10.22034/jrenew.2025.210024

سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴، ص ص 182- 188

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۴۰۳/۰۸/۰۷

فناوری و ارزیابی عملکرد جامه تنظیم حرارتی

فراز اسحق بیک فرد[۱]، مهدی معرفت [۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، تبدیل انرژی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، maerefat@modares.ac.ir

چکیده

توجه روزافزون بشر جهت دستیابی به شرایط آسایش حرارتی انفرادی انسان، سبب شده است تا توسعه جامه‌های تنظیم حرارتی به عنوان یک پاسخ کم‌هزینه، مطمئن و ایمن، با تاکید بر سادگی در شرایط استفاده، آسایش پوشش و پایداری، به طور وسیعی تحت بررسی و پژوهش قرار گیرند. در این مقاله، ابتدا انواع فناوری و روش‌های ارزیابی شرایط آسایش و عملکرد جامه‌های تنظیم حرارتی، تحت بررسی قرار داده شده‌اند. سپس با استناد بر انتشارات، نشان داده شده که مدل‌های تحت استفاده جهت ارزیابی عملکرد حرارتی، پیچیده بوده و تعیین احساس حرارتی و به تبع آن آسایش انسان، به وفور توسط ادراک ذهنی داوطلبین صورت میپذیرد. بدین ترتیب لازم است جهت ارزیابی آسایش حرارتی از مقیاس‌های درکی افراد در آزمایش‌های میدانی استفاده شده و یا می‌بایست جهت بررسی نمونه جامه مشخصی، مدلی توسعه داده شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای کاربری سطح فعالیت پایین جامه‌های تنظیم حرارتی در محیط‌های یکنواخت، نظیر استفاده از جلیقه‌های آسایش حرارتی در محیط دفتری، توسعه مدل پایا و پرکاربرد فنگر که بر پایه‌ی نتایج تجربی بنا شده است؛ امری مفید در جهت تسریع توسعه و آزمایش جامه‌های تنظیم حرارتی، بویژه جلیقه‌های تنظیم حرارتی می‌باشد.

کلیدواژگان: جامه تنظیم حرارتی، مدل ارزیابی آسایش حرارتی، مدل فنگر، جلیقه تنظیم حرارتی

Technology and performance evaluation of thermal regulatory clothing

Faraz Ishaq Beik Fard[1], Mehdi Maerefat[2*]

1- Bachelor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

Received: 07 June 2024 Accepted: 28 October 2024

Abstract

Widespread research has been conducted on the creation and advancement of thermal regulatory clothing as a low-cost, safe, and dependable solution, with an emphasis on application ease, comfort, and sustainability, in response to society's growing emphasis on achieving individual thermal comfort. This article examines various technologies and methods for assessing individual comfort and the performance of thermal regulatory clothing. Also, by referencing published research on the subject, it has been demonstrated that the methods used to evaluate the thermal performance of thermal regulatory clothes are complex and that determining the thermal sensation and, consequently, the individual comfort is heavily influenced by volunteers' subjective perceptions. Thus, we can conclude that the use of perception scales is necessary in field tests to evaluate thermal comfort, and therefore we can conclude that developing a reliable and widely used thermal comfort model such as Fanger’s model, which is based upon experimental results, is useful in accelerating the development and testing of thermal regulatory clothing, especially in uniform environments and under low-metabolic rate activities such as the use of thermal regulatory vests in an office environment.

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Keywords: Thermal regulatory clothing, Thermal comfort evaluation model, Fanger's model, Thermal regulatory vest

۱- مقدمه

جامه تنظیم حرارتی به دسته پوششی اطلاق می‌شود که جهت دستیابی به آسایش حرارتی انفرادی انسان ساخته شده و در این راستا از مکانیزمی گرم‌کننده یا خنک‌کننده بهره می‌برد. یک فرم غلب تحت آزمایش در میان جامه‌های آسایش حرارتی، نوع لباس آسایش حرارتی بوده که با بکارگیری مکانیزم‌های مختلف در ایجاد گرمایش یا سرمایش، از یکدیگر تمایز یافته‌اند. بنابراین دو دسته‌بندی غلب این گروه پوشش، تحت عناوین جامه‌های گرم‌کننده و جامه‌های خنک‌کننده با زیرگروه‌های متعدد، پدید یافته‌اند.

۲- جامه گرم‌کننده[1]

انسان می‌تواند در یک محیط سرد با پوشیدن لایه‌های متعدد لباس و یا استفاده از سیستم‌های تهویه موضعی، به آسایش حرارتی دست‌یابد. بااینحال محدودسازی حرکت در پی جمع‌شدن ضخامت لایه‌های لباس و بصرفه بودن گرم کردن زیرمحیط نزدیک بدن انسان نسبت به هوای پیرامون، دلایلیست که ساخت و آزمایش جامه‌های گرم‌کننده انفرادی را موضوع چندی از تحقیقات جامعه مهندسی ساخته است. جامه‌های گرم‌کننده انفرادی براساس مکانیزم گرمایش به ۴ دسته تقسیم می‌شوند.

