



On the Heat Transfer Control Methods in Temperature Regulating Textiles

Z. Zarezade¹, A. Besharat², M. Atighi³, Sh. Zohari⁴, Z. Alizadeh⁵, M. Hasanzadeh^{6*}

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology

2- B. Sc. in Materials Engineering, Yazd University

3- B. Sc. in Textile Engineering, Yazd University

4- B. Sc. in Chemistry, Yazd University

5- Ph. D. Student of Chemistry, Yazd University

6- Assistant Professor of Textile Engineering, Yazd University

Email: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

Abstract

Thermal comfort is one of the important and effective parameters on the health and efficiency of the human body, and textiles play a significant role in providing this parameter. In this regard, many engineered textiles have been proposed by adjusting different thermal mechanisms. In the present study, the recent developments in the field of active and passive temperature control (heating, cooling and two-mode textiles) have been expressed with emphasis on the effective mechanism of heat transfer in the desired textile. Finally, the used methods are compared and the challenges and opportunities in this field are pointed out.

Received: 4 August 2022

Accepted: 6 February 2023

Page Number: 43-70

Keywords:

Smart Textile,
Heat Transfer,
Radiation,
Thermal Conductivity,
Phase Change Material,
Shape Memory Material

Please Cite this Article Using:

Zarezade, Z., Besharat, A., Atighi, M., Zohari, Sh., Alizadeh, Z., & Hasanzadeh, M. (2024). On the Heat Transfer Control Methods in Temperature Regulating Textiles. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(130), 43-70, [In Persian].



روش‌های کنترل انتقال حرارت در منسوجات تنظیم‌کننده دما

زهرا زارع‌زاده^۱، عارف بشارت^۲، میلاد عتیقی^۳، شادی زهری^۴، زهرا علیزاده^۵، مهدی حسن‌زاده^{۶*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس مهندسی مواد، دانشگاه یزد

۳- کارشناس مهندسی نساجی، دانشگاه یزد

۴- کارشناس شیمی، دانشگاه یزد

۵- دانشجوی دکتری شیمی، دانشگاه یزد

۶- استادیار مهندسی نساجی، دانشگاه یزد

پیام نگار: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

چکیده

آسایش حرارتی، یکی از مشخصه‌های مهم و مؤثر بر سلامتی و کارایی بدن انسان است که منسوجات در تأمین این مشخصه نقش به‌سزایی دارند. در این راستا منسوجات مهندسی‌شده بسیاری با تنظیم سازوکارهای مختلف حرارتی پیشنهاد شده‌است. در مطالعه حاضر، پیشرفت‌های اخیر در زمینه کنترل فعال و غیر فعال دما (منسوجات گرم‌کننده، سردکننده و دوحالتی) با تأکید بر سازوکار مؤثر بر انتقال حرارت در منسوج مورد نظر، بیان شده‌است. در پایان، روش‌های به‌کار گرفته‌شده، مقایسه و به‌چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این زمینه اشاره شده‌است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

شماره صفحات: ۴۳ تا ۷۰

کلیدواژه‌ها:

منسوجات هوشمند،

انتقال حرارت،

تابش حرارتی،

هدایت حرارتی،

مواد تغییر فازدهنده،

مواد حافظه‌شکل

* یزد، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی

استناد به مقاله:

زارع‌زاده، زهرا، بشارت، عارف، عتیقی، میلاد، زهری، شادی، علیزاده، زهرا، و حسن‌زاده، مهدی. (۱۴۰۲). روش‌های کنترل انتقال حرارت در منسوجات تنظیم‌کننده دما، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۲(۱۳۰)، ۴۳-۷۰.

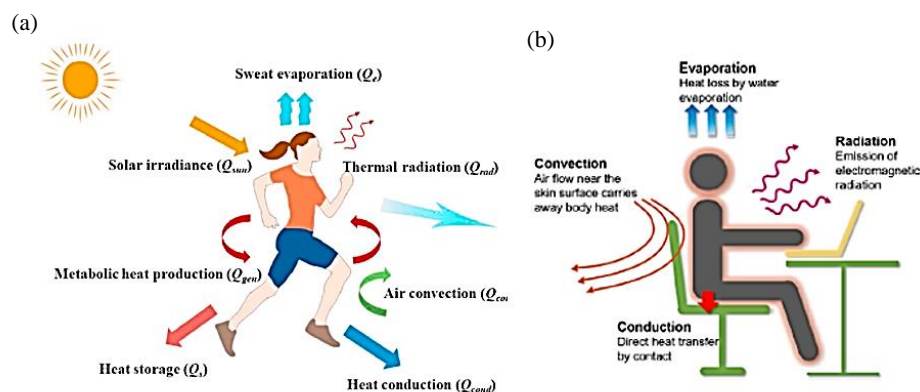
۱. مقدمه

سوی دیگر، در زمستان عمدتاً حرارت از پوست به محیط منتقل و محیط باعث کاهش دمای پوست می‌شود. علاوه بر این، نرخ انتقال حرارت بین محیط و پوست پوشیده‌شده با منسوجات متفاوت است و به مواد، ریزساختار و طراحی منسوجات بستگی دارد. به‌طور کلی، منسوجات سنتی نمی‌توانند به‌طور مؤثر خروج حرارت را از بدن انسان در شرایط سرد سرکوب کنند و هم‌چنین نقش کمی در بهبود خروج حرارت در شرایط گرم دارند و در نتیجه باعث افزایش دمای پوست می‌شوند. بنابراین، تلاش‌های متعددی برای کشف منسوجات تنظیم‌کننده حرارت پیشرفته برای گسترش دامنه دمای راحتی بدن انسان، در حال انجام است [۳].

به‌طور کلی، چهار مسیر مختلف انتقال حرارت به تنظیم دمای بدن انسان کمک می‌کنند: تابش^۱، هدایت^۲، همرفت^۳ و تبخیر^۴ (شکل (۱)). این چهار سازوکار با یکدیگر هم پوشانی دارند و اهمیت آن‌ها در شرایط مختلف متفاوت است. به‌عنوان مثال، از دست رفتن حرارت بدن انسان از راه تشعشع در محدوده طول موج فروسرخ متوسط^۵ (IR)، بخش عمده‌ای از انتقال حرارت بدن را زمانی که فرد در محیط‌های داخلی قرار دارد، شامل می‌شود؛ اما در طول ورزش شدید، بدن انسان حرارت زیادی را از راه تبخیر عرق از دست می‌دهد [۱].

آسایش حرارتی شرایط ذهنی است که رضایت از محیط حرارتی را بیان می‌کند؛ بدین معنی که فرد نه خیلی سرد و نه خیلی گرم است. حفظ آسایش حرارتی بسیار مهم است، زیرا شرایط حرارتی بدن انسان بر سلامت جسم و روان او بسیار مؤثر است. اگر دمای مرکزی بدن به شرایط گرم‌زدگی (دمای بیشتر از 38.3°C - 37.5°C) یا سرمازدگی (دمای کمتر از 35°C) برسد، به‌طور بالقوه برای انسان خطرناک است و باعث کاهش کارایی او می‌شود [۱]. از طرفی، به‌منظور راحتی حرارتی افراد، مقدار زیادی از انرژی صرف فرایند سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها می‌شود؛ اما با این حال به‌دلیل تفاوت‌های فردی مانند سن، جنسیت و فیزیولوژی، راحتی حرارتی در یک مکان برای تمامی افراد ایجاد نمی‌شود. روش‌های مدیریت حرارتی شخصی، به جای خنک‌کردن و گرم‌کردن کل فضای ساختمان، یک تنظیم دمای محلی را در اطراف ساکنان ایجاد می‌کند و ظرفیت زیادی برای صرفه‌جویی در انرژی ساختمان دارد [۲].

نکته مهم دیگر این است که انتقال حرارت به‌شدت به دمای محیط خارجی بستگی دارد. در تابستان، مقادیر زیادی حرارت از محیط خارجی به پوست انتقال می‌یابد و دمای پوست را بالا می‌برد. از



شکل ۱. (a) روش‌های انتقال حرارت از بدن به محیط در فضای داخلی [۱] (b) روش‌های انتقال حرارت از بدن به محیط و از محیط به بدن در فضای بیرونی [۳].

Figure 1. (a) methods of heat transfer from the body to the environment in the indoor space [1] (b) methods of heat transfer from the body to the environment and from the environment to the body in the outdoor space [3].

1. Radiation 2. Conduction 3. Convection 4. Evaporation 5. Mid-Infrared

تبخیر نقش مهمی در تنظیم حرارت بدن انسان دارد. حتی در حالت خفیف، حدود ۲۰ درصد از اتلاف حرارت در بدن خشک انسان، متکی به از دست دادن بخار آب از راه تعریق نامحسوس است. با افزایش بیشتر بار حرارتی و در جایی که حرارت اضافی نمی‌تواند به‌طور مؤثر به‌وسیله مسیره‌های دیگر انتقال حرارت دفع شود، تبخیر عرق به انتقال بیشتر حرارت کمک می‌کند و به مسیر اصلی انتقال حرارت بدن انسان تبدیل می‌شود؛ مانند ورزش‌های سنگین و محیط‌های گرم/مرطوب [۴].

از طرفی روش‌های کنترل دمایی منسوج را می‌توان به دو دسته روش‌های فعال و غیر فعال تقسیم کرد. منسوجات غیرفعال برای اهداف گرمایش و سرمایش، از راه کنترل تابش حرارت بدن انسان و هدایت عمل می‌کنند. این‌گونه منسوجات عموماً از طراحی و توسعه مواد پیشرفته استفاده می‌کنند و بدون مصرف انرژی اضافی تنظیم حرارتی را انجام می‌دهند. هم‌چنین این دیدگاه، منسوجات پاسخگوی هوشمند با مواد تغییر فاز دهنده^۱ (PCM) و با تغییرات ساختار دینامیکی^۲ را در بر می‌گیرد؛ اما در مورد منسوجات گرم‌کننده و یا خنک‌کننده فعال از انرژی اضافی مانند انرژی باتری و یا قالب‌های یخ برای تأمین سرمایش یا گرمایش اضافی استفاده می‌شود [۱].

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، مطالعات زیادی در زمینه کنترل حرارت بدن از راه منسوجات، انجام شده است، اما در میان آن‌ها، تاکنون مطالعه‌ای که به‌صورت جامع، روش‌های گوناگون تنظیم دما را در منسوجات، از دید سازوکار مؤثر انتقال حرارت دسته‌بندی کند، مشاهده نشد. لذا در این مطالعه ضمن تقسیم‌بندی تحقیقات انجام‌شده بر اساس سازوکار مؤثر انتقال حرارت، هدف سرمایش و گرمایش در هر تحقیق بیان شده و با بیان نتایج به‌دست‌آمده، کاستی‌ها و برتری‌های روش‌های گوناگون بیان شده است؛ به‌طوری‌که خواننده درنهایت با سازوکارهای کنترل دما در منسوجات، مواد مورد استفاده در این راستا و نتایج حاصل از آزمون‌های حرارتی مختلف آشنا شود.

۱-۱ انتقال حرارت تابشی

پوست انسان یک ساطع‌کننده عالی امواج فروسرخ است (ضریب نشر=۰/۹۸). از این رو تابش، نقش مهمی در انتقال حرارت

بدن انسان دارد؛ به‌طوری‌که ۵۰ درصد اتلاف حرارتی در محیط‌های داخلی به‌صورت تابش است. در نتیجه باید متناسب با هدف خنک‌کنندگی یا گرم‌کنندگی، ویژگی نوری فروسرخ منسوج طراحی شود [۱].

انتقال حرارت از طریق تابش بر اساس قانون تابش کیرشهوف به‌گونه‌ای است که $\rho + \tau + \varepsilon = 1$. در این معادله، ε میزان نشر یا به‌عبارتی تابش را نشان می‌دهد، τ جزء انتقال طیفی است و بیانگر میزان نور عبوری از منسوج است و ρ به مؤلفه بازتاب طیفی اشاره دارد (شکل (۲)). برای ایجاد خنک‌کنندگی باید پرتوهای بدن انسان تا حد امکان پراکنده شوند. بنابراین منسوجات شفاف در طول موج فروسرخ مناسب هستند ($\tau = 1$). بهترین راه حل بعدی طراحی منسوجاتی با انتشار بالا ($\varepsilon = 1$) است که می‌تواند تا حد زیادی تشعشعات بدن انسان را ساطع کند. هر دو روش می‌تواند به‌طور مؤثر انتقال حرارت را از راه تابش تسریع کند. از سوی دیگر، یک بازتابنده متوسط امواج فروسرخ ($\rho = 1$) برای گرمایش مناسب است. لازم به ذکر است که در هر دو حالت سرمایش و گرمایش، در عمل باید منسوجات در محدوده طول موج نور مرئی، مات باشند [۳ و ۱].

