ارائه نشده است.

۳.۲ مدل‌های مبتنی بر پاسخ حسگرهای پوستی

در محیط‌های غیریکنواخت عامل کوران به عنوان مهم‌ترین عامل برهم زننده آسایش حرارتی مطرح می‌باشد حال آنکه مدل‌های مبتنی بر معادله موازنه انرژی برای بدن توانایی پیش‌بینی پدیده کوران را ندارند. لازم به ذکر است که کوران از طریق نوسانات تصادفی سرعت هوای وزشی، نارضایتی حرارتی ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، نارضایتی ناشی از پدیده کوران زمانی اتفاق می‌افتد که اغتشاشات جریان هوای وزشی موجب ایجاد نوسانات دمایی در سطح پوست شود. این نوسانات دمایی منجر به برانگیخته شدن حسگرهای حرارتی پوست و در نتیجه نارضایتی حرارتی افراد و سرمایش موضعی می‌گردد [۴۷]. مدل‌های مبتنی بر معادله موازنه انرژی، نسبت به تغییرات کوچک و ناگهانی محیط حساسیت نشان نمی‌دهند و به جای درک اغتشاشات جریان هوای وزشی، تنها متوسط مقادیر سرعت و دمای جریان را درک می‌کنند. همین مساله باعث شده است که مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی از یک سری روابط تجربی برای ارزیابی عوامل نارضایتی موضعی کوران استفاده کنند. بنابراین در سال‌های اخیر، توجه به فیزیک واقعی حاکم بر درک حرارتی افراد به عنوان رویکردی جدید برای مدل‌سازی نارضایتی ناشی از کوران مدنظر قرار داده شده است. از این رو توجه به این نکته مهم است آنچه که احساس حرارتی افراد را تعیین می‌کند، پاسخ حسگرهای حرارتی پوست به محرک‌های محیطی است؛ نه برقرار بودن موازنه انرژی برای بدن. در واقع پاسخ حسگرهای حرارتی پوست از طیف وسیعی از عوامل فردی و محیطی و عوامل ایجاد نارضایتی حرارتی موضعی از جمله کوران بطور همزمان متأثر می‌شوند که این قابلیت در معادلات موازنه انرژی برای بدن وجود ندارد [۸].

پوست انسان دارای دو نوع حسگر حرارتی است: حسگر سرمایی و حسگر گرمایی. اصطلاحاً به واکنش حسگرهای پوست نسبت به تحریکات حرارتی، پاسخ فرکانسی این حسگرها گفته می‌شود. شایان ذکر است که حسگرهای سرمایی پوست در عمق ۲/۰ میلی‌متری و حسگرهای گرمایی در عمق ۵/۰ میلی‌متری زیر سطح پوست قرار دارند [۴۸].

در سال ۱۹۸۱، هنسل [۴۸] طی تحقیقاتی دریافت که پاسخ فرکانسی حسگرهای حرارتی پوست شامل دو بخش استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. به طوری که بخش استاتیکی آن به دمای حسگرهای حرارتی و بخش دینامیکی آن به نرخ تغییرات دما در حسگرهای حرارتی مربوط است. به بیان دیگر، پاسخ فرکانسی حسگرهای پوست هم به دما و هم به مشتق زمانی دما در محل حسگرهای حرارتی وابسته است. در سال ۱۹۹۱، رینگ و دی‌دیر [۴۹] مدلی را برای ارزیابی پاسخ حسگرهای حرارتی پوست بر مبنای یافته‌های هنسل توسعه دادند. ایشان روابط مجزایی را برای پاسخ فرکانسی حسگرهای گرمایی و سرمایی ارائه نمودند [۵۰]. مدل رینگ و دی‌دیر علیرغم سادگی چندان مورد استقبال محققان قرار نگرفت. یکی از مهم‌ترین دلایل این امر،

¹STB (Simplified Thermoregulatory Bioheat Model)

²TRESP (Thermal Response Index)