۲-۱- جامه گرم‌کننده الکتریکی[2]

جامه‌های گرم‌کننده الکتریکی با بهره‌گیری از یک عنصر گرمایشی، عموما سیم گرمایش الکتریکی متصل به منبع تغذیه، زیر محیط نزدیک بدن انسان را گرم می‌کنند [۱, ۲]. استفاده از عنصر گرمایش کربن جدید بوده، گران است و نیاز به بهبود دارد. در بازارهای موجود، عموم موارد از سیم‌های گرمایش الکتریکی استفاده کرده که انعطاف‌پذیری بدن را محدود می‌کنند. این جلیقه‌ها در یک محیط سرد شدید (۱۴- درجه سلسیوس) توانایی حفظ تعادل حرارتی انسان را ندارند [۲]. ازطرفی، ظرفیت باتری نیز برای گرمایش‌های طولانی مدت ممکن است پاسخگو نباشد. این بدان معناست که گرمایش باید فقط در مواقع اضطراری و یا در شرایط امکان تعویض یا شارژ مجدد باتری، صورت پذیرد [۲, ۳].

شکل ۱ نمونه جلیقه گرم‌کننده الکتریکی عرضه شده در بازار [۴]

۲-۲- جامه گرم‌کننده با ماده تغییرفازدهنده[3]

استفاده از مواد تغییرفاز دهنده سبب می‌شود جامه خواص سازگاری خودکار داشته باشد. این مواد ترکیبی از انواع مختلف پارافین‌ها بوده و می‌توان با تغییر مقدار متناسب هر نوع پارافین (دارای نقطه ذوب و تبلور متفاوت)، ماده تغییرفازدهنده با نقطه ذوب و انجماد مدنظر را بدست آورد. محصول یک پارچه همراه با ماده تغییرفازدهنده می‌تواند گرمای تولید شده توسط بدن انسان را ذخیره کرده و سپس آن را به بدن بازگرداند. فرآیند تغییر فاز پویا بوده چراکه مواد به دلیل سطح فعالیت بدنی بدن انسان و دمای محیط به طور مداوم از حالتی به حالت دیگر تغییر می‌کنند [۲, ۵]. ترکیب ماده تغییرفازدهنده در لباس به سه روش انجام می‌شود. در روش نخست مواد تغییرفازدهنده درون پوسته‌هایی ریز قرارداده می‌شوند. سپس با یک ماده پایه نظیر پلیمر مایع ترکیب شده و درنهایت بافته می‌شوند. روش دوم شامل لایه چینی ماده تغییرفازدهنده و پوشش دادن با پلیمرهایی مانند اکریلیک یا پلی اورتان، جهت ادغام در منسوجات می‌باشد. در این روش پوشش ممکن است ماده تغییرفازدهنده سفتی پارچه‌ها را افزایش دهد. همچنین دوام پوشش در این روش قبل از استفاده بایستی بررسی شود. در روش سوم (روش بسته‌بندی) مواد تغییرفازدهنده درون بسته‌های پلاستیکی مهر و موم شده و سپس در جیب‌های لباس قرارداده می‌شود. یک جامه ماده بسته بندی شده معمولا جرم زیادی دارد و می تواند مقدار زیادی گرما ذخیره کند. به‌علاوه، تعویض بسته‌های حاوی ماده تغییرفازدهنده پیش از تمیز کردن لباس، کار راحتی است [۲, ۶]. جامه‌هایی که ماده تغییرفازدهنده در آن‌ها با فناوری ریسندگی الیاف و لایه‌چینی در لباس‌ها گنجانده شده‌است به‌دلیل جرم کم اثر گرمایشی کمی دارند [۲, ۷]. ازطرفی جامه بسته‌بندی شده سنگین است و ممکن است فقط برای فعالیت‌هایی مناسب باشد که در آن وزن اضافی مشکلی ندارد. یک نکته مهم آنست که پس از چندین بار شستن لباس‌های

[1] Personal Heating Garment (PHG)
[2] Electrical Heating Garment (EHG)
[3] Phase Change Material (PCM) Heating Garment

حاوی ماده تغییرفازدهنده (بجز جامه‌های بسته‌بندی)، اثر ماده تغییرفازدهنده به تدریج ناپدید می‌شود [۲].

۲-۳- جامه گرم‌کننده شیمیایی[1]

جامه گرم‌کننده شیمیایی با کمک واکنش میان مواد شیمیایی، گرما تولید می‌کند. برای مثال با اکسیداسیون انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. لباس‌های گرمایش شیمیایی به طور گسترده برای محافظت از غواصان در آب سرد استفاده می شوند [۲]. پدهای گرمایش شیمیایی ارزان بوده و استفاده از آن‌ها در جامه‌ها برای مصرف‌کنندگان آسان است. همچنین در صورت لزوم می توان آنها را به هر قسمت از بدن انسان متصل کرد. نکته مهم در طراحی این جامه‌ها جلوگیری از نشست مواد شیمیایی درون پد گرمایشی و قرار دادن آن‌ها در لایه‌های نزدیک پوست است. در طول فرآیند طراحی باید توجه داشت که دمای پد گرمایشی قابل کنترل نمی‌باشد و برای موارد خاص نظیر افراد مسن و کودکان، تصمیم‌گیری درمورد قرارگیری محل پدهای گرمایش درون جامه گرم‌کننده، کاری مهم است. در برخی موارد اگر پد گرمایشی به لباس زیر متصل شود به دلیل دمای بالای ۴۲ درجه سلسیوس پد، پوست بدن را می‌سوزاند [۲].