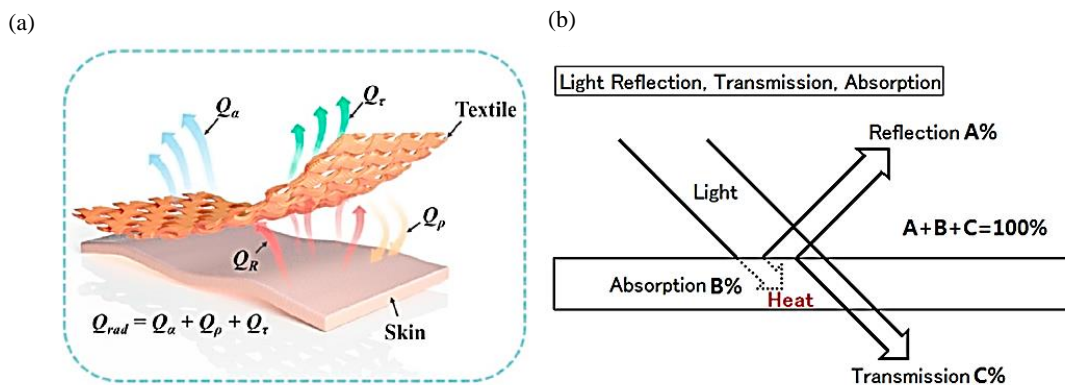
۲-۱ مواد پاسخگو با تغییرات ساختاری پویا (SMM)

مواد حافظه‌شکل^۳ (SMM) مواد هوشمندی هستند که می‌توانند تغییر شکل تنظیم‌شده قابل توجهی را با قرارگرفتن در معرض یک محرک خارجی نشان دهند و پس از حذف آن عامل، شکل قبلی خود را بازیابی کنند. بسپارهای حافظه‌شکل پس از آلیاژهای حافظه‌شکل کشف شدند. بسپارهای حافظه‌دار^۴ (SMP) برای اولین بار در فرانسه توسعه یافتند و به‌وسیله شرکت Nippon Zeon در ژاپن و در سال ۱۹۸۴ تجاری شده‌اند. این مواد در بسیاری از زمینه‌های منسوجات استفاده می‌شوند [۵].

SMPها این توانایی را دارند که محرک‌های خارجی را مانند دما، pH، مواد شیمیایی، حرارت، نور و رطوبت به‌روشی از پیش تعیین‌شده حس کنند و به آن‌ها پاسخ دهند (شکل (۳)). این مواد دارای خاصیت ارتجاعی مختلفی دارند (از شیشه سخت تا لاستیک نرم) [۶]. چنان‌که در شکل (۳) پیداست، حالت ارتجاعی ماده حافظه‌شکل با اضافه‌شدن الیاف شیشه، کاهش یافته است.

3. Shape Memory Materials
4. Shape Memory Polymers

1. Phase Change Materials
2. 2. Shape Memory Materials



شکل ۲. (a) تقسیم انتقال حرارت تابشی از بدن به محیط [۱]، (b) تقسیم انتقال حرارت تابشی از محیط به بدن [۳].
 Figure 2. (a) distribution of heat radiation from the body to the environment [1], (b) distribution of heat radiation from the environment to the body [3].



شکل ۳. ردیف اول: برگشت یک ماده حافظه شکل خالص، ردیف دوم: بازگشت همان ماده به علاوه الیاف شیشه [۶].
 Figure 3. First row: return of a pure shape memory material, second row: return of the same material plus glass fibers [6].

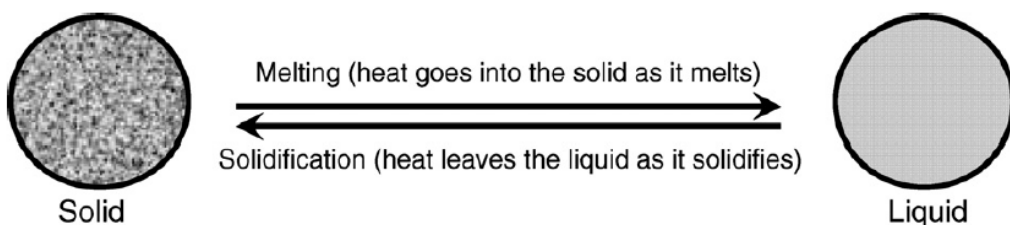
دما کاهش می‌یابد، میکروکپسول‌ها این انرژی حرارتی ذخیره شده را آزاد می‌کنند و مواد تغییر فازدهنده دوباره جامد می‌شوند. تولیدکنندگان اکنون می‌توانند از مواد تغییر فاز برای ایجاد راحتی حرارتی در طیف گسترده‌ای از دما استفاده کنند. استفاده از مواد تغییر فازدهنده، ظرفیت عایق حرارتی را بهبود می‌بخشد. در حال حاضر PCM ها به‌طور گسترده در انواع مختلف پوشاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و میکروکپسول‌های حاوی PCM را می‌توان مستقیماً در الیاف و فوم‌ها ادغام و یا به‌عنوان پوشش بر روی پارچه‌ها استفاده کرد [۷].

انواع مختلفی از مواد تغییر فاز دهنده آلی و معدنی وجود دارد؛ اما مواد تغییر فاز دهنده آلی دمای نزدیک‌تری به دمای عملکردی در منسوجات دارند.

۳-۱ مواد تغییر فازدهنده (PCMs)

یک ماده تغییر فازدهنده (PCM) قادر است مقدار زیادی انرژی را به‌شکل حرارت نهان در طول تغییر فاز بین فازهای جامد-مایع در یک محدوده دمایی باریک جذب یا آزاد کند. برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰، تیم تحقیقاتی ناسا از فناوری میکروکپسول‌های حاوی PCM در ساختار منسوج برای بهبود عملکرد حرارتی آن استفاده کرده است. هدف اصلی استفاده از این پارچه‌ها در لباس‌های فضانوردان بوده تا حفاظت حرارتی بهتری در برابر نوسانات شدید دما در فضای بیرونی ایجاد کند [۷].

منسوجات حاوی مواد تغییر فازدهنده بلافاصله با تغییرات دمای محیط و نواحی مختلف بدن، واکنش نشان می‌دهند. هنگامی که افزایش دما رخ می‌دهد، میکروکپسول‌های حاوی PCM با جذب حرارت و ذخیره این انرژی، ذوب می‌شوند (شکل (۴)) و هنگامی که



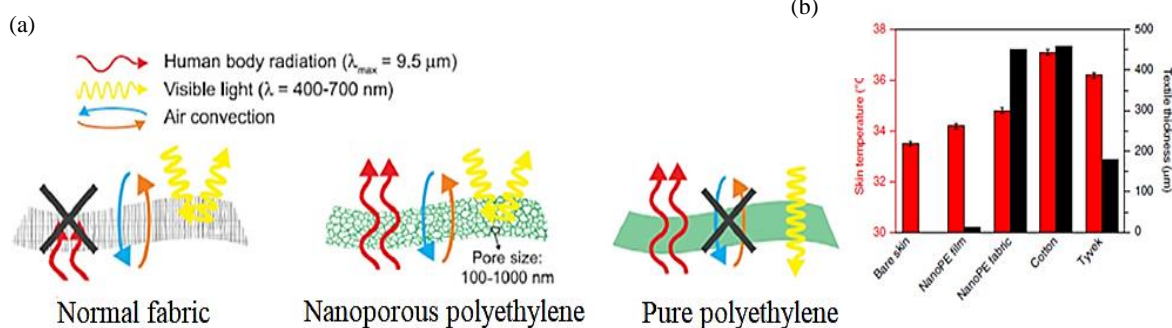
شکل ۴. شماتیکی از عملکرد حرارتی میکروکپسول‌های حاوی مواد تغییر فازدهنده.

Figure 4. Schematic of thermal performance of microcapsules containing phase change materials.

محدوده طول موج نور مرئی قابل مقایسه بوده، (طول موج نور مرئی برابر با ۷۰۰-۴۰۰ nm است) اما اندازه این منافذ بسیار کوچک‌تر از طول موج MIR (۷۰۰-۱۵۰۰ nm) است و عدم تطابق بین محدوده طول موج نور MIR و محدوده اندازه منافذ وجود دارد. هم‌چنین در این مطالعه با طراحی انجام‌شده، منسوج تولیدی دارای نفوذپذیری کافی هوا، سرعت تخلیه آب و استحکام مکانیکی برای پوشیدن است. طبق اندازه‌گیری‌های انجام‌شده با دستگاهی شبیه‌ساز، دمای پوست هنگام استفاده از پارچه پلی‌اتیلن خالص و پارچه نانوپلی‌اتیلن فراوری شده، به ترتیب $2-2/7^{\circ}\text{C}$ کمتر از دمای پوست پوشانده‌شده با پنبه است.

۲. منسوجات پیشرفته با خواص انتقال حرارت تابشی تنظیم شده

اولین منسوج خنک‌کننده را هیوس و همکارانش [۸] از راه کنترل سازوکار انتقال حرارت تابشی و از جنس پلی‌اتیلن نانو متخلخل^۱ (NanoPE) در سال ۲۰۱۶ به‌طور تجربی پیشنهاد کردند (شکل (۵)). در این منسوج، منافذ به هم پیوسته که با قطر ۵۰-۱۰۰۰ nm دارند در پلی‌اتیلن تعبیه شده است. آنان نشان دادند که پلی‌اتیلن نانو متخلخل نسبت به تشعشعات فروسرخ متوسط بدن انسان شفاف است، اما به دلیل اندازه کوچک منافذ، این منسوج نسبت به نور مرئی مات است. الیاف، نور مرئی را به شدت از طریق پراکندگی Mie پراکنده می‌کنند؛ زیرا محدوده اندازه منافذ با



شکل ۵. (a) مقایسه سازوکارهای انتقال حرارت از منسوج معمولی، پلی‌اتیلن متخلخل و پلی‌اتیلن معمولی [۸].

(b) نتیجه آزمون حرارتی الیاف متخلخل نانوپلی‌اتیلن [۹].

Figure 5. (a) Comparison of heat transfer mechanisms from ordinary textile, porous polyethylene and ordinary polyethylene [8], (b) result of heat test of nano polyethylene porous fibers [9].

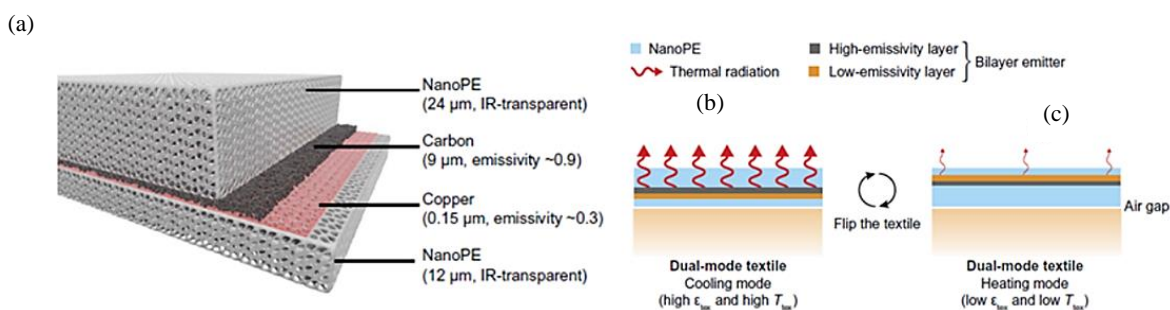
باشند، اما هم‌چنان از نظر حرارتی مانند کسانی که لباس‌های نخی می‌پوشند احساس راحتی می‌کنند [۹].

تحقیقاتی در راستای بهبود راحتی منسوج مانند آب‌دوستی و استحکام مکانیکی انجام شده است. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادشده، استفاده از ترکیب الیاف پلی‌اتیلن و پنبه است [۱۱]. تنظیم تابش سطحی بین منسوجات و بدن به‌عنوان یک مسیر کارآمد برای تحقق تنظیم دمایی است، اما انتشار سطح بیرونی منسوجات بیش از سطح داخلی اهمیت دارد؛ زیرا تشعشع در تبادل حرارت بین سطح بیرونی پارچه و محیط نسبت به بدن انسان و سطح داخلی منسوجات، غالب‌تر است.

در پژوهشی هیوس و همکارانش [۱۰]، یک منسوج با عملکرد دوگانه پیشنهاد کردند که با استفاده از تابش بسیار متفاوت دو سطح خود، سرمایش و گرمایش تابشی غیرفعال را انجام داده است. سطحی که رو به بیرون نشر حرارت زیادی دارد (لایه کربن با ضخامت نانومتری)، اثر خنک‌کننده تابشی $3/1^{\circ}\text{C}$ را به همراه دارد، درحالی‌که سطحی که نشر حرارت کم (لایه مس با ضخامت نانومتری) هنگامی که رو به محیط بیرون باشد، منجر به اثر گرمایش تابشی $3/4^{\circ}\text{C}$ می‌شود. هم‌چنین ضخامت نامتقارن لایه نانوالیاف پلی‌اتیلن باعث نامتقارن شدن ضخامت انتشار حرارت شده و دو ضریب انتقال حرارت متفاوت ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده، هنگامی که لایه با ضخامت انتشار کم رو به بیرون باشد، انتشار حرارت کاهش یافته و شاهد اثر گرم‌شوندگی هستیم و هنگامی که لایه با ضخامت انتشار بالا رو به بیرون باشد، شاهد اثر خنک‌شوندگی هستیم.