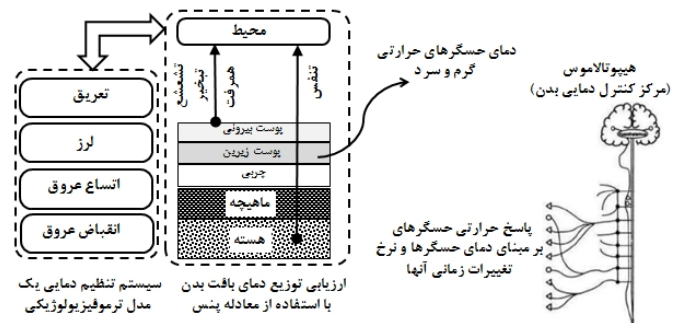
³Thermoregulatory System

موجود برای ارزیابی آسایش حرارتی موضعی، بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های محفظه‌های کنترل شده و آدمک حرارتی می‌باشند و بیشتر برای محیط داخل اتومبیل توسعه داده شده‌اند. از طرف دیگر در محیط‌های غیریکنواخت، کوران به عنوان مهم‌ترین عامل ایجاد ناراضیاتی حرارتی موضعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اخیراً مدل‌های مبتنی بر پاسخ حسگرهای حرارتی بدلیل انطباق با فیزیک واقعی درک حرارتی انسان و به دلیل توانایی برای پیش‌بینی پدیده کوران توجه محققان را بخود جلب نموده‌اند. حال آنکه مدل‌های ارائه شده در این زمینه نیز مبتنی بر پاسخ متوسط حسگرهای کل بدن هستند و برای محیط‌های غیریکنواخت کارآمد نیستند. اخیراً یک مدل توسط نویسندگان این نوشتار ارائه شده که به ارزیابی دمای موضعی حسگرهای پوستی بخش‌های مختلف بدن با دقت قابل قبول می‌پردازد و می‌تواند در شرایط غیریکنواخت با دقت مناسبی شرایط حرارتی افراد را مورد ارزیابی قرار دهد.

مراجع

- [1] ASHRAE, ANSI. Standard 55-2004, thermal environmental conditions for human occupancy, atlanta: american society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers. Inc., USA, 2004.
- [2] Cheng, Yuanda, Niu, Jianlei, and Gao, Naiping. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 47:13-22, 2012.
- [3] Maerefat, M and Omidvar, A. *Thermal Comfort*. Kelid Amoozesh, 2008.
- [4] Katic, Katarina, Li, Rongling, and Zeiler, Wim. Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment*, 106:286-300, 2016.
- [5] Parsons, Ken. *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. CRC press, 2014.
- [6] Fanger, Poul O et al. Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, 1970.
- [7] Gagge, Adolf P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *Ashrae Trans.*, 77:247-262, 1971.
- [8] Zolfaghari, S.A. *Modification of standard thermal comfort models by using the frequency thermal analysis of the human body*. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010.
- [9] Zolfaghari, Alireza and Maerefat, Mehdi. A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing. *Building and Environment*, 45(3):776-783, 2010.
- [10] Dongmei, Pan, Mingyin, Chan, Shiming, Deng, and Minglu, Qu. A four-node thermoregulation model for predicting the thermal physiological responses of a sleeping person. *Building and Environment*, 52:88-97, 2012.
- [11] Davoodi, Farzin, Hasanzadeh, Hasan, Zolfaghari, Seyed Alireza, and Maerefat, Mehdi. Developing a

اما به دلیل عدم توانایی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن، برای محیط‌های غیریکنواخت کارایی لازم را ندارند، چرا که بر مبنای خواص حرارتی/فیزیولوژیکی متوسط برای کل بدن بوده و دمای متوسط برای کل حسگرهای پوستی بدن پیش‌بینی می‌کنند و در نتیجه احساس حرارتی کلی برای بدن را ارزیابی می‌کنند. در واقع در این مدل‌ها حساسیت متفاوت حسگرهای بخش‌های مختلف بدن نادیده گرفته شده است. شکل شماتیک مدل‌های مبتنی بر پاسخ حسگرهای حرارتی در شکل ۳ نشان داده شده است که نحوه عملکرد این مدل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳: شکل شماتیک عملکرد مدل‌های مبتنی بر پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی

اخیراً معلمی و همکاران [۵۶]، به منظور ارزیابی پاسخ حسگرهای حرارتی در بخش‌های مختلف، بدن را به ۱۶ بخش و هر بخش را به ۵ لایه پوست بیرونی^۱، پوست زیرین^۲، چربی، ماهیچه و هسته تقسیم نمودند. سپس معادله پنس را با در نظر گرفتن خواص حرارتی و فیزیولوژیکی منحصر بفرد برای بخش‌های مختلف بدن و لایه‌های مربوط به آنها موضعی سازی کردند. ایشان در نهایت به منظور تعیین یک سیستم تنظیم دمایی برای معادله پنس موضعی سازی شده، آن را با مدل چند بخشی و ترموفیزیولوژیکی تانابه ترکیب نمودند. این مدل دارای توانایی ارزیابی دمای موضعی برای حسگرهای حرارتی پوستی بخش‌های مختلف بدن در شرایط مختلف محیطی با دقت قابل قبول است.