در حال حاضر پدهای گرم‌کننده بدن در بازار جهانی، به‌ویژه ژاپن، به خوبی توسعه یافته اند. پدهای گرم‌کننده اغلب از پودر آهن، کربن فعال، پودر چوب، نمک معدنی و آب ساخته می شوند. این مواد خام می‌توانند در هوا اکسید شده و گرما آزاد کنند که میتواند تا ۱۲ ساعت دوام داشته باشد. در برخی موارد دمای پدهای گرمایشی ممکن است به ۶۸ درجه سلسیوس نیز برسد [۲].

۲-۴- جامه گرم‌کننده با جریان سیال[2]

در این جامه‌ها، سیال مایع یا گاز درون یک سیستم لوله (یا یک محیط توخالی متفاوت) در داخل لباس، جریان دارد. اغلب در جامه‌های گرمایشی با جریان مایع، از آب استفاده می‌شود؛ چراکه آب آنتالپی گرمایی خوبی داشته و سمی نیز نمی‌باشد. ازطرفی، استفاده از جریان هوا در جامه‌ها، اغلب برای گرم نگه‌داشتن بیماران در طول دوره جراحی‌های طولانی‌مدت استفاده می‌شود. درمقایسه بین استفاده از جریان آب و جریان اجباری هوا به عنوان سیال درگردش، مشخص شد که آب در گردش، گرمای بیشتری را منتقل می‌کند [۲, ۸, ۹]. لباس‌های گرم‌کننده با گردش سیال مایع، اثر گرمایی موثری دارند. بااینحال، قرارگیری سیستم لوله در داخل لباس، آن را کم و بیش سفت کرده و فعالیت انسان را محدود می‌سازد. ازطرفی خواص لوله و میزان سطح تماس لوله با پوست و سیال، میزان گرمایش توسط لباس را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حال حاضر، لباس‌های گرم‌کننده با جریان سیال به طور گسترده در زمینه پزشکی مورد استفاده و بررسی قرار می‌گیرند [۲].

۳- جامه خنک‌کننده[3]

درحال‌حاضر لباس‌های گرم‌کننده انفرادی در نوع مواد گرمایشی تا تکنیک‌های گرمایش، از پیشرفت سریعی برخوردار بوده و سهم غالبی از بازار منسوجات تنظیم‌کننده حرارتی را به خود اختصاص داده‌اند. ازطرفی، منسوجات خنک‌کننده نیز در شرایط کاربری متعدد، نظیر ورزش یا کار در هوای گرم، تجهیزات خنک‌کننده انفرادی قلبل‌حمل در حوزه پزشکی، یا در زمینه‌های لباس‌های محافظ ویژه، مانند لباس فضانوردی و لباس‌های آتش نشانی به شدت مورد نیاز هستند [۱۰]. مفهوم لباس‌های خنک‌کننده شخصی برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ مطرح شد و در سال ۱۹۶۲ اولین لباس تبرید انفرادی برای صنعت هوافضا تولید شد [۱۰, ۱۱]. از آن زمان تاکنون، لباس‌های خنک‌کننده شخصی برحسب نحوه استفاده از انرژی الکتریکی در مکانیزم خنک‌کنندگی، به طور مداوم ساخته و آزمایش شده‌اند. لباس‌های تبریدی برحسب نحوه خنک‌کنندگی در ۵ دسته قرار می‌گیرند [۱۰].

۳-۱- جامه خنک‌کننده با یخ[4]

در ابتدا لباس‌های خنک‌کننده یخی به دلیل سادگی در آماده سازی و هزینه کم، از رایج‌ترین انواع جامه‌های خنک‌کننده بودند. در این لباس‌ها جیب‌های خاصی برای نگهداری یخ طراحی شده و از طریق فرآیند ذوب یخ، گرمای تولید شده از سطح پوست جذب شده و در نتیجه باعث کاهش دما و ایجاد آسایش‌حرارتی در محیطی گرم می‌شود. به‌دلیل گرمای نهان بالای یخ، در دسترس بودن و هزینه کمشان، لباس‌های خنک‌کننده یخی در صنایع پوشاک محافظ، لباس‌های ورزشی و لباس‌های نظامی استفاده شده‌اند [۱۰]. جامه‌های خنک‌کننده یخی عملکرد خنک‌کنندگی بالایی دارند به‌طوری که حتی به دمای ۲۰- درجه سلسیوس نیز می‌رسند [۱۲]. جلیقه‌های خنک‌کننده یخی می‌توانند به‌طور موثر دمای پوست را خنک کرده و راندمان فعالیت افراد را بالا برند [۱۳]. با اینحال، تماس طولانی مدت با یخ می تواند منجر به تحریک بافت شده و به آن آسیب رساند. علاوه بر این، وزن و حجم زیاد و مدت زمان خنک‌کنندگی محدود، استفاده از لباس‌های خنک‌کننده یخی را در زندگی روزمره به‌شدت محدود کرده‌است [۱۰, ۱۴].