در گام بعدی، پنگ و همکاران [۹]، با روش اکستروژن^۱، تولید الیاف نانو PE یک‌نواخت و پیوسته با نرمی پنبه را در مقیاس بزرگ صنعتی طراحی کرده‌اند. روش تولید نانوالیاف متخلخل پلی‌اتیلن، چنین بیان شده است که روغن پارافین به‌عنوان حلال PE انتخاب شده، زیرا دارای خواص شیمیایی مشابه PE است و از هیدروکربن‌های غیرقطبی، اشباع و با وزن مولکولی بالا تشکیل شده است. خواص مشترک، باعث سازگاری آن‌ها با یکدیگر شده و یک محلول همگن بسیار چسبناک را تشکیل داده است که می‌تواند به‌طور مداوم به‌وسیله یک دستگاه اکستروژن^۲ صنعتی، اکستروژن شود تا الیافی با قطرهای ریزمقیاس تشکیل شود. پس از اکستروژن شدن، لیف پلی‌اتیلن روغنی به‌سرعت خنک شده و سپس پلی‌اتیلن جامد از روغن پارافین فاز مایع جدا شده است. متیلن کلرید، که می‌تواند به‌طور انتخابی روغن پارافین را جدا کند، برای استخراج فاز روغن از الیاف PE روغنی استفاده شده است. حذف فاز روغن، فضای نانومتخلخلی را در ماتریس جامد پلی‌اتیلن جاسازی کرده و میکروالیاف نانومتخلخل پلی‌اتیلن ایجاد شده است.

پارچه بافته‌شده میکروالیاف نانومتخلخل پلی‌اتیلن اثر خنک‌کنندگی تابشی مناسبی از خود نشان داده است، (دمای پوست $2/3^{\circ}\text{C}$ کمتر از پارچه‌های پنبه‌ای معمولی است)؛ زیرا نواحی خنک‌شده در الیاف به‌طور مؤثر نور مرئی را پراکنده می‌کنند و بدون دخالت در عبور نور مادون قرمز میانی، پارچه را نسبت به نور مرئی مات کنند. هم‌چنین این پارچه دارای قابلیت پوشیدن و دوام بهبود یافته است. افرادی که از پارچه نانوپلی‌اتیلن متخلخل استفاده می‌کنند می‌توانند در محیطی با $2/3^{\circ}\text{C}$ دمای بیشتر حضور داشته



شکل ۶. (a) لایه‌های مختلف منسوج طراحی شده، (b) حالت خنک‌شوندگی، (c) حالت گرم‌شوندگی [۱۰]

Figure 6. (a) different designed textile layers, (b) cooling mode, (c) heating mode [10].

1. Extrusion

2. Extruder

در روش دیگری بازتاب نور خورشید را می‌توان کنترل کرد و باعث ایجاد حس خنکی در بدن شد. در بررسی‌ها، انواع مختلفی از مواد بازتابنده مانند نقره، تیتانیوم، آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید قلع ذوب‌شده، آنتیموان، رنگدانه‌های آزو و ترکیبات طبیعی (مانند کلروفیل) برای ایجاد پوشش بر روی منسوجات استفاده شده‌اند که با افزایش بازتاب نور خورشید باعث خنک‌کنندگی شده‌اند. به‌طور مثال پوشش ذرات TiO_2 نامنظم با اندازه $293\text{nm}-618\text{nm}$ در مخلوطی از فاز آناناز و روتیل روی پارچه پنبه‌ای می‌تواند دما را $3/91^\circ\text{C}$ کاهش دهد [۱۱].

در مطالعه دیگری، کای و همکاران [۱۲]، منسوجات نانوکامپوزیت جدیدی را برای خنک‌سازی تابشی در فضای باز با استفاده از پلی‌اتیلن و نانوذرات اکسید روی (ZnO-PE) پیشنهاد کردند که در شکل (۷) آورده شده است. آنان بیان کردند که قبلاً مشخص شده است که منسوج نسبت به تابش IR شفاف است و می‌تواند به‌طور کامل تشعشعات بدن انسان را در فضای داخلی برای خنک‌کردن منتقل کند، اما انعکاس خورشیدی آن به دلیل ضریب شکست نسبتاً پایین ($n \approx 1/5$) برای اهداف محیط بیرون رضایت‌بخش نیست. از طرفی جامدات معدنی معمولاً ضریب شکست بالاتری نسبت به بسپارها دارند؛ اما اغلب مقداری جذب نور مرئی یا فروسرخ متوسط دارند. اکسید روی یک عنصر متمایز است که نه تنها دارای ضریب شکست بالا ($n \approx 2$) است، بلکه جذب کمی از طول موج‌های مرئی (400nm) و جذب متوسطی از طول موج فروسرخ (16nm) را دارد و این ویژگی‌های ذاتی، ترکیب ZnO و PE را به‌عنوان ماده پایه برای ایجاد انتخاب‌پذیری تابش، برای اهداف خنک‌کننده در فضای باز مناسب می‌سازد.

الیاف مورد نظر، با مخلوط کردن ذرات ZnO با پلی‌اتیلن ذوب‌شده با نسبت وزنی $\text{ZnO:PE} = 2:5$ در روغن پارافین (نسبت پلی‌اتیلن به روغن ۱:۵) ساخته و سپس مخلوط کامپوزیت به‌صورت ذوبی تحت فشار قرار داده شده است. در نهایت استخراج روغن پارافین از فیلم با متیلن کلرید انجام شده است. بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساختار متخلخل مواد نساجی را نشان داده است. این منسوجات می‌توانند دمای پوست شبیه‌سازی‌شده را در مقایسه با منسوجات معمولی مانند پنبه در شرایط اوج نور در روز، $5-13^\circ\text{C}$ خنک‌تر کنند [۱۲].

هم‌چنین در بررسی‌های دیگر روش‌هایی مانند استفاده از الیاف فلزی مختلف، نخ‌های کامپوزیت فلز و بسپار برای دست‌یابی به بازتاب حرارت بررسی شده است، اما در این موارد سخت و شکننده بودن منسوج باعث عدم کاربرد عملی آن خواهد شد. در برخی بررسی‌های دیگر اصلاح سطح با استفاده از نانوذرات فلزی برای بازتاب امواج فروسرخ پیشنهاد شده است.

در مطالعه‌ای، سانگ و همکارانش [۱۳]، الیافی را از ترکیب علم نانو و فناوری ریسندگی مذاب به‌روش میکروفیبریلار درجا^۱ تولید کردند که قابلیت خنک‌سازی غیرفعال بدن انسان را دارد. برای ساخت الیاف ابتدا پودرهای PVDF و PEO با نسبت وزنی معین در آسیاب گلوله‌ای کاملاً مخلوط و سپس با استفاده از رئومتر موبین^۲ در دمای 210°C ذوب شده‌اند. الیاف به‌دست‌آمده به مدت ۳ ساعت در آب دیونیزه غوطه‌ور شده و در نتیجه الیاف متخلخل PVDF به‌دست‌آمده در دمای 60°C خشک شده‌اند و در نهایت منسوج مورد نظر از بافت الیاف، به‌دست آمده است. ساختار داخلی الیاف با میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شده است. آزمون حرارتی منسوج ساخته‌شده، در دو شرایط محیط داخلی و خارجی انجام شده است. در شرایط محیط داخلی از محیط بسته‌ای با دمای 30°C و رطوبت نسبی ۸۲ درصد به‌همراه یک صفحه داغ شبیه‌ساز پوست انسان استفاده شده است. برای ثبت دمای نمونه از ترموکوپل‌های نوع K به‌همراه دوربین‌های IR استفاده شده است. نتایج این آزمون نشان‌دهنده جذب و نشر بالای امواج نور مرئی و فروسرخ الیاف PVDF متخلخل است و این خاصیت باعث بهبود خنک‌کنندگی این نوع منسوج شده است. چنان‌که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در آزمون حرارتی محیط داخلی، منسوجی که دارای درصد بیشتری از الیاف PVDF متخلخل است به‌موجب انتشار یا به‌عبارتی تابش بالای حرارت همانند پوست برهنه انسان عمل می‌کند و بدن را در دمای داخل خانه حدود $2/7^\circ\text{C}$ خنک‌تر کرده است، در صورتی که پارچه پنبه‌ای به‌دلیل انتشار پایین حرارت، همانند عایق است و به‌عبارتی حرارت بین پوست و پارچه به دام افتاده است [۱۳].

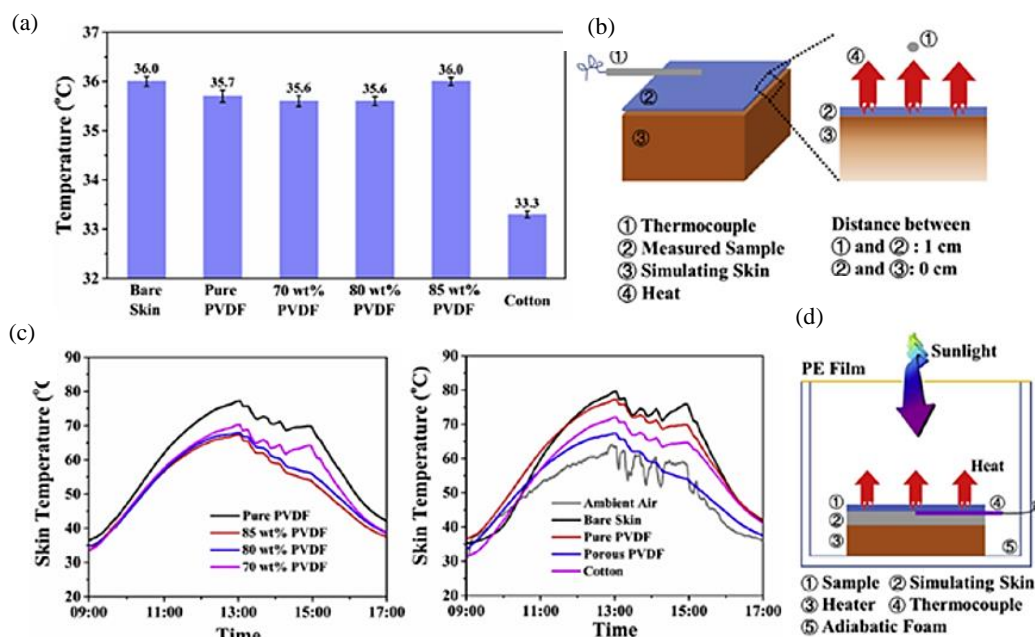
برای انجام آزمون حرارتی در محیط خارجی دستگاهی طراحی شده و در شرایط تابستان و در معرض نور شدید خورشید اندازه‌گیری‌ها

1. Situ Microfibrillar Method
2. Capillary Rheometer

انجام شده است. دستگاه آزمون حرارتی شامل صفحه داغ شبیه ساز پوست انسان، دماسنج نوع K برای اندازه گیری دمای پوست و به منظور جلوگیری از انتقال حرارت به روش هدایت و همرفت به وسیله دیواره های تختی محاط شده و سقف آن از جنس پلی اتیلن بوده است. در این آزمون از سه نوع پارچه حاوی الیاف خالص PVDF و الیاف متخلخل PVDF و پارچه پنبه ای استفاده شده است. باتوجه به این که منبع اصلی حرارت در محیط بیرون از خانه تابش خورشید است، قدرت بازتاب و نشر نور به وسیله پارچه بر دمای بدن به شدت اثر دارد. طبق نتایج، الیاف تولید شده به دلیل اثر پراکندگی قوی ساختار متخلخل و تفاوت اندازه منافذ به شدت نور مرئی و مادون فروسرخ را بازتاب داده و بنابراین دمای پوست در این حالت نسبت به بقیه موارد کمتر گزارش شده و نسبت به پارچه پنبه ای کاهش دمای ۵°C مشاهده شده است [۱۳]. طرحواره ای از آزمون های انجام شده به همراه نتایج آنها در شکل (۷) آورده شده است.

بازتابش پارچه پلی استر، وی و همکارانش [۱۴]، مطالعه کردند. در این مطالعه، پارچه درون محلول رقیق سلولز استات Al_2O_3 - غوطه ور و سپس در هوا با دمای ۲۲°C خشک شده است. در طی این مطالعه ۳ گرم Al_2O_3 (۹۹/۹ درصد پایه فلزی، فاز α ، ۳۰ نانومتر) ابتدا در محلول ۲۰ ml استون و ۲۰ ml الکل، حل و سپس ۶/۵ گرم سلولز استات در محلول سفید فوق حل شده است. پس از آن محلول به مدت ۱۰ دقیقه به روش فراصوت مخلوط شده است؛ محلول پیش ساز به دست آمده رنگ آمیزی شده و روی منسوجات آغشته شده یا با میله مایر^۱ روی بسترهای پلی اتیلن ترفتالات (PET) پوشانده شده است. منسوجات اصلاح شده با سلولز استات Al_2O_3 (۲۰۰ نانومتر) دارای تابش امواج مادون قرمز با موج بلند (LWIR، ۸-۱۳ میکرومتر) و بازتاب انرژی خورشیدی هستند. با این حال، اصلاح سلولز استات Al_2O_3 (۲۰۰ نانومتر) منسوجات را سفت کرده و پوشیدن منسوجات را بیش از حد سخت کرده است [۱۴]. نتایج دستگاه شبیه ساز پوست نشان دهنده کاهش ۱/۵°C دمای پوست در مقایسه با پارچه نخی است.

اثر پوشش آلومینا-سلولز استات را برای خنک کنندگی و افزایش



شکل ۷. (a) نتایج حاصل از آزمون حرارتی در محیط داخلی، (b) طرحواره دستگاه شبیه ساز پوست در محیط داخلی، (c) نتایج حاصل از آزمون حرارتی در محیط خارجی، (d) طرحواره دستگاه شبیه ساز پوست در محیط خارجی [۱۳].