۳ نتیجه‌گیری

در کار حاضر، مروری کلی بر مدل‌های آسایش حرارتی ارائه شده است و میزان کارایی آنها در ارزیابی احساس حرارتی افراد در شرایط مختلف محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی که در دسته مدل‌های ترموفیزیولوژیکی یک بخشی قرار دارند، احساس حرارتی کلی برای بدن را پیش‌بینی نموده و برای محیط‌های یکنواخت جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌کنند. اما محیط‌های حرارتی اغلب غیریکنواخت و ناپایا هستند و طبق تحقیقات انجام شده در این زمینه، در یک محیط غیریکنواخت و ناپایا، واکنش حرارتی اشخاص بیشتر به احساس حرارتی موضعی آن‌ها بستگی دارد نه به احساس حرارتی کل بدن آنها. مدل‌های ترموفیزیولوژیکی چند بخشی توانایی ارزیابی تاثیر غیریکنواختی محیط بر دما و پاسخ فیزیولوژیکی بخش‌های مختلف بدن را دارند اما در نهایت شاخصی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و یا کلی ارائه نمی‌کنند. اما مدل‌های

¹Epidermis ²Dermis

- [26] Fu, George. A transient, 3-d mathematical thermal model for the clothed human. *KSU, Dissertation*, 1995.
- [27] Li, Fengzhi, Li, Yi, and Wang, Yang. A 3d finite element thermal model for clothed human body. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 6(2):149-160, 2013.
- [28] Foda, E. *Evaluating Local and overall thermal comfort in buildings using thermal manikins*. Ph.D. thesis, Aalto University, 2012.
- [29] Wyon, David P, Larsson, S, Forsgren, B, and Lundgren, I. Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. *SAE transactions*, pp. 46-56, 1989.
- [30] Walgama, C, Fackrell, S, Karimi, M, Fartaj, A, and Rankin, GW. Passenger thermal comfort in vehicles-a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(5):543-562, 2006.
- [31] Matsunaga, Kazuhiko, Sudo, Fujio, Tanabe, Shin-ichi, and Madsen, Thomas Lund. Evaluation and measurement of thermal comfort in the vehicles with a new thermal manikin. tech. rep., SAE Technical Paper, 1993.
- [32] Kohri, Itsuhei and Mochida, Tohru. Evaluation method of thermal comfort in a vehicle with a dispersed two-node model part 1—development of dispersed two-node model. *Journal of the Human-Environment System*, 6(1):19-29, 2002.
- [33] Jones, BW. Transient interaction between the human and the thermal environment. *ASHRAE Trans.*, 98(1):189-195, 1992.
- [34] Hagino, Mitsuaki and Hara, Junichiro. Development of a method for predicting comfortable airflow in the passenger compartment. tech. rep., SAE Technical Paper, 1992.
- [35] Nilsson, Håkan O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment*, 42(12):4000-4005, 2007.
- [36] Fiala, Dusan, Lomas, Kevin J, and Stohrer, Martin. First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE transactions*, 109:179, 2003.
- [37] Wang, Xiaoling. *Thermal comfort and sensation under transient conditions*. Ph.D. thesis, Department of Energy Technology, Division of Heating and Ventilation, the Royal Institute of Technology, 1994.
- [38] De Dear, RJ, Ring, JW, and Fanger, PO. Thermal sensations resulting from sudden ambient temperature changes. *Indoor air*, 3(3):181-192, 1993.
- [39] Zhang, H. *Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments*. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2003.
- [40] Zhang, Hui, Arens, Edward, Huizenga, Charlie, and Han, Taeyoung. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part i: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, 45(2):380-388, 2010.
- new individualized 3-node model for evaluating the effects of personal factors on thermal sensation. *Journal of thermal biology*, 69:1-12, 2017.
- [12] Kaynakli, Omer and Kilic, Muhsin. Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 40(2):165-174, 2005.
- [13] Foda, Ehab and Sirén, Kai. A new approach using the pierce two-node model for different body parts. *International journal of biometeorology*, 55(4):519-532, 2011.
- [14] Stolwijk, Jan AJ. A mathematical model of physiological temperature regulation in man. 1971.
- [15] Fiala, Dusan, Lomas, Kevin J, and Stohrer, Martin. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of applied physiology*, 87(5):1957-1972, 1999.
- [16] Huizenga, Charlie, Hui, Zhang, and Arens, Edward. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, 36(6):691-699, 2001.
- [17] Tanabe, Shin-ichi, Kobayashi, Kozo, Nakano, Junta, Ozeki, Yoshiichi, and Konishi, Masaaki. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65mn) and radiation models and computational fluid dynamics (cf). *Energy and Buildings*, 34(6):637-646, 2002.
- [18] Salloum, M, Ghaddar, N, and Ghali, K. A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models. *International journal of thermal sciences*, 46(4):371-384, 2007.
- [19] Al-Othmani, M, Ghaddar, N, and Ghali, K. A multi-segmented human bioheat model for transient and asymmetric radiative environments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(23-24):5522-5533, 2008.
- [20] Kingma, BRM, Schellen, L, Frijns, AJH, and van Marken Lichtenbelt, WD. Thermal sensation: a mathematical model based on neurophysiology. *Indoor air*, 22(3):253-262, 2012.
- [21] Kobayashi, Yutaka and Tanabe, Shin-ichi. Development of jos-2 human thermoregulation model with detailed vascular system. *Building and Environment*, 66:1-10, 2013.
- [22] Lai, Dayi and Chen, Qingyan. A two-dimensional model for calculating heat transfer in the human body in a transient and non-uniform thermal environment. *Energy and Buildings*, 118:114-122, 2016.
- [23] Fiala, Dusan, Lomas, Kevin J, and Stohrer, Martin. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45(3):143-159, 2001.
- [24] Kingma, Boris RM, Vosselman, MJ, Frijns, AJH, van Steenhoven, AA, and van Marken Lichtenbelt, WD. Incorporating neurophysiological concepts in mathematical thermoregulation models. *International journal of biometeorology*, 58(1):87-99, 2014.
- [25] Smith, Carol Elaine. A transient, three-dimensional model of the human thermal system. *KSU, Dissertation*, 1993.