شکل ۲ نمونه جلیقه خنک‌کننده با یخ عرضه شده در بازار [۱۵]

[1] Chemical Heating Garment (CHG)
[2] Fluid/Air Flow Heating Garment (FHG)
[3] Personal Cooling Garment (PCG)
[4] Ice Cooling Garment (ICG)

۳-۲- جامه خنک‌کننده با مواد تغییرفازدهنده[1]

مشـــلبه کاربرد مواد تغییرفازدهنده در لباســـهای گرم‌کننده، زمانیکه دما به محدوده خاصی افزایش یابد ماده تغییرفازدهنده گرما را از طریق فرآیند تغییر فاز جذب کرده و ســبب کاهش دمای ریز محیط بین لباس و بدن، می‌شــوند. نگهداری از جامه‌های خنک‌کننده حاوی ماده تغییرفازدهنده آســـان بوده و حتی می‌توانند تا ۳ درجه ســـلســـیوس دمای پوســـت را پایین آورند [۱۶]. ازطرفی می‌توان آن‌ها را به صورت انعطاف‌پذیر و با کمک دستگاه‌های پرینتر ســه‌بعدی ســاخت [۱۷]. بااینحال هزینه مواد و تولیدشــان زیاد بوده و دارای مدت زمان خنک‌کنندگی محدودی می‌باشند [۱۰].

۳-۳- جامه خنک‌کننده تابشی[2]

تابش حرارتی بدن انســـان، عموما در بازه امواج مادون قرمز، با طول موج ۸ تا ۱۳ میکرومتر قراردارد [۱۸]. ایده خنک‌کردن تابشـــی آنســـت که در ســـاخت لباس، از موادی استفاده شود که مانع از انتشار گرمای بدن انسان به محیط بیرون نشود. اینکار بدون صرف انرژی انتشار گرمای انسان را افزایش داده و به فضای بیرونی تخلیه می‌کند. ازطرفی ممکن است منابع تابش حرارتی شدید دیگری مانند نور مستقیم خورشید در محیطی گرم وجود داشته‌باشد که طیف امواج آن در بازه گسیل حرارتی بدن قرار نگیرد. برای مثال طیف خورشیدی، عمدتاً از ۰.۳ تا ۴ میکرومتر اســـت. بنابراین می‌توان با اســـتفاده از موادی با قابلیت بازتاب زیاد، از ورود حرارت تابشـــی به ریزاقلیم بدن نیز جلوگیری نمود [۱۹]. عرفان و همکاران یک نانوپارچه ایجاد کردند که قابلیت ٪۹۱ بازتاب خورشـــیدی و ٪۸۱ انتقال مادون قرمز میانی را ارائه داد و در مقایســـه با منسوجات پنبه ای، ۹ درجه سلسیوس خنک‌کنندگی به همراه داشت [۲۰]. هزینه مواد و ســـاخت لباس‌های خنک‌کننده تابشـــی مشـــلبه لباس‌های خنک‌کننده حاوی ماده تغییرفازدهنده، زیاد می‌باشد [۱۰].

۳-۴- جامه خنک‌کننده با جریان هوا[3] و جریان مایع[4]

لباس‌های خنک‌کننده هوایی، با جریان دادن هوا در زیر محیط بین لباس و بدن انسان، آسایش حرارتی را فراهم می‌کنند. مزایای اصلی خنک‌کننده‌های هوایی، هزینه کم، وزن سبک و قابل حمل بودنشان می‌باشد. نخستین استفاده از این لباس‌ها به زمینه‌های هوافضـــا و نظامی، مانند لباس‌های محافظ برای خلبانان و ســـربازان، باز می‌گردد [۱۰, ۲۱]. لباس‌های خنک‌کننده هوایی معمولاً بزرگ بوده و دارای پیکربندی ســـنگین هســـتند. بنابراین کاربردهای گســـترده آنها در زندگی روزمره محدود شـــده‌اند. همچنین اســـتفاده از تکنیک‌های خنک‌کننده‌های هوایی در پارچه‌های غیر قابل نفوذ، ناراحتی حرارتی را تشـــدید می کند [۱۰]. مزیت لباس‌های خنک‌کننده هوایی در آنست که پروسه ساختشان آسان بوده و قابلیت خنک‌کردن طولانی مدت را دارا می‌باشـــند. همچنین، می‌توان تکنیک خنک‌کردن با جریان هوا را با دیگر تکنیک‌های خنک‌کنندگی نظیر اســـتفاده از مواد تغییرفازدهنده ترکیب کرد [۲۲]. به‌طور خلاصـــه، خنک‌کننده‌های هوایی، در شـــرایط ســـادگی کار و استفاده، می‌توانند پاسخگوی تقاضای کاربری عملی باشند [۱۰, ۲۳].

شکل ۳ استفاده از جلیقه‌های خنک‌کننده با جریان هوا برای انجام کار در ژاپن توسط کارگران [۲۴]

در لباس‌های خنک‌کننده مایعات، لوله‌هایی عموماً حاوی آب در گردش، به همراه یک پمپ آب برای حفظ جریان مایع خنک‌کننده درون لوله‌ها و درنتیجه کاهش دمای بدن، تعبیه شـــده‌اســـت [۱۰]. اولین لباس خنک‌کننده حاوی مایع جریان‌دار، به عنوان یک لباس محافظ برای کاهش دمای بدن یک فضانورد عرضه شد [۲۵]. این لباس‌ها یکی از امیدوارکننده ترین فناوری‌های عرضـــه جامه‌های خنک کننده می‌باشـــند. درنتیجه در بســـیاری از زمینه‌ها (نظامی، معدن و ورزشی) مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰]. مشابه لباس‌های خنک‌کننده هوایی، جامه‌های خنک‌کننده با جریان مایع، حاوی دســـتگاه‌های ســـنگینی بوده که می‌تواند از راحتی پوشش، بکاهد. ازطرفی نحوه شـــکل‌گیری جریان درون ســـیســـتم لوله‌ها ممکن اســـت پوســـت را دچار ســـرمازدگی کند. ازطرفی در این لباس‌ها می‌توان پارچه‌ها را مطابق با ابعاد سیستم لوله‌ها بافت تا انتقال حرارت افزایش یابد و از ســـنســـورهایی برای تنظیم درجه حرارت در محیط بین بدن و لباس اســـتفاده کرد [۱۰, ۲۶]. لباس‌های خنک‌کننده حاوی جریان مایع روش تولید راحتی دارند. این لباس‌ها می‌توانند دمای پوست را تا ۲ درجه ســـلســـیوس پایین آورده و حتی با دیگر روش‌های خنک‌کنندگی نیز ادغام شوند [۱۰, ۲۷].