Figure 7. (a) the results of the heat test in the indoor environment, (b) the schematic of the skin simulator in the indoor environment, (c) the results of the heat test in the outdoor environment, (d) the schematic of the skin simulator in the outdoor environment [13].

کیم و همکارانش [۱۵]، به بررسی منسوجات تطبیقی خورشیدی^۱ (SAT) به کمک لایه آلومینیوم در مقیاس نانو به روش کند و پاش^۲ پرداخته‌اند. در این مطالعه کند و پاش با گاز پر فشار آرگون انجام شده است که امکان نفوذ عمیق آلومینیوم را به داخل سطح زیرین پارچه فراهم کرده و باعث مسدودشدن نفوذ انرژی خورشید شده است و در نتیجه پوست انسان خنک می‌شود. منسوجات پایه استفاده شده برای تولید منسوجات تطبیقی خورشیدی از نخ‌های بافتنی تشکیل شده است. براساس نتایج آزمون FTIR و طیف‌سنجی نوری که بر روی منسوجات با پوشش نانولایه آلومینیوم با ضخامت‌های مختلف انجام شده، بازتابش نور و انتقال فرسوخ به طور چشم‌گیری به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. ارزیابی‌های حرارتی در فضای باز برای بررسی بیشتر عملکرد پارچه واقعی در محیط واقعی نور خورشید به واسطه پوست شبیه‌سازی شده، انجام شده است که نشان داده است که دمای پارچه SAT با اختلاف کمی بالاتر از پارچه معمولی است، اما دمای پوست شبیه‌سازی شده به طور رضایت‌بخشی 2°C پایین‌تر از حالت معمولی بوده، این در حالی است که دمای محیط 32°C بوده است.

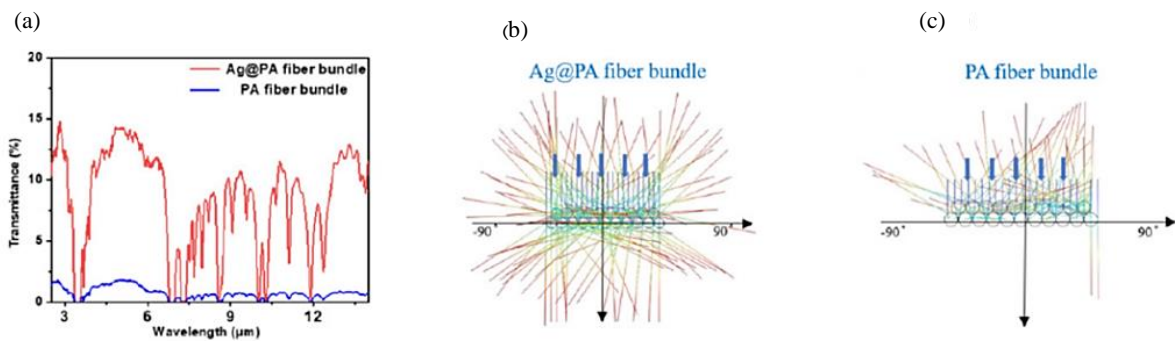
در مطالعه دیگری وانگ و همکارانش [۱۶]، با الهام از عملکرد خنک‌کننده میکروموی^۳ مورچه‌های نقره‌ای صحرا^۴، یک پارچه محافظ در برابر حرارت خورشیدی با کامپوزیت نوار میکرو کریستال^۵ اکسید روی (ZnO) تولید کرده‌اند. پارچه کامپوزیت از روغن آمینوسیلیکون (ASO) و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) تشکیل شده است. کامپوزیت ایجاد شده با یک دستگاه پوشش با سرعت حدوداً 1 m/min روی پارچه پلی‌استر تمیز پوشش داده شده و به دنبال آن پخت در دمای 100°C به مدت ۲۰ دقیقه انجام شده است. طبق آزمون SEM پوشش ZnO MCB به‌طور یک‌نواخت و پیوسته بر روی سطح پارچه نشسته است. هم‌چنین طبق طیف Vis-NIR ($400\text{--}1800\text{ nm}$) نشان داده شده که پارچه با پوشش با ۳۰ درصد ZnO MCB بازتاب بالایی در ناحیه موج کوتاه دارد، درحالی‌که بازتابش در نور مرئی و محدوده NIR بیش از ۹۰ درصد است. طبق بررسی‌های حرارتی، نشان داده شده که هدایت حرارتی پارچه PZ-30 در مقایسه با پارچه پلی‌استر بدون پوشش حدود

۵۰ درصد بهبود یافته است و پارچه PZ-30 با بالاترین میزان انتشار LWIR در مقایسه با پارچه پلی‌استر بدون پوشش دارای افزایش ۲۵ درصدی انتشار حرارت در منطقه طول موج $5\text{--}14\text{ nm}$ است. عملکرد محافظت در برابر حرارت خورشید نمونه‌های پارچه پوشش داده شده با ZnO MCB به‌صورتی بوده است که پس از یک ساعت تابش خورشید دمای داخلی پارچه PZ-30 در مقایسه با چهار نمونه 2°C کمتر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که این پارچه کامپوزیتی، با بازتابش بالا ممکن است محصولی امیدوارکننده برای توسعه کامپوزیت نساجی کارآمد باشد [۱۶].

زی و همکارانش [۱۷]، به ارائه منسوجات مدیریت حرارتی همه‌کاره از راه منسوجات پلی‌امید (PA) پوشش داده شده با نقره با قابلیت عبور امواج فرسوخ پرداخته‌اند. در این مطالعه، نقره از راه آبکاری الکترولس^۶ روی الیاف PA پوشش داده شده است و طبق تصاویر SEM ریختمان الیاف تغییر چندانی نداشته که نشان‌دهنده لایه‌نشانی نازک نقره بر روی الیاف است. هم‌چنین در آنالیز FTIR دسته الیاف PA و Ag@PA، نشان داده شده که دسته الیاف Ag@PA جذب کمتری را از خود نشان داده و به‌طور مشابه، تک‌الیاف‌های پوشش داده شده با نقره، برای عبور امواج فرسوخ قابلیت بیشتری از خود نشان داده‌اند (شکل ۸). به‌منظور مقایسه خواص تطبیقی IR، پارچه PA پوشش داده شده با نانوسیم‌های نقره (پارچه AgNW-PA) نیز تهیه و آزمایش شده است و علاوه بر این، انرژی تابش فرسوخ که به پارچه نفوذ می‌کند نیز آزمایش شده است. در آزمون حرارتی با مقایسه این سه پارچه، دمای سطح پوست در زیر پارچه PA بالاترین مقدار بوده، در نتیجه اختلاف دما بین دو طرف پارچه PA بیشترین مقدار بوده است. این یعنی که پارچه PA عایق حرارتی عالی است. در مقابل، تصاویر حرارتی نشان داده است که دمای ناحیه پوشانده شده با پارچه Ag@PA به دلیل افزایش انتقال امواج مادون قرمز در این ناحیه کمتر بوده و بنابراین این پارچه برای دفع حرارت بدن انسان مفید است. در محیط داخلی، دمای پوست پوشانده شده با پارچه Ag@PA تنها $0/4^{\circ}\text{C}$ در مقایسه با پوست برهنه (34°C) افزایش یافته و نسبت به پارچه سنتی، پارچه PA کاهش دمای $1/1^{\circ}\text{C}$ داشته است [۱۷].

1. Adaptive Solar Textiles
2. Sputtering Deposition Method
3. Micro-Hair
4. Saharan Silver Ants
5. Micro Crystal Bar

6. Electroless Plating



شکل ۸. (a) مقایسه میزان عبور امواج فروسرخ از الیاف پلی‌آمید خالص و الیاف پلی‌آمید پوشش داده‌شده با نانوذرات نقره، (b) شبیه‌سازی عبور امواج فروسرخ از الیاف پلی‌آمید پوشش داده‌شده با نانوذرات نقره. (c) شبیه‌سازی عبور امواج فروسرخ از الیاف پلی‌آمید خالص [۱۷].

Figure 8. (a) Comparison of infrared waves passing through pure polyamide fibers and polyamide fibers coated with silver nanoparticles, (b) simulation of infrared waves passing through polyamide fibers coated with silver nanoparticles. (c) Simulating the passage of infrared waves through pure polyamide fibers [17].

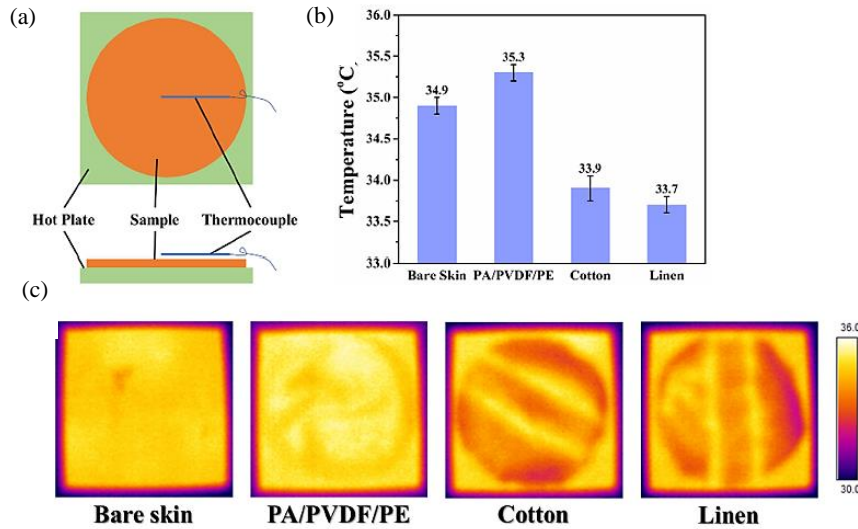
قابلیت عبور IR در پارچه PA/PVDF/PE بیشتر از دو پارچه پنبه‌ای و کتان‌ی است ولی جذب IR در پارچه PA/PVDF/PE پایین‌تر از دو پارچه نام‌برده دیگر است. به همین دلیل پارچه سه‌لایه حرارت را کمتر از دو پارچه دیگر جذب می‌کند و این در سرمایش بدن به ما کمک می‌کند. هم‌چنین برای پارچه سه‌لایه PA/PVDF/PE بازتابش زیادی تا ۹۰٪/۲۲٪ هست. در صورتی که برای پارچه پنبه‌ای و کتان‌ی این عدد به ترتیب ۵۴٪/۱۷٪ و ۵۰٪/۱٪ است. گرینش‌پذیری طیفی بالای پارچه PA/PVDF/PE برابر $\eta=3/44$ است که می‌تواند در سرمایش بدن انسان تأثیر داشته باشد، ولی دو پارچه دیگر از گرینش‌پذیری طیفی پایین‌تری برخوردارند ($\eta=1/2$) و هم‌چنین PA/PVDF/PE دارای بازتابش بالای ۹۰ درصد است [۱۸].

۳. منسوجات پیشرفته با ویژگی‌های هدایت حرارتی تنظیم‌شده

کنترل هدایت حرارت، یکی از مسیرهای اصلی برای انتقال حرارت بدن انسان است. برای منسوجات مات نسبت به امواج IR، در حد فاصل بین پوست بدن انسان و سطح داخلی منسوجات، هدایت حرارت به جای تابش حرارت، مسیر اصلی انتقال حرارت است. علاوه بر این، هدایت حرارت تنها راه انتقال حرارت در داخل خود منسوجات است. بنابراین، طراحی و توسعه منسوجات جدید با خواص هدایت حرارتی تنظیم‌شده برای مدیریت حرارتی شخصی.

سانگ و همکارانش [۱۸]، لباس سه‌لایه‌ای متشکل از PA/PVDF/PE با جذب، انتشار و بازتاب نور مرئی بالای ۹۰٪ طراحی کرده‌اند و هم‌چنین به دلیل قابلیت گرینش‌پذیری طیفی PVDF و اثر تداخل نوری نانوساختارها، لباس طراحی شده برای خنک کردن بدن انسان در محیط گرم به کار برده شده است. PA و نانوالیاف PVDF به وسیله الکتروروسی با نایلون ۶ و محلول PVDF تولید شده است. حلال فرمیک اسید برای نایلون ۶ و حلال DMF برای PVDF به کار برده شده است. از دوربین فروسرخ^۱ و ترموکوپل برای انجام آزمون‌ها استفاده شده است. پارچه بر روی یک صفحه گرم با دمای ۳۵°C قرار گرفته و دمای آن با ترموکوپل دما اندازه‌گیری و با دوربین، عکس IR تهیه شده است. این آزمون برای محیط داخلی و آزمون بعدی برای محیط بیرونی بوده که حاوی شبیه‌سازی بدن انسان است. برای این کار از یک صفحه حرارتی برای شبیه‌سازی بدن انسان، یک برد عایق و ترموکوپل استفاده شده است. صفحه حرارتی بر روی دمای ۳۷°C تنظیم و بر روی پوست شبیه‌سازی شده، قرار گرفته است. امواج IR که با بدن انسان تولید می‌شود از سه لایه PA و PE و PVDF عبور می‌کند. هر سه لایه دارای حفره‌هایی با قطر ۱۰-۱۰۰ nm است که می‌تواند نور خورشید را بازتاب کند. نانوالیاف PA آب‌دوست است و باعث سرعت بخشدن به انتقال رطوبت به سمت بیرون می‌شود و می‌تواند میزان نفوذ رطوبت را در PA/PVDF/PE کنترل کند [۱۸]. چنان‌که در شکل (۹) پیداست،

1. IR Camera



شکل ۹. (a) طرحواره دستگاه شبیه‌ساز پوست، (b) تغییرات دمای بالای سطح منسوج برای نمونه‌های مختلف پارچه، (c) تصاویر فرسرخ نمونه‌های مختلف پارچه [۱۸].