- [55] Davoodi, Farzin, Hassanzadeh, Hassan, Zolfaghari, Seyed Alireza, Havenith, George, and Maerefat, Mehdi. A new individualized thermoregulatory bio-heat model for evaluating the effects of personal characteristics on human body thermal response. *Building and Environment*, 136:62–76, 2018.
- [56] Khiavi, Negin Moallemi, Maerefat, Mehdi, and Zolfaghari, Seyed Alireza. A new local thermal bioheat model for predicting the temperature of skin thermoreceptors of individual body tissues. *Journal of thermal biology*, 74:290–302, 2018.
- [41] Zhang, Hui, Arens, Edward, Huizenga, Charlie, and Han, Taeyoung. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part iii: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment*, 45(2):399–410, 2010.
- [42] Foda, Ehab, Almesri, Issa, Awbi, Hazim B, and Sirén, Kai. Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. *Building and Environment*, 46(10):2023–2032, 2011.
- [43] Jin, Quan, Li, Xiangli, Duanmu, Lin, Shu, Haiwen, Sun, Yuming, and Ding, Qianru. Predictive model of local and overall thermal sensations for non-uniform environments. *Building and Environment*, 51:330–344, 2012.
- [44] Maerefat, Mehdi, Zolfaghari, Alireza, et al. Introducing a new thermal comfort model for evaluation of local and overall thermal sensation in non-uniform environments. *Modares Mechanical Engineering*, 17(8):444–450, 2017.
- [45] He, Yingdong, Li, Nianping, Zhang, Wenjie, and Peng, Jinqing. Overall and local thermal sensation & comfort in air-conditioned dormitory with hot-humid climate. *Building and Environment*, 101:102–109, 2016.
- [46] Fang, Zhaosong, Liu, Hong, Li, Baizhan, Tan, Meilan, and Olaide, Oladokun Majeed. Experimental investigation on thermal comfort model between local thermal sensation and overall thermal sensation. *Energy and Buildings*, 158:1286–1295, 2018.
- [47] Melikov, AK, Krüger, U, Zhou, Genhong, Madsen, TL, and Langkilde, Gunnar. Air temperature fluctuations in rooms. *Building and Environment*, 32(2):101–114, 1997.
- [48] Hensel, H. *Thermoreception and temperature regulation*. London: Academic Press, 1981.
- [49] Ring, JW and de Dear, Richard. Temperature transients: a model for heat diffusion through the skin, thermoreceptor response and thermal sensation. *Indoor Air*, 1(4):448–456, 1991.
- [50] Ring, JW, de Dear, Richard, and Melikov, Arsen. Human thermal sensation: frequency response to sinusoidal stimuli at the surface of the skin. *Energy and Buildings*, 20(2):159–165, 1993.
- [51] Pennes, Harry H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of applied physiology*, 1(2):93–122, 1948.
- [52] Lv, Yong-Gang and Liu, Jing. Effect of transient temperature on thermoreceptor response and thermal sensation. *Building and Environment*, 42(2):656–664, 2007.
- [53] Zolfaghari, Alireza and Maerefat, Mehdi. A new simplified thermoregulatory bioheat model for evaluating thermal response of the human body to transient environments. *Building and Environment*, 45(10):2068–2076, 2010.
- [54] Zolfaghari, Alireza and Maerefat, Mehdi. A new predictive index for evaluating both thermal sensation and thermal response of the human body. *Building and Environment*, 46(4):855–862, 2011.