۳-۵- جامه خنک‌کننده ترموالکتریکی[5]

در لباس‌های خنک‌کننده ترموالکتریکی، قطعاتی ترموالکتریکی حاوی موادی رسانا (یا نیمه‌رسانا) از نوع مختلف (نوع N یا P) بوده که با عبور جریان برق، به دلیل اثر پلتیه[6]، یک طرف قطعات ترموالکتریکی حرارت جذب کرده و طرف دیگر با از دست دادن حرارت، خنک می‌شود [۱۰, ۲۸, ۲۹]. دستگاه‌های ترموالکتریکی، سبک وزن و بدون نویز می‌باشند. ازطرفی، صفحات خنک‌کننده ترموالکتریکی جامد، از نظر تجاری مقیاس تولید بزرگی داشـــته و درنتیجه

[1] Phase Change Material (PCM) Cooling Garment
[2] Radiation Cooling Garment (RCG)
[3] Air Cooling Garment (ACG)
[4] Liquid Cooling Garment (LCG)
[5] Thermoelectric Cooling Garment (TECG)
[6] Peltier

استفاده از این صفحات جامد، هزینه کم و سبکی وزن جامه خنک‌کننده را به‌همراه خواهد داشت [۱۰, ۳۰]. استفاده از قطعات ترموالکتریکی در فرم غالب تجاریشان، سخت و حجیم بوده و سبب محدودکردن استفاده‌شان می‌شود. بااینحال، برای افزایش راحتی پوشش، می‌توان منسوجات ترموالکتریکی ایجاد کرد که با وجود گران بودن پروسه تولید و هزینه بالای مواد اولیه، انعطاف‌پذیر بوده و عملکرد خنک‌کنندگی پایداری دارند [۱۰, ۳۱].

۴- ارزیابی عملکرد جامه تنظیم حرارتی

مقصود از مدلسازی یک جامه تنظیم حرارتی، تبیین روشی جهت سنجش شرایط فرد تحت پوشش جامه تنظیم حرارتی، از نقطه نظر آسایش حرارتی می‌باشد. براساس روش پژوهش، می‌توان از مدل‌های تحلیلی ترموفیزیولوژیکی بدن انسان، اندازه‌گیری پارامترهای فیزیولوژی و فیزیکی و یا از روش‌های میدانی(استفاده از پرسشنامه و ارزیابی ذهنی توسط فرد تحت پوشش)، جهت سنجش کارایی جامه تنظیم حرارتی، بهره برد.

دابروسکا و همکاران برای ارزیابی عملکرد یک جامه خنک‌کننده با جریان مایع در محیط گرم، از ارزیابی‌های ذهنی شرکت‌کنندگان و آزمایش میدانی استفاده کردند. در این روش، احساس حرارتی افراد درحال فعالیت میدانی و براساس مقیاس فنگر [۳۲] سنجیده شد. همچنین پارامترهای موثر(دما و رطوبت نسبی)، برای محیط زیر بین بدن و لباس نیز اندازه‌گیری شدند. نتایج بدست‌آمده، تأثیرات مفید سیستم خنک‌کننده مورد استفاده را بر میانگین وزنی دمای پوست، پارامترهای فیزیکی محیط زیر لباس و ارزیابی‌های ذهنی شرکت‌کنندگان، تأیید کرد [۲۶].

قربک و کایاکان، برای بررسی اثرات اعمال طراحی متفاوت در جامه‌های خنک‌کننده مایع، بجای استفاده از ارزیابی‌های ذهنی افراد در حین فعالیت فیزیکی، از یک مانکن حرارتی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، برای سنجش عملکرد جامه خنک‌کننده استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که شیوه طراحی لباس در خنک سازی با مایعات بسیار مهم بوده و طرح‌های مختلف بر انتقال گرما به بدن اثر دارد [۳۳].

بااینحال، محاسبه پارامترهای فیزیکی و نرخ کل حرارت جذب شده توسط جامه تنظیم حرارتی، به تنهایی درکی از شرایط احساس حرارتی، القا نکرده و تنها عملکرد حرارتیست که توسط مدل‌های تحلیلی ساده و یا آدمک‌های تنظیم حرارتی بررسی می‌شوند.