Figure 9. (a) Schematic of the skin simulating device, (b) Temperature changes of the upper surface of the fabric for different fabric samples, (c) Infrared images of different fabric samples [18].

با محتویات مختلف MWCNT (۰-۱۱/۱-۲۰-۳۳/۳-۵۰) تشکیل شده است. هدایت حرارتی پارچه‌ها براساس قانون سرمایش نیوتن اندازه‌گیری شده و تنها ۱۱/۱ درصد از MWCNTها در پوشش‌دهی، هدایت حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای را تا ۷۸٪ افزایش داده است. علاوه‌بر این، افزایش محتوای MWCNT تا ۵۰ درصد، هدایت حرارتی را ۱/۵ برابر افزایش داده است. دمای سطح تعادل پارچه پوشش‌داده‌شده با ۵۰ درصد MWCNT در تماس با سطح با دمای ۵۰ درجه سلسیوس، ۳/۹°C کمتر از پارچه معمولی بوده است. پوشش اعمال‌شده تأثیر کمی بر زاویه تماس آب با پارچه دارد، اما نفوذپذیری هوا را کمی کاهش داده است.

باوجود هدایت حرارتی بالایی که مواد کربنی ارائه می‌دهند این مواد، سرطان‌زا و برای سلامتی انسان مضر است. علاوه‌بر این، مواد هادی حرارتی را می‌توان در ساختارهای الیافی منسوجات جاسازی کرد تا هدایت حرارتی بهتری را برای بدن انسان ارائه دهد. در مقایسه با روش پوشش سطحی، الیاف کامپوزیتی جای‌گزین بادوام‌تری برای خنک‌سازی بدن انسان از راه سازوکار رسانش است. در پژوهشی دیگر، گائو و همکارانش [۲۲]، منسوجات تنظیم‌کننده حرارتی را با استفاده از الیاف کامپوزیت (a-BN/PVA) نیتريد بور (BN) پلی وینیل الکل، با رسانایی و اثر خنک‌کنندگی بسیار بالا

ارزشمند است اصل طراحی برای منسوجات به‌منظور خنک کردن بدن انسان، افزایش هدایت حرارتی منسوجات تا حد امکان است و در مقابل، منسوجات گرم‌کننده باید دارای خواص عایق حرارتی بالایی باشند.

یکی از راه‌های افزایش هدایت حرارتی و در نتیجه ایجاد اثر خنک‌کنندگی منسوج، اعمال مواد رسانای حرارتی به‌عنوان پوشش بر روی سطح الیاف است. مواد مناسب باید بتوانند هدایت حرارتی بالایی داشته باشند و همزمان اثر نامطلوبی بر انتقال حرارت تابشی نشان ندهند. مواد مبتنی بر کربن، مانند نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNT)، نانولوله کربنی تک‌جداره (SWCNTs)، و گرافن برای ایجاد پوشش هادی حرارتی در منسوجات استفاده شده‌اند. این مواد، هم‌رسانایی حرارتی و هم‌گسیل‌پذیری بالایی دارند [۱۹ و ۲۰].

در بررسی عباس و همکارانش [۲۱] اعمال یک پوشش رزین حاوی MWCNT بر روی سطح پارچه‌های پنبه‌ای منجر به بهبود آشکار هدایت حرارتی شده است. نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) در محلول آبی رزین مبتنی بر اپی کلوهیدرین با کمک سطح فعال پراکنده شده‌اند. محلول‌های رزین MWCNT بر روی پارچه‌های پنبه‌ای اعمال شده و یک پوشش نازک

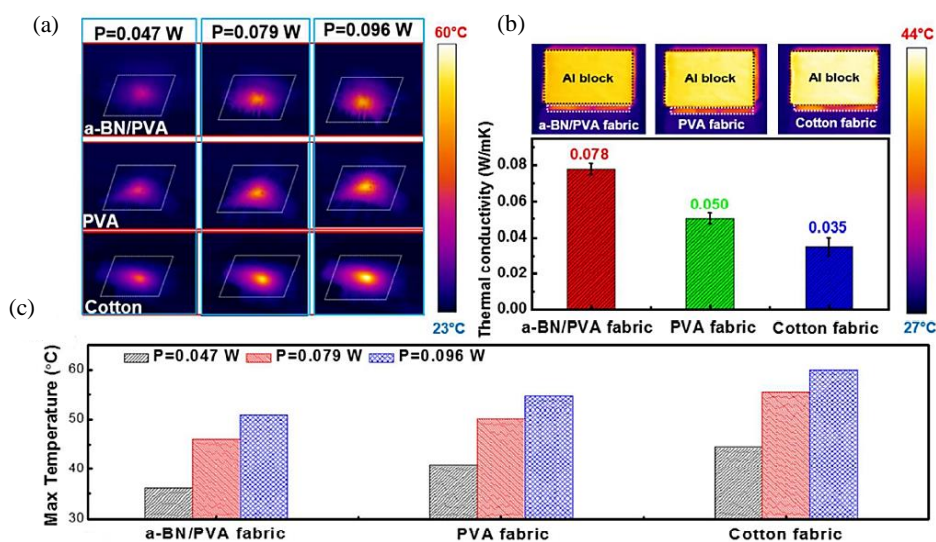
1. Epichlorohydrin

۰/۵ گرم PVA در ۹/۵ گرم DMSO در دمای 100°C با حل شده است. BNNS‌های آماده‌شده در محلول PVA پراکنده شده‌اند. در چاپگر سه‌بعدی جوهر BN/PVA با سرعت 1 ml/min با استفاده از سوزن با گیج ۲۰ به حمام متانول خنک‌شده در دمای 0°C تزریق شده است. سپس الیاف چاپ‌شده جمع‌آوری شده و در متانول و دمای اتاق به مدت بیش از ۲۴ ساعت نگه داشته و متعاقباً در شرایط محیطی خشک شده‌اند [۲۲].

به دلیل هدایت حرارتی بالای BN و در عین حال عایق الکتریکی بودن، این ماده به‌عنوان یک ماده مؤثر در کاربردهای مدیریت حرارتی در نظر گرفته شده است. در منسوج تولیدشده، هدایت حرارتی افزایش‌یافته الیاف کامپوزیت BN/PVA می‌تواند حرارت تولیدشده بدن انسان را به‌طور مؤثرتر به سطح بیرونی منسوجات منتقل کند. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، هدایت حرارتی منسوج تولیدی ۲۲ برابر بیشتر از پارچه نخی بوده و دمای آن به‌طور متوسط در هنگامی که در معرض نور لیزر با توان‌های مختلف قرار گرفته، 10°C کمتر از دمای پارچه نخی است [۲۲].

پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق، الیاف کامپوزیت a-BN/PVA با روش چاپ سه‌بعدی سریع و مقیاس‌پذیر ساخته شده‌اند. پراکندگی یک‌نواخت و تراز بالای نانوصفحات BN (BNNSs) در طول پردازش ساخت الیاف، به‌دست آورده شده است که منجر به ترکیبی از استحکام مکانیکی بالا (۳۵۵ مگاپاسکال) و پراکندگی حرارتی مطلوب شده است.

به‌طور خلاصه، میکروپودر تجاری h-BN گرم و در الکل ایزوپروپیل (IPA) (۳۰۰ میلی‌لیتر، خلوص $99/5\%$) پراکنده شده است. پراکندگی به مدت ۴۸ ساعت در یک حمام صوتی ایجاد شده و سپس به مدت ۲۰ دقیقه با دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شده است. پس از سانتریفیوژ، مایع بالایی تخلیه شده و محلول BN/IPA حاصل از فرایند سانتریفیوژ، از راه فیلتراسیون تحت خلأ، فیلتر شده است. پس از فیلتراسیون، کیک BN به‌دست‌آمده به مدت ۴ ساعت در آن با دمای 60°C خشک شده و از این پودر خشک‌شده به‌عنوان ماده پرکننده برای تولید الیاف کامپوزیت استفاده شده است. در تهیه سوسپانسیون و چاپ فیبرها از محلول PVA با غلظت ۵ درصد وزنی به‌عنوان ماده فعال سطحی برای به‌دست‌آوردن پودرهای BNNS با پراکندگی یک‌نواخت استفاده شده است. ابتدا، تراشه



شکل ۱۰. خواص حرارتی و اثرات خنک‌کنندگی پارچه‌های مختلف. (a) تصاویر IR نشان‌دهنده توزیع دمایی منسوجات مختلف، (b) اندازه‌گیری هدایت حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای، PVA و a-BN/PVA، (c) حداکثر دمای سطح پارچه‌های پنبه‌ای، PVA و a-BN/PVA تحت توان‌های مختلف لیزر ورودی [۲۲].

Figure 10. Thermal properties and cooling effects of different fabrics. (a) IR images showing temperature distribution of different textiles, (b) measurement of thermal conductivity of cotton, PVA and a-BN/PVA fabrics, (c) maximum surface temperature of cotton, PVA and a-BN/PVA fabrics under different input laser powers [20].

در برخی از بررسی‌ها برای رسیدن به منسوج دوحالتی از طراحی لایه‌لایه الیاف استفاده شده است. به‌طور مثال در پژوهش یو و همکارانش [۲۳]، منسوج چندلایه‌ای با ساختار ساندویچی برای تنظیم انتقال حرارت پیشنهاد شده است. لایه‌های مورد استفاده از جنس مس، اکسید منگنز و الیاف هیدروکسید سلولز است. در این ساختار، MnO_2 در لایه میانی قرار می‌گیرد تا پیوند قوی و سازگاری سطحی بالای منسوج ایجاد شود.

عملکرد اصلی نانوسیم‌های مس، بازتاب امواج فرسوخ به سمت بدن انسان برای گرم شدن است. علاوه بر این، لایه نانوسیم مس نیز حرارت اضافی و عملکرد ضد باکتریایی را فراهم کرده است. الیاف هیدروکسید سلولز نقش اساسی تابش فرسوخ بالا را ایفا کرده است. از این رو، این ترتیب در منسوج مورد نظر، دو خاصیت تابش فرسوخ متفاوت را ارائه کرده است و بدین ترتیب به عملکرد دو حالتی برای بدن دست یافته‌اند. علاوه بر این، ساختار ساندویچی می‌تواند حرارت اضافی را تنها با استفاده از یک ولتاژ پایین که گرم شدن غیرفعال را با گرم شدن فعال به طرز ماهرانه‌ای ترکیب می‌کند، تأمین کند. در آزمون حرارتی انجام شده، تصویر حرارتی یک دست پوشانده شده با هر دو پارچه پنبه‌ای معمولی و منسوج طراحی شده، با حالت گرمایش بررسی شده است (لایه نانوسیم‌های مس رو به بیرون است). نمونه‌های مورد بررسی در دمای اتمسفر $18^{\circ}C$ بر روی دست در تعادل حرارتی هستند. به دلیل نشر کم امواج فرسوخ، لایه نانوسیم مس تشعشع فرسوخ کمتری نسبت به پنبه معمولی ساطع می‌کند و باعث می‌شود منسوج طراحی شده سرد به نظر برسد. تابش فرسوخ از پنبه معمولی به وسیله یک دوربین فرسوخ تشخیص داده شده و دمای به دست آمده $26/4-28/0^{\circ}C$ است؛ در حالی که دمای منسوج طراحی شده کمتر است، در محدوده $26/1-26/4-24^{\circ}C$ است که نشان‌دهنده کاهش دما به اندازه $2/5-1/8^{\circ}C$ است [۲۳].

از طرفی پوست انسان یک ساطع‌کننده خوب فرسوخ با تابش 98% است. پارچه‌های پنبه‌ای معمولی معمولاً تابش فرسوخ کمتری برابر با $89/5\%$ دارند و در نتیجه از انتقال حرارت بدن انسان به محیط، در محیط گرم جلوگیری می‌کند. انتشار فرسوخ بسیار بالا برای دفع حرارت بدن انسان ضروری است. لایه الیاف سلولز هیدروکسید انتشار فرسوخ بسیار بالایی را $97/3\%$ نشان داده است که بسیار

نزدیک به عملکرد تابش پوست برهنه انسان است. هم‌چنین تصویر حرارتی پارچه معمولی پنبه و منسوج طراحی شده، با حالت خنک‌کننده (لایه سلولز هیدروکسید رو به بیرون) بررسی شده است. در نتایج بیان شده که برای پارچه‌های پنبه‌ای معمولی، دمای به دست آمده با دوربین فرسوخ در محدوده $32/4-32-1^{\circ}C$ و دمای منسوج طراحی شده در محدوده $32/8-34/1^{\circ}C$ است. این دو نمونه در دمای یکسان کف دست انسان آزمایش شده‌اند و در نتیجه نشان داده شده است که منسوج طراحی شده می‌تواند تشعشعات فرسوخ بیشتری را برای خنک‌سازی انسان منتشر کند [۲۳].

در مطالعه دیگری خلیلی و همکارانش [۲۴]، عبور امواج فرسوخ را از پارچه پلی‌استر ترکیب شده با دو لایه مس-نیکل و فسفر-نیکل در مقایسه با ترکیب تک‌لایه مس-نیکل و فسفر با پارچه پلی‌استر بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، تأثیر طیف وسیعی از مشخصه‌های عملیاتی بر روی رسانایی پارچه پلی‌استر آبکاری شده به روش الکترولس بررسی شده است. سامانه حسگر تابش حرارتی برای نشان دادن سطح جذب انرژی حرارتی استفاده شده است. منسوج طراحی شده دارای رسانایی و دوام بسیار خوبی است و نتایج حاصل از دوربین حرارتی بیانگر عبور خوب امواج فرسوخ است و از این طراحی می‌توان برای سرمایه‌گذاری بیشتر بدن استفاده کرد.

می‌توان اثر گرم شونده‌ی را در منسوجات با کاهش هدایت حرارتی ایجاد کرد. یکی از روش‌های رایج این است که توده هوا در منسوجات به دام انداخته شود تا مقاومت حرارتی منسوج افزایش یابد [۲۵]. اخیراً کیو و همکارانش [۲۶]، ساخت پیوسته و در مقیاس بزرگ الیاف با ساختار متخلخل را با تقلید از موهای خرس قطبی، با روش ریسندگی-انجمادی^۱ بررسی کرده‌اند. تخلخل بالا باعث کاهش هدایت حرارتی و انتقال حرارت الیاف شده است؛ زیرا هوا در منافذ ریز مسدود می‌شود و تا حد زیادی، اتلاف انرژی را از بدن انسان کاهش می‌دهد. منسوج تولیدشده از الیاف زیست تقلید متخلخل^۲ است و خاصیت عایق حرارتی عالی، قابلیت تنفس و پوشیدن خوب دارد. منسوجات می‌توانند علاوه بر عایق کاری غیرفعال و کاهش از دست‌دادن حرارت، به عنوان یک پوشش گرم‌کننده نیز عمل کنند، بر این اساس آن‌ها منسوج تولیدشده را با مواد گرمایش الکتریکی مانند نانولوله‌های کربنی همراه و عکس‌العمل حرارتی

1. Freeze-Spinning
2. Porous Biomimetic Fibers

حرارتی و پزشکی مورد نیاز آزمایش شده است. نتایج حرارتی نشان داده که استفاده از پارچه بافتنی سه‌بعدی پرشده با آئروژل برای لایه بیرونی پتو، از نظر عایق حرارتی، مطلوب‌تر است.

در برخی از مطالعات از خاصیت عایق بودن هوا به‌همراه مواد آئروژل استفاده شده است. به‌طور مثال، لیو و همکارانش [۲۹]، به گزارش خواص الیاف آئروژل که از نانوالیاف کولار (KNF) ساخته‌شده، پرداخته‌اند. ساختار آئروژل با شبکه‌های متخلخل سه‌بعدی به‌هم پیوسته و دارای هوای ساکن زیاد، خاصیت عایق حرارتی فوق‌العاده‌ای را به الیاف آئروژل می‌دهد. از نرم‌افزار COMSOL برای ارائه نمونه‌ای از تأثیر ساختار آئروژل بر عملکرد عایق حرارتی استفاده شده است. علاوه بر عایق حرارتی، الیاف آئروژل می‌توانند با ترکیب با مواد تغییر فزدهنده، نیکل و رزین فلئوروکربن (FC) به ترتیب به‌عنوان الیاف تغییر فاز، الیاف رسانا و آب‌گریز نیز عمل کنند. نتایج تصاویر و آزمون‌های حرارتی انجام‌شده نشان داده است که در حالت گرم‌کنندگی، منسوجات آئروژل دمای بالاتری نسبت به منسوجات پنبه‌ای دارند و در دمای سطح برابر با دمای نیتروژن مایع، اختلاف دمای سطح و منسوج برای منسوج طراحی‌شده آئروژل و پنبه‌ای به ترتیب 42°C و 22°C است که نشان‌دهنده خاصیت عایق حرارتی بهتر منسوجات آئروژل در دمای نیتروژن مایع است. عملکرد عایق حرارتی در دمای اتاق با اتصال پارچه آئروژل و پارچه پنبه‌ای به پوست انسان مشخص شده است. تصویر حرارتی مادون قرمز مربوطه، نشان داده است که دمای سطح پارچه آئروژل کمتر از منسوجات پنبه‌ای است و منسوجات آئروژل دارای عایق حرارتی برتر نسبت به منسوجات پنبه‌ای در دمای اتاق هستند.

خاصیت عایق حرارتی منسوجات با عوامل زیادی تعیین می‌شود و در میان آن‌ها، انتقال حرارت هدایت و جابه‌جایی در ترکیب جامد/ هوا از عوامل اصلی هستند. انتقال حرارت به روش جابه‌جایی منسوجات آئروژل به‌شدت محدود می‌شود؛ زیرا هوا در منافذ مسدود می‌شود و هدایت حرارتی هوا بسیار کمتر از جامدات است. چگالی منسوجات آئروژل بسیار کمتر از منسوجات پنبه‌ای است که نشان‌دهنده تخلخل بالای آن‌هاست. بنابراین، هدایت حرارتی منسوجات آئروژل به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این شبیه‌سازی COMSOL تأیید کرده است که عایق حرارتی با افزایش تخلخل و کاهش قطر نانوالیاف بهبود می‌یابد. چنین الیاف آئروژل

سریع و گرمایش الکتریکی یک‌نواخت را ایجاد کرده‌اند و در عین حال ماهیت نرم و متخلخل بودن برای پوشیدن حفظ شده است. طبق آنالیز حرارتی انجام‌شده، از خرگوشی که با یک لایه پلی‌استر تجاری و منسوج زیست تقلید طراحی‌شده، پوشیده‌شده بود، در تصاویر نوری و فروسرخ استفاده شده است. در ضخامت یکسان از هر نوع پارچه، منسوج زیست تقلید کارآمدتر از پلی‌استر تجاری در عایق حرارتی بوده است. بدن خرگوش پوشیده‌شده با منسوجات زیست تقلید در زیر دوربین فروسرخ تقریباً نامرئی شده؛ زیرا دمای سطح آن بسیار نزدیک به دمای زمینه است و این نتیجه امکان استفاده از منسوجات بافته‌شده با الیاف متخلخل زیست تقلید را در استتار حرارتی فراهم می‌کند [۲۶].

دسته دیگری از مواد عایق حرارتی، آئروژل‌ها هستند. برخی از این مواد عبارتند از آئروژل هیدروکسید آلومینیوم و آئروژل سیلیکا که بر روی منسوجات اعمال می‌شوند. در مطالعه جباری و همکارانش [۲۷]، پارچه کامپوزیتی طراحی شده است. در منسوج طراحی‌شده از پوشش پلی‌وینیل کلرید ذوب‌شده بر روی پارچه‌های بافته‌شده از الیاف پلی‌استر استفاده شده است. پلی‌وینیل کلرید آئروژلی بسیار سبک و دارای خاصیت عایق حرارتی بالاست. طبق اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، مشخص شده است که قابلیت عایق حرارتی پارچه‌ها تا ۲۶٪ افزایش یافته است.

در بررسی دیگری، میکوویچک و ساووک [۲۸]، پتویی با قابلیت عایق بودن و جلوگیری از گرم‌شدن بیش از حد، به‌منظور بهبود مراقبت نوزادان نارس و بیمار تولید کرده‌اند. این پتو از پنج لایه تشکیل شده است و لایه بیرونی عملکرد عایق را انجام می‌دهد، لایه بعدی از فیلم پلی‌استر متالیزه است و از اتلاف حرارت از راه تشعشع جلوگیری کرده و لایه سوم دارای خاصیت گرمایشی و سرمایشی فعال است. لایه چهارم از جنس مواد آئروژل بوده که از پنبه ارگانیک، ابریشم طبیعی یا پلی‌پروپیلن بافتی ساخته شده و به لایه پنجم چسبیده است. انتقال حرارت در این پتو از پوست به بیرون بسیار پیچیده است که با سازوکار جابه‌جایی و تابش در داخل فضای‌های مملو از هوا و هم‌چنین با رسانش از طریق الیاف انجام می‌گیرد. برای تعیین مقدار حرارت منتقل‌شده، سه محدوده دمای محیط و رطوبت بین ۴۰ تا ۶۰ درصد در نظر گرفته شده است. در طی این مطالعه مواد مختلف با ترتیب لایه‌های مختلف از نظر

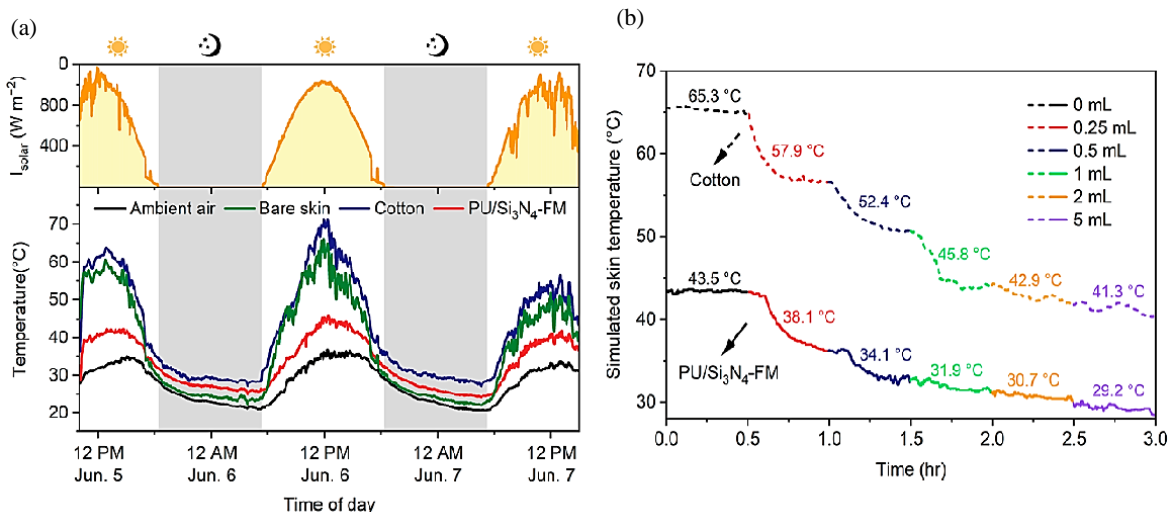
KNF یک روش امیدوارکننده برای نسل بعدی مواد عایق حرارتی لیفی با کارایی بالا است و این نتایج نشان داد که الیاف آئروژل ظرفیت بالایی برای نسل بعدی الیاف مصنوعی در زمینه عایق حرارتی و مدیریت حرارتی دارند [۲۹ و ۳۰]. اما این مواد مشکلاتی اعم از شکنندگی مکانیکی (باعث ایجاد ترک در هنگام شست‌وشو و پوشیدن می‌شود) و مشکل سلامتی ناشی از استنشاق گرانول‌های آئروژل دارند. بنابراین در برخی از مطالعات از ظرفیت تبخیر عرق به‌همراه افزایش رسانش منسوج استفاده شده است.

در مطالعه پنگ و همکارانش [۴]، استفاده مؤثر از قدرت تبخیر بیان شده است. در این پژوهش به این نکته توجه شده که برای تنظیم دمای بدن، عرق ترشح می‌شود تا تبخیر شود و حرارت اضافی را از بین ببرد. اگرچه تبخیر عرق در منسوجات معمولی اتفاق می‌افتد، اما پوست انسان در زیر لایه پارچه به‌طور مؤثر خنک نمی‌شود؛ زیرا حرارت برای تبخیر از پوست گرفته نمی‌شود و معمولاً فقط سطح پارچه به‌جای پوست انسان خنک می‌شود. هم‌چنین نرخ تبخیر منسوجات معمولی نسبتاً محدود است؛ زیرا حرارت پوست به‌خوبی به سطح تبخیر برای تسریع تبخیر رسانده نمی‌شود. بنابراین اثر خنک‌کنندگی ناکارآمد منجر به تعریق بیشتر شده، در عین حال تبخیر آهسته عرق، منجر به تجمع عرق در منسوجات می‌شود. این فرایند ممکن است اثر بافر منسوجات را پس از رسیدن به حد جذب پارچه تضعیف کند؛ در این مرحله بدن انسان دوباره خیس و چسبناک می‌شود. بنابراین در این بررسی، ابتدا منسوج مورد نظر با آرایه خاصی با لیزر بریده شده و سپس برای افزایش هدایت حرارتی، لایه‌ای از ذرات نقره بر روی منسوج نشانده شده است. منافذ سوراخ‌شده با الیاف سلولز پر شده و این مناطق، کانال‌های انتقال رطوبت در نظر گرفته شده است. در انتها لایه‌ای از نایلون ۶ الکتروریسی و بر روی منسوج آماده‌شده پرس هیدرولیکی شده است. منسوج ایجادشده در این مطالعه در آنالیزهای گوناگون تبخیر و حرارت، دمای پایین‌تری را به‌اندازه $1/7-2/5^{\circ}\text{C}$ نسبت به منسوجات خنک‌کننده موجود در بازار همانند Dri-fit و پارچه‌های نخی ارائه کرده است. هم‌چنین نرخ تبخیر نیز با طراحی انجام‌شده، افزایش یافته و کارایی این منسوج در شرایط محیطی شرحی اثبات شده است؛ اما مسأله‌ای که در این بررسی به چشم می‌خورد برش قسمت‌هایی از منسوج و در نتیجه کاهش استحکام آن است [۴].