لئون و همکاران برای مقایسه رژیم‌های خنک‌کننده مختلف در یک لباس خنک‌کننده مایع و تاثیرشان بر راحتی فیزیولوژیکی و روان‌شناختی افراد در حین ورزش، از ادراک ذهنی افراد و یک مقیاس بصری یک‌بعدی، همراه با اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف بدن، استفاده کردند. آن‌ها درک ذهنی افراد از راحتی حرارتی کلی بدن را با مقیاس‌های یک آنالوگ بصری تک‌بعدی (یک خط ۱۰۰ میلی‌متری با کلمه هیچ در سمت چپ و کلمه حداکثر در سمت راست)، ارزیابی کرده و استناد کردند که مقیاس‌های آنالوگ بصری یک‌بعدی سازگار و بسیار معتبر بوده و نسبت به مقیاس‌های انتخاب اجباری، سوگیری پاسخ کمتری ایجاد می‌کنند [۳۴, ۳۵]. بنابراین لازم است که مدل‌سازی یک جامه تنظیم حرارتی، علاوه براندازه‌گیری‌های پارامتری، بر پایه‌ای از ارزیابی‌های ذهنی نیز بنا شده باشد.

گائو و همکاران در یک مطالعه به بررسی عملکرد یک جلیقه خنک‌کننده شخصی با مواد تغییر فاز دهنده جهت بهبود شرایط آسایش حرارتی افراد برای کار اداری شبیه سازی شده در دمای ۳۴ درجه سلسیوس پرداختند. آنها در روش تحقیق خود از یک آدمک تنظیم حرارتی[1]، برای تعیین عملکرد خنک‌کنندگی جلیقه و از آزمایش میدانی و مقیاس ادراک ذهنی، جهت ارزیابی آسایش حرارتی افراد، استفاده کردند. آنها با مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام شده از بدن افراد تحت آزمایش و آدمک تنظیم حرارتی، آدمک تنظیم‌کننده حرارتی را برای ارزیابی لباس‌ها و تجهیزات خنک‌کننده شخصی هوشمند، توصیه کردند. آنها همچنین به علت بهبود یافتن احساس حرارتی افراد در اثر جلیقه خنک‌کننده، پیشنهاد کردند در شرایطی که فعالیت بدنی، تولید عرق و تبخیر زیاد نباشد، جلیقه تنظیم حرارتی می‌تواند مفید واقع شود [۱۶].

زو و همکاران برای ارزیابی عملکرد یک خنک‌کننده شخصی ترکیبی (مواد تغییرفازدهنده و جریان آب) از مدل ۲۵ قسمتی استولویک[2] [۳۶] برای بدن انسان و معادله انتقال حرارت پنس[3] [۳۷]، به‌همراه آزمایش میدانی و مقیاس درک ذهنی برای سنجش احساس و آسایش حرارتی، استفاده کردند. آنها بجای استفاده از مقیاس فنگر(محیط یکنواخت)، از مقیاس ژانگ و همکاران(محیط گذرا) [۳۸-۴۰]، بهره بردند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل بکاربرده شده در تطابق با اندازه‌گیری‌های تجربی، برای دمای قسمت خنک شده بدن، به خوبی عمل می‌کند [۴۱].

استفاده از مدل‌های پیچیده ترموفیزیولیژبکی نظیر مدل‌های چندبخشی، جهت ارزیابی عملکرد گرمایش، سرمایش و بهینه‌سازی جامه‌های تنظیم‌حرارتی، چه در فرم جلیقه‌ای و یا غیر، امری کاملا اجتناب‌شده نیست [۴۲, ۴۳]. بااینحال، به‌هنگام سنجش احساس و آسایش حرارتی انفرادی، استفاده از آزمایشات میدانی و مقیاس‌های درکی داوطلبان، به علت سادگی و سرعت زیاد، از محبوبیت بالاتری برخوردار بوده و به وفور مشاهده می‌شود. همچنین در بسیاری موارد به دلایل مشابه، عملکرد جامه تنظیم حرارتی توسط مدل‌های تحلیلی ساده [۴۴] و یا آدمک‌های تنظیم حرارتی بررسی می‌شوند. به منظور مدلسازی ارزیابی آسایش حرارتی انفرادی تحت جامه تنظیم حرارتی، توسعه مدل یکنواخت فنگر [۴۵]، امری قابل پیشنهاد است. این مدل خود برپایه آزمایش‌های میدانی پدید آمده و روابط احساس رضایت و عدم رضایت آن برمبنای معادله تعادل حرارتی بدن بیان شده‌است. ازطرفی یک کاربرد مهم شاخه‌ای از جامه‌های تنظیم حرارتی (جلیقه‌های تنظیم حرارتی بدن)، برای شرایطیست که بدن تحت فعالیت شدید قرار نداشته باشد [۱۶]؛ که مطابق با شرایط تحت پذیرش مدل فنگر می‌باشد. همچنین، استفاده از مقیاس احساس حرارتی فنگر، خود در شرایط امکان آزمایش میدانی، دارای محبوبیت است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