میا او و همکارانش [۳۱]، غشای لیفی پلی‌یورتان^۱ (PU) /سیلیکون نیتريد تولیدشده به‌روش الکتروریسی مقیاس پذیر را بررسی کرده‌اند. آنان الیاف تولیدشده را به‌روش پلازما به‌صورت یک‌طرفه آب‌دوست کرده‌اند. برای تهیه PU/Si₃N₄-FM ابتدا نانوذرات Si₃N₄ را در مخلوط دوجزئی استون و دی‌متیل فرمالدهید^۲ (DMF) قرار داده، PU در آن حل شده است، و محلول به‌دست‌آمده، با ولتاژ ۳۰kV الکتروریسی شده است. وقتی الیاف به قطر مورد نظر رسیدند از جمع‌آورنده^۳ جدا شده و در خشک‌کن تحت خلأ و دمای ۷۰°C برای دو ساعت خشک شده است. طرح حفره‌های پی‌درپی در یک طرف از پارچه PU/Si₃N₄-FMs به‌وسیله دستگاه رآکتور پلازما^۴ ایجاد شده است. بدین وسیله پارچه دارای دو قسمت آب‌گریز^۵ و آب‌دوست^۶ شده است. منسوج طراحی شده دارای انعکاس خورشیدی با زاویه بالا (۹۱٪) و تابش فروسرخ بدن انسان (۹۳٪) است که باعث کاهش دمای حدود ۲۱/۹°C در زیر نور مستقیم خورشید و ۲/۸°C در شب را در مقایسه با پنبه سنتی فراهم کرده است. ادغام نوآورانه ترشوندگی و هدایت حرارت در این نوع منسوجات، حد اقل مصرف عرق ۰/۵ml/h را تضمین و از مضرات تعریق بیش از حد جلوگیری کرده است. باتوجه به شکل (۱۱) پیداست که عبور آب در پارچه PU/Si₃N₄-FM بهتر از پارچه PU-FM است و بهترین هدایت حرارتی را PU/Si₃N₄-CM دارد [۳۱].

در پژوهشی دیگر از پنگ و همکارانش [۳۲]، تکمیل سطحی بر روی پارچه انجام شده است که منجر به بهبود خواص انتقال حرارت پارچه به‌وسیله سازوکار رسانش و تابش شده است. پارچه‌های تولیدشده قابلیت سرمایش و گرمایش را داشته‌اند. طی فرایند تکمیل، ابتدا پارچه شامل ۹۶٪ پلی‌استر و ۴ درصد اسپاندکس^۷ با وزن سطحی ۲۲۰g/m^۲، با آب شست‌وشو داده شده و به مدت ۲ ساعت در داخل دپامین هیدروکلروید با غلظت ۲g/L و تریس بافر با pH=۸/۵ و غلظت ۱۰mmol/L قرار گرفته است. سپس، برای پوشش‌دهی لایه نقره، نمونه در داخل نقره نیترات با غلظت ۲۵g/L تحت عملیات آبکافت^۸ به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته است. بعد از شست‌وشو با آب دیونیزه، پارچه در داخل حمام آبکافت شامل Ag(NH₃)₂⁺ و گلوکز با

1. Polyurethane
2. Dimethylformamide (DMF)
3. Collector
4. Plasma Reactor
5. Hydrophobic
6. Hydrophilic
7. Spandex
8. Dredging Operation



شکل ۱۱. (a) تغییرات دمایی منسوجات مختلف در شرایط روز و شب. (b) مقایسه تغییرات دمایی پارچه نخی و منسوج طراحی شده در نرخ‌های مختلف تعریق [۳۱].

Figure 11. (a) Temperature changes of different textiles in day and night conditions. (b) Comparison of temperature changes of cotton and woven fabric designed in different transpiration rates [27].

گزارش شده و در ادامه به بیان مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

۴-۱ منسوجات حاوی مواد تغییر فازدهنده^۱ (PCMs)

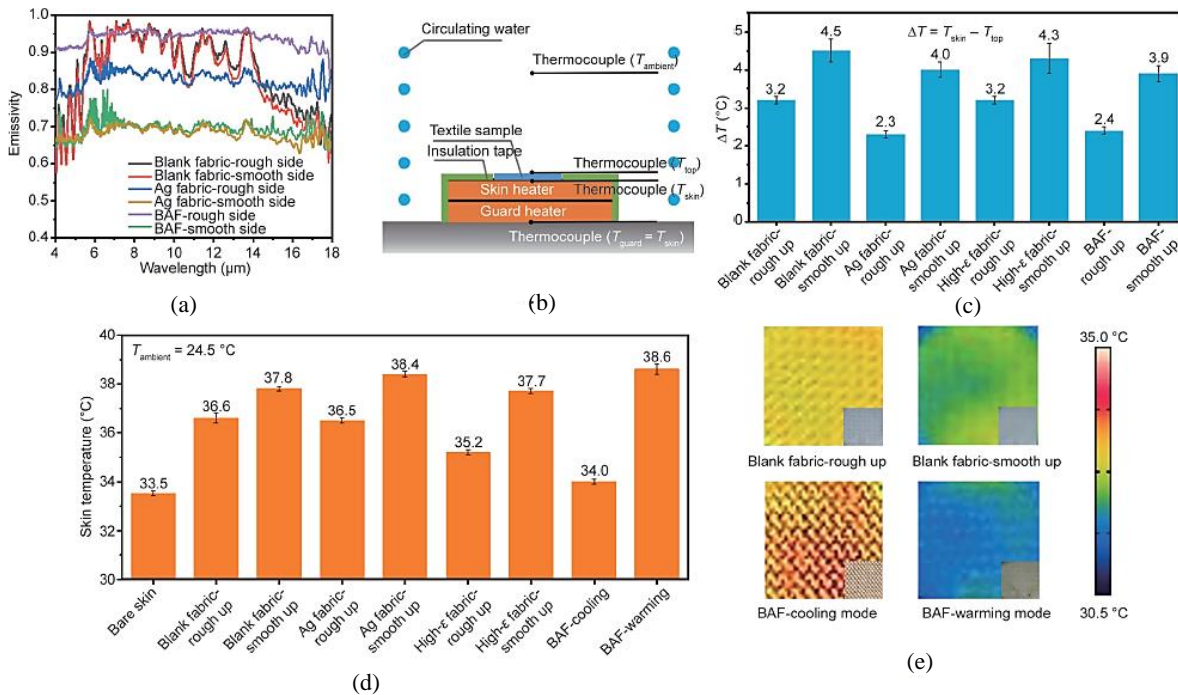
منسوجات ترکیب شده با مواد تغییر فاز (PCM) برای تنظیم حرارتی، نظر محققان را به خود جذب کرده است. PCMها از حرارت نهان تغییر فاز خود استفاده می‌کنند، که این حرارت می‌تواند در یک محدوده دمایی باریک ذخیره و آزاد شود. به‌طور کلی، PCMهای مورد استفاده در منسوجات دارای حرارت نهان ذوب بالایی هستند که قادر به جذب و آزادسازی انرژی حرارتی از راه فرایند تغییر فاز هستند. هنگامی که PCMها در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند، پس از رسیدن به نقطه ذوب خود، تحت فرایند ذوب شدن مقدار زیادی انرژی را جذب می‌کنند و برعکس، هنگامی که PCMها در معرض دمای پایین قرار می‌گیرند، فرایند انجماد با آزادسازی حرارت نهان اتفاق می‌افتد. انواع PCM که نقطه ذوب آنها معمولاً در محدوده $15-35^{\circ}C$ است، در زمینه نساجی استفاده می‌شود، مانند نمک معدنی هیدراته، هیدروکربن‌های زنجیره بلند خطی، پلی اتیلن گلیکول، و مخلوط‌های یوتکتیک آنها [۱].

1. Phase Change Material

غلظت $5g/L$ به مدت ۲ ساعت قرار گرفته است. در مرحله بعد، طرف دیگر پارچه نیز طی فرایند مشابه تکمیل شده و در نهایت، قسمت زیر پارچه به وسیله رنگ روغن پوشش داده شده است. برای بررسی خواص انتقال حرارت پارچه‌های تولید شده، از آزمون‌های حرارتی، انتقال بخار آب، نفوذپذیری هوا و شست‌وشو استفاده شده است. طبق شکل (۱۲-ا)، می‌توان مشاهده کرد که دو طرف پارچه تکمیل نشده دارای انتشار حرارت یکسانی است و طی تکمیل سطح پارچه با نقره، هر دو سمت دچار کاهش انتقال حرارت شده است. براساس شکل (۱۲-ب)، می‌توان مشاهده کرد که خواص انتقال حرارتی پارچه به خصوص در سمت زیر آن بهبود یافته و موجب اختلاف دمایی در حدود $1/1-1/7^{\circ}C$ شده است و باتوجه به شکل‌های (۱۲-د، e)، نمونه‌های شبیه‌سازی شده می‌توانند تا دمای $4/6^{\circ}C$ اختلاف دمایی ایجاد کنند [۳۲].

۴. منسوجات پاسخگو برای مدیریت حرارتی شخصی

برخلاف منسوجات معمولی و منسوجات پیشرفته معرفی شده در قسمت‌های قبل، منسوجات پاسخگو، با بدن یا محیط انسان تعامل دارند و نسبت به تغییرات شرایط بدن و محیط عکس‌العمل نشان می‌دهند. در بررسی‌های انجام شده منسوجات مختلفی که به تغییرات کوچک دما، رطوبت، pH، نور، عکس‌العمل نشان می‌دهند،



شکل ۱۲. نتایج حاصل از آزمون‌های حرارتی، (a) تابش سطحی هر دو طرف پارچه بدون تکمیل، پارچه با نقره و پارچه طراحی شده در محدوده طول موج متوسط IR، (b) طرحواره دستگاه اندازه‌گیری حرارتی، (c) تفاوت دما بین پوست و سطح بالایی پارچه برای پارچه‌ها در حالت‌های مختلف، (d) دمای پوست شبیه‌سازی شده با پارچه‌های مختلف در حالت‌های مختلف، (e) تصاویر حرارتی IR برای پارچه‌های نامتقارن خالی و پارچه طراحی شده روی پوست در دمای ۳۵ درجه سلسیوس [۳۲].

Figure 12. The results of thermal tests, (a) surface radiation on both sides of the fabric without finishing, fabric with silver and designed fabric in the middle IR wavelength range, (b) schematic of the thermal measuring device, (c) temperature difference between the skin and Upper fabric surface for fabrics in different modes, (d) Simulated skin temperature with different fabrics in different states, (e) IR thermal images for empty asymmetric fabrics and designed fabric on the skin at 35°C [28].

در بررسی لیو و همکارانش [۳۳]، از موم پارافین به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده و برای جلوگیری از نشت آن از روش الکترورسی هسته و پوسته استفاده شده و جنس پوسته پلی‌اکریلو نیتریل (PAN) انتخاب شده است. بررسی‌های مربوط به پایداری حرارتی و راندمان محصور کردن ماده تغییر فازدهنده، در سیکل‌های حرارتی مختلف، انجام و نتایج خوبی مشاهده شده است. هم‌چنین روند تغییرات دمایی منسوج مورد نظر در مقایسه با منسوج بافته‌شده از الیاف PAN خالص مقایسه شده و الیاف حاوی مواد تغییر فازدهنده دیرتر سرد شده‌اند.

در مطالعه دیگری، سانچز و همکارانش [۳۴]، میکروکپسول‌های پلی‌استایرن حاوی موم پارافین را با بسپارش تعلیقی سنتز کرده‌اند. موم پارافین استفاده شده از نوع تجاری و مخلوطی از n-آلکان با تعداد اتم‌های کربن از ۱۹ تا ۲۷ و با ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی

۲۰۲/۶kJ/kg در بازه دمایی ۴۰-۴۵°C بوده است. آن‌ها این میکروکپسول‌ها را با روش پوشش‌دهی و استفاده از چسب‌های تجاری مختلف در منسوجات وارد کرده‌اند. پارچه پوشش داده شده با ۳۵ درصد وزنی میکروکپسول، دارای ظرفیت حرارتی ۷/۶kJ/kg دوام بالا، پایداری کافی پس از شست‌وشو و پایداری سایشی بوده است. آنان تصاویر حرارتی را با سامانه تصویربرداری حرارتی فرورسرخ^۱ (IRT) برای منسوجات حاوی مواد تغییر فازدهنده و بدون آن که پیش‌گرم شده باشند، به‌دست آورده‌اند و اختلاف دمای ۸/۸°C به مدت ۶ ثانیه برای منسوجات تنظیم‌کننده حرارت در مقایسه با پارچه کنترل مشاهده شده است.

در مطالعه‌ای که رضوان پور و همکارانش [۳۵]، انجام داده‌اند، رفتار حرارتی مواد تغییر فاز دهنده نانو کپسوله شده را برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بررسی کرده‌اند. کپسول‌های میکرو و نانو

به ذرات بلورین تبدیل شده و در نهایت میکروساختار شامل فیبروئین ابریشم و کیتوسان^۴ شکل گرفته، سپس میکروساختار تولیدشده به پلی‌اتیلن گلیکول آغشته شده است. اندازه منافذ در حدود ۰/۶ تا ۹/۱ میکرون با تخلخل ۸۳٪ بوده است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از نشت مواد تغییر فزاینده، از پلی دی متیل سیلوکسان برای پوشش‌دهی الیاف تولیدشده، استفاده شده است. طبق تصاویر فرورسرخ (IR) گرفته‌شده از PCMF/PDMS، در حین فرایند حرارت‌دهی، دمایی کمتر و در حین فرایند خنک‌سازی، دمایی بیشتر از منسوج پلی‌استر مشاهده شده است. این بدین معنی است که منسوج بر پایه PCMF/PDMS قابلیت تنظیم دمای خوبی دارد. کاراسوسکا و همکارانش [۳۸]، میکروکپسول‌هایی متشکل از یک هسته پارافینی پوشیده‌شده با پلی‌سیلوکسان، تهیه کرده‌اند. n-ایکوزان با دمای ذوب ۳۷°C به‌عنوان ماده تغییر فزاینده (PCM) استفاده شده است. پوسته میکروکپسول‌ها از یک الاستومر پلی‌سیلوکسان ساخته شده است. میکروکپسول‌های تغییر فزاینده با استفاده از روش پد کردن^۵، در پارچه‌های سوزنی گنجانده شده است. ساختار شیمیایی میکروکپسول‌ها با روش‌های FT-IR، Si MAS NMR و EDX بررسی شده است. روش‌های SEM و TEM برای مطالعات قطر میکروکپسول‌ها، توزیع قطر و ضخامت پوسته پلی‌سیلوکسان استفاده شده است. آنتالپی تغییر فاز میکروکپسول‌ها ۱۴۶J/g بوده است. با استفاده از آزمون‌های SEM، FT-IR و EDX حضور و مکان میکروکپسول‌های تغییر فزاینده در پارچه‌های بی‌باقت تعیین شده و مشخص شده است که محتوای میکروکپسول‌های PCM در منسوجات بی‌باقت ۳۷ درصد وزنی است. بالاترین ضریب قابلیت ذخیره‌سازی انرژی (CES) برای میکروکپسول‌های بدون چسب، میکروکپسول‌های دارای چسب و برای منسوجات اصلاح‌شده نزدیک به ۹۹ درصد بوده و این نشان‌دهنده محصورشدن کامل پارافین به‌وسیله پوسته‌های پلی‌سیلوکسان بوده است. این امر، جذب و انتشار حرارت را در بسیاری از چرخه‌ها تضمین کرده است. در واقع، نتایج آنالیز حرارت‌سنجی روبشی تفاضلی (DSC) (بیش از ۱۰۰ چرخه تغییر فاز) پایداری حرارتی بالای میکروکپسول‌ها را نیز در منسوجات اصلاح‌شده، تأیید کرده است [۳۸].

دارای n-ایکوزان به‌عنوان هسته و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) به‌عنوان پوسته با نسبت وزنی ۵۰/۵۰ از راه فرایند اسپارش مینی امولسیون^۱ تهیه شده است. ریخت‌شناسی^۲ کپسول‌های تهیه‌شده با میکروسکوپ‌های نوری (OM)، الکترونی عبوری (TEM) و الکترونی روبشی (SEM) ارزیابی شده است. پایداری حرارتی نمونه تولیدشده با استفاده از حرارت‌سنجی روبشی تفاضلی (DSC) و آنالیز حرارت-وزن سنجی (TGA) بررسی شده و نمونه تولیدشده پایداری حرارتی بالایی نشان داده است. از میکروکپسول‌های تولیدشده می‌توان برای ذخیره انرژی حرارتی و گرمایش بدن استفاده کرد. ساریر و همکارانش اثر اضافه‌کردن نانوذرات نقره را برای افزایش رسانش در میکروکپسول‌های حاوی مواد تغییر فزاینده [۳۶]، بررسی کرده‌اند. در این مطالعه شش میکروکپسول مختلف به‌روش اسپارش درجا^۳ ساخته شده است. میکروکپسول‌ها، حاوی هسته‌های n-اوکتان به‌همراه نانوذرات نقره و یا n-هگزان به‌همراه نانوذرات نقره و پوسته پلی‌اوره فرمالدهید بوده‌اند. در ادامه توزیع اندازه ذرات، شکل ساختاری و دوام میکروکپسول‌های ساخته‌شده، بررسی و نشان داده شده است که ذرات، دوام و پایداری حرارتی بسیار خوبی بعد از صد سیکل حرارتی داشته‌اند. هم‌چنین طبق آزمون‌های حرارتی در این تحقیق، آنتالپی تغییر فاز میکروکپسول‌های حاوی n-هگزادکان در دمای ۲۶-۲۲ برابر با ۱۳۷J/g و این مقدار برای میکروکپسول‌های حاوی n-اوکتادکان در دمای ۳۳-۲۵°C برابر با ۱۶۸J/g بوده است. هدایت حرارتی میکروکپسول‌های حاوی نانوذرات نقره نسبت به میکروکپسول‌های بدون نانوذرات بسیار بیشتر بوده و در نتیجه بیان شده است که این میکروکپسول‌ها به‌دلیل داشتن ظرفیت حرارتی بالا، دوام، پایداری و هدایت حرارتی خوب، برای طیف وسیعی از منسوجات مانند منسوجات پزشکی، ورزشی و غیره یک جزء کاربردی در مدیریت دماست.

در پژوهشی دیگر، ویو و همکارانش [۳۷]، با استفاده از مواد تغییر فزاینده و پل دی متیل سیلوکسان (PDMS) موفق به تولید پارچه‌ای با قابلیت تنظیم دما، انتشار حرارت پایین و رنگ‌پذیری خوب شده‌اند. در طی فرایند تولید، محلول الیاف از مسیر منبع سرد شامل گاز هلیوم مایع عبور کرده تا مولکول‌های آب در داخل محلول

4. Silk Fibroin and Chitosan
5. Padding Method

1. Mini Emulsion Polymerization
2. Morphology
3. In Situ Polymerization

در بررسی حقیقت و همکارانش [۳۹]، خواص تنظیم دما با استفاده از الیاف حاوی مواد تغییر فازدهنده تحت شرایط شبیه‌سازی شده بدن مطالعه شده است. این الیاف به‌روش الکتروروسی پوسته- هسته تولید شده و عملکرد دو نوع آلکان (n- هگزادکان و n- اوکتادکان)، به‌عنوان هسته الیاف مقایسه شده است. عملکرد حرارتی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز DSC و سامانه ارزیابی حرارتی دینامیکی مطابق با شرایط بدن بررسی و نشان داده شده است که نوع ماده تغییر فازدهنده و تعداد لایه‌های آن به‌طور معناداری بر خواص تنظیم‌کننده حرارتی منسوج تأثیر داشته است. علاوه بر این، با استفاده از آزمون ظرفیت دینامیکی حرارتی^۱، میانگین و حداکثر اختلاف دما و سرعت خنک‌سازی الیاف بررسی و نشان داده شده است که الیاف حاوی n- هگزادکان مدت زمان بیشتری را خنک بوده و در نتیجه، ماده تغییر فازدهنده با دمای تغییر فاز نزدیک به دمای محیط، انتخاب مناسب‌تری برای دستیابی به عملکرد حرارتی بالا در طول تغییرات ناگهانی دمای محیط است.

۴-۲ منسوجات پاسخگو با تغییرات ساختاری پویا (حافظه شکلی)

تغییرات ساختار در منسوجات پیشرفته پاسخگو به محرک‌های محیطی نیز نقش مهمی در تنظیم حرارتی دینامیکی دارد. کنترل فعال در خواص تابش، رسانش و جابه‌جایی ناشی از تغییر ساختار پارچه به شکل‌های تغییر ضخامت، تغییر منافذ، تغییر ساختار الیاف و یا نخ و غیره است.

فیو و همکارانش [۴۰]، یک ساختار دولایه پلی‌اتیلن ترفتالات^۲ (PET) و سلولز را طراحی کرده‌اند. PET به رطوبت، جریان هوا و عبور تابش IR حساسیت نشان داده و سلولز نیز به رطوبت پاسخ می‌دهد. PET آب‌گریز و در تماس با پوست است و لایه خارجی از جنس سلولز که آب‌دوست است، قرار داده شده است. لایه حساس به رطوبت از جنس تری‌استات و سلولز بوده که با جذب رطوبت متورم می‌شود. هنگامی که عرق می‌کنیم رطوبت به بیرون هدایت می‌شود و با لایه سلولزی جذب می‌شود، ساختار آن متورم و متراکم می‌شود. این فرایند باعث جذب IR می‌شود تا بخار آب را ایجاد کند و جریان هوا در داخل لباس نیز به تبخیر شدن و تهویه

کمک می‌کند. این پارچه از حلقه‌های وسیعی تشکیل شده است تا هوا بهتر جریان بپذیرد. آزمون نفوذپذیری هوا روی دو پارچه پنبه‌ای و PET/Cellulose برای سنجش میزان تنفس‌پذیری انجام گرفته و بیان شده است که نفوذ هوا در منسوج خنک‌کننده ۵۸٪ بیشتر از پارچه پنبه‌ای شده است. آزمون انتقال رطوبت در راستای عمودی برای دو پارچه در شرایط یکسان به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفته و مسافت رطوبت در منسوج خنک‌کننده ۱۰ cm و برای پارچه پنبه‌ای ۱۲/۶ cm بوده است. هم‌چنین آزمون ظرفیت کنترل رطوبت برای منسوج خنک‌کننده ۱۵٪ بیشتر از پارچه پنبه‌ای به‌دست آمده است، این بدین معنی است که منسوج خنک‌کننده در هدایت عرق و خشک نگه‌داشتن پوست بهتر عمل کرده و ساختار متخلخل آن سرعت انتقال آب را افزایش داده است. اندازه‌گیری عبور تابش IR نشان داده که منسوج خنک‌کننده به‌صورت خیس، ۲ برابر بیشتر از حالت خشک و ۸ برابر بیشتر از پارچه پنبه‌ای امواج فروسرخ را عبور می‌دهد [۴۰].

در بررسی کای و همکارانش [۴۱]، طی استفاده از نانو ورق‌های نیتريد بور هیدروکسیله^۳، تحت فرایند دومرحله‌ای تکمیل قلیایی مافوق صوت و سپس بسپارش آنزیمی n- ایزوپروپیل آکریل آمید^۴ به‌وسیله پراکسید تروپ کوهی بر روی الیاف پنبه، موفق به تولید پارچه با قابلیت تنظیم دما شده‌اند. در پارچه کامپوزیت پنبه‌ای شامل BN-OH های کپسوله‌شده دارای خاصیت تنظیم‌کننده دما، شار حرارتی عمود و موازی سطح به ترتیب به‌میزان ۱/۲ و ۱/۷ برابر نسبت به پارچه خام افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به عکس‌العمل ماده پلی (PNIPAM)NIPAM به دما و افزایش چگالی نانورق‌های هادی حرارتی در دماهای بالا، نسبت داد. در همین حال، PNIPAM که سطوح را پوشش می‌دهد در دماهای پایین به آرامی منبسط شده و بنابراین اندازه فاصله بین نخ‌های پارچه را کاهش داده و به پارچه خاصیت حفظ حرارت را بخشیده است. این پژوهش یک راهبرد آسان و زیست‌سازگار را برای توسعه منسوجات هوشمند با توانایی پاسخ‌دهی در برابر دمای محیط ارائه کرده است [۴۱].

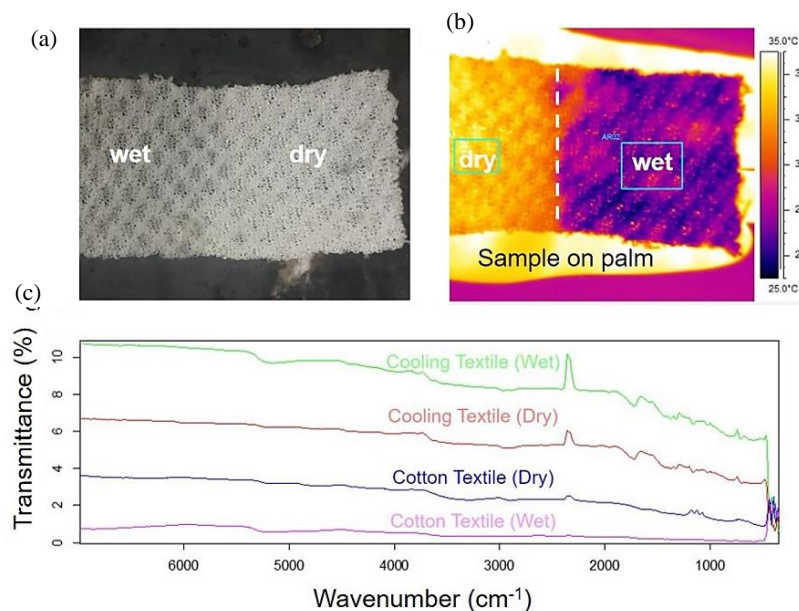
کای و همکارانش [۴۲]، در مطالعه دیگری، تحت شرایط کنترل‌شده حرارتی مکانیکی، موفق به تولید الیاف اتیلن وینیل کوپلیمر استات

3. Hydroxylated Boron Nitride
4. N-Isopropyl Acrylamide

1. Dynamic Thermal Rating
2. Polyethylene Terephthalate