[1] Thermoregulatory manikin
[2] Stolwijk
[3] Pennes

فناوری جامه‌های تنظیم حرارتی، به‌عنوان یک راه‌حل کم‌هزینه، ایمن و جهت ایجاد آسایش حرارتی انسان، با تاکید بر سادگی و کارایی در استفاده، ساخت و حفظ آسایش پوشش، بطور وسیعی استفاده شده و همچنان تحت توسعه و آزمایش قرار دارند. در جهت ارزیابی آسایش حرارتی انفرادی تحت جامه‌های تنظیم حرارتی، از ادراک ذهنی داوطلبان در قالب پرسشنامه و مقیاس‌های آسایش‌حرارتی در شرایط یکنواخت و گذرا، استفاده می‌شود. ازطرفی، برخی مدل‌های پیچیده، نظیر مدل چندبخشی زیست‌گرمایی سالوم [۴۶] جهت بکارگیری در ارزیابی عملکرد جلیقه‌های آسایش حرارتی تحت اصلاحاتی قرارگرفته‌اند [۴۷]. همچنین در برخی موارد، جهت بهینه‌سازی نمونه جامه‌ای مشخص، مدلی جدید توسعه داده شده‌است [۴۲]. بااینحال، مدل‌های فنگر [۴۵] و گگی [۴۸] که در ساختار بسیار ساده می‌باشند؛ نسبت به مدل‌های چندبخشی پیچیده کاربرد بیشتری دارند. بنابراین توسعه مدل پایای فنگر برای انسان تحت پوشش جلیقه‌ای، بنابر محبوبیت و فایده تحقیقات جلیقه‌های تنظیم حرارتی، می‌تواند جهت تسریع روند توسعه و آزمایش‌های جلیقه‌های تنظیم حرارتی، مفید واقع شود.

۶- مراجع و منابع

[1] F. Wang, C. Gao, and I. Holmér, "Effects of air velocity and clothing combination on heating efficiency of an electrically heated vest (EHV): a pilot study," *Journal of occupational and environmental hygiene,* vol. 7, no. 9, pp. 501-505, 2010.

[2] F. Wang, C. Gao, K. Kuklane, and I. Holmér, "A review of technology of personal heating garments," *International journal of occupational safety and ergonomics,* vol. 16, no. 3, pp. 387-404, 2010.

[3] J. T. Eells *et al.*, "Mitochondrial signal transduction in accelerated wound and retinal healing by near-infrared light therapy," *Mitochondrion,* vol. 4, no. 5-6, pp. 559-567, 2004.

[4] Foiueyga. "Men's Heated Vest with Battery Pack, USB Electric Heating Vest Winter Lightweight Heated Jacket Vests for Men Women." Amazon. https://www.amazon.com/Foiueyga-Battery-Electric-Heating-Lightweight/dp/B0B59JSJWQ?ref_=ast_sto_dp&th=1&psc=1 (accessed.

[5] S. Mondal, "Phase change materials for smart textiles–An overview," *Applied thermal engineering,* vol. 28, no. 11-12, pp. 1536-1550, 2008.

[6] C. Gao, K. Kuklane, and I. Holmér, "Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area," *Ergonomics,* vol. 53, no. 5, pp. 716-723, 2010.

[7] Y. Bo-an, K. Yi-Lin, L. Yi, Y. Chap-Yung, and S. Qing-wen, "Thermal regulating functional performance of PCM garments," *International Journal of Clothing Science and Technology,* vol. 16, no. 1/2, pp. 84-96, 2004.

[8] K. Hasegawa, C. Negishi, F. Nakagawa, M. Ozaki, and D. I. Sessler, "Comparison of a circulating-water garment with forcedair convection during major abdominal surgery (A-505)," in *American Society of Anesthesiologists. Annual Meeting Abstracts*, 2002.

[9] A. Taguchi *et al.*, "Effects of a circulating-water garment and forced-air warming on body heat content and core temperature," *The Journal of the American Society of Anesthesiologists,* vol. 100, no. 5, pp. 1058-1064, 2004.

[10] S. Ren, M. Han, and J. Fang, "Personal cooling garments: a review," *Polymers,* vol. 14, no. 24, p. 5522, 2022.

[11] J. Billingham, "Heat exchange between man and his environment on the surface of the moon," *J. Br. Interplanet. Soc,* vol. 17, pp. 297-300, 1959.

[12] M. J. Luomala *et al.*, "Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions," *Journal of Thermal Biology,* vol. 37, no. 1, pp. 47-55, 2012.

[13] J. Smolander, K. Kuklane, D. Gavhed, H. Nilsson, and I. Holmér, "Effectiveness of a light-weight ice-vest for body cooling while wearing fire fighter's protective clothing in the heat," *International journal of occupational safety and ergonomics,* vol. 10, no. 2, pp. 111-117, 2004.

[14] S. Konz, "Personal cooling garments-a review," *ASHRAE trans,* vol. 90, pp. 499-517, 1984.

[15] Foiueyga. "Cooling Vest for Men Women with 24 Ice Packs Ice Vest for Summer Body Cooling Ice Vest for Hot Weather Work Fishing." Amazon. https://www.amazon.com/Foiueyga-Cooling-Softshell-Sleeveless-High-Temp/dp/B0BYJHCX23?ref_=ast_sto_dp&th=1&psc=1 (accessed.

[16] C. Gao, K. Kuklane, F. Wang, and I. Holmér, "Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective," *Indoor air,* vol. 22, no. 6, pp. 523-530, 2012.

[17] Z. Yang *et al.*, "3D-printed flexible phase-change nonwoven fabrics toward multifunctional clothing," *ACS Applied Materials & Interfaces,* vol. 14, no. 5, pp. 7283-7291, 2022.

[18] J. Liu, Z. Zhou, J. Zhang, W. Feng, and J. Zuo, "Advances and challenges in commercializing radiative cooling," *Materials Today Physics,* vol. 11, p. 100161, 2019.

[19] L. Cai *et al.*, "Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling," *Advanced Materials,* vol. 30, no. 35, p. 1802152, 2018.

[20] M. I. Iqbal *et al.*, "Radiative cooling nanofabric for personal thermal management," *ACS Applied Materials & Interfaces,* vol. 14, no. 20, pp. 23577-23587, 2022.

[21] M. Harrison and T. Gibson, "The history of the IAM: Protecting against the elements," *Royal Air Force Institute of Aviation Medicine,* 1982.

[22] L. Lou, Y. S. Wu, Y. Zhou, and J. Fan, "Effects of body positions and garment design on the performance of a personal air cooling/heating system," *Indoor Air,* vol. 32, no. 1, p. e12921, 2022.

[23] A. Hadid, R. Yanovich, T. Erlich, G. Khomenok, and D. Moran, "Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing a ballistic vest," *European journal of applied physiology,* vol. 104, pp. 311-319, 2008.

[24] U. AKIRA. "Cooling the Body with Fan-Equipped Clothes." Highlighting JAPAN. https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202108/202108_10_en.html (accessed.

[25] A. B. Chambers, "Controlling thermal comfort in the EVA space suit," 1970. [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/citations/19700048296.

[26] G. Bartkowiak, A. Dabrowska, and A. Marszalek, "Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment," *Applied ergonomics,* vol. 58, pp. 182-189, 2017.

[27] M. Zhang, Z. Li, Q. Wang, Y. Xu, P. Hu, and X. Zhang, "Performance investigation of a portable liquid cooling garment using thermoelectric cooling," *Applied Thermal Engineering,* vol. 214, p. 118830, 2022.

[28] C. Alaoui, "Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation," *Int. J. Eng,* vol. 5, no. 1, p. 114, 2011.

[29] W. He, G. Zhang, X. Zhang, J. Ji, G. Li, and X. Zhao, "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler," *Applied Energy,* vol. 143, pp. 1-25, 2015.

[30] Y. Xu, Z. Li, J. Wang, M. Zhang, M. Jia, and Q. Wang, "Man-portable cooling garment with cold liquid circulation based on thermoelectric refrigeration," *Applied Thermal Engineering,* vol. 200, p. 117730, 2022.

[31] Y. Zheng *et al.*, "Durable, stretchable and washable inorganic-based woven thermoelectric textiles for power generation and solid-state cooling," *Energy & Environmental Science,* vol. 15, no. 6, pp. 2374-2385, 2022.

[32] I. ISO, "10551," *Ergonomics of the thermal environment–Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales,* 2001.

[33] Ö. Kayacan and A. Kurbak, "Effect of garment design on liquid cooling garments," *Textile research journal,* vol. 80, no. 14, pp. 1442-1455, 2010.

[34] R. Hoffman and R. Pozos, "Experimental hypothermia and cold perception," *Aviation, space, and environmental medicine,* vol. 60, no. 10 Pt 1, pp. 964-969, 1989.
[35] G. R. Leon, V. S. Koscheyev, A. Coca, and N. List, "Comparison of different cooling regimes within a shortened liquid cooling/warming garment on physiological and psychological comfort during exercise," *Habitation,* vol. 10, no. 1, pp. 61-67, 2004.
[36] J. A. Stolwijk, "A mathematical model of physiological temperature regulation in man," NASA, 1971.
[37] H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm," *Journal of applied physiology,* vol. 1, no. 2, pp. 93-122, 1948.
[38] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort," *Building and Environment,* vol. 45, no. 2, pp. 399-410, 2010.
[39] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts," *Building and Environment,* vol. 45, no. 2, pp. 380-388, 2010.
[40] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts," *Building and Environment,* vol. 45, no. 2, pp. 389-398, 2010.
[41] J. Hou, Z. Yang, P. Xu, and G. Huang, "Design and performance evaluation of novel personal cooling garment," *Applied Thermal Engineering,* vol. 154, pp. 131-139, 2019.
[42] M. Itani, N. Ghaddar, K. Ghali, D. Ouahrani, and W. Chakroun, "Cooling vest with optimized PCM arrangement targeting torso sensitive areas that trigger comfort when cooled for improving human comfort in hot conditions," *Energy and Buildings,* vol. 139, pp. 417-425, 2017.
[43] P. Xu, Z. Kang, and F. Wang, "A numerical analysis of the cooling performance of a hybrid personal cooling system (HPCS): Effects of ambient temperature and relative humidity," *International journal of environmental research and public health,* vol. 17, no. 14, p. 4995, 2020.
[44] K. M. Jansen and L. Teunissen, "Analytical model for thermoregulation of the human body in contact with a phase change material (PCM) cooling vest," *Thermo,* vol. 2, no. 3, pp. 232-249, 2022.
[45] P. O. Fanger, "Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering," 1970.
[46] M. Salloum, N. Ghaddar, and K. Ghali, "A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models," *International journal of thermal sciences,* vol. 46, no. 4, pp. 371-384, 2007.
[47] M. Itani, D. Ouahrani, N. Ghaddar, K. Ghali, and W. Chakroun, "The effect of PCM placement on torso cooling vest for an active human in hot environment," *Building and Environment,* vol. 107, pp. 29-42, 2016.
[48] A. P. Gagge, "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response," *Ashrae Trans.,* vol. 77, pp. 247-262, 1971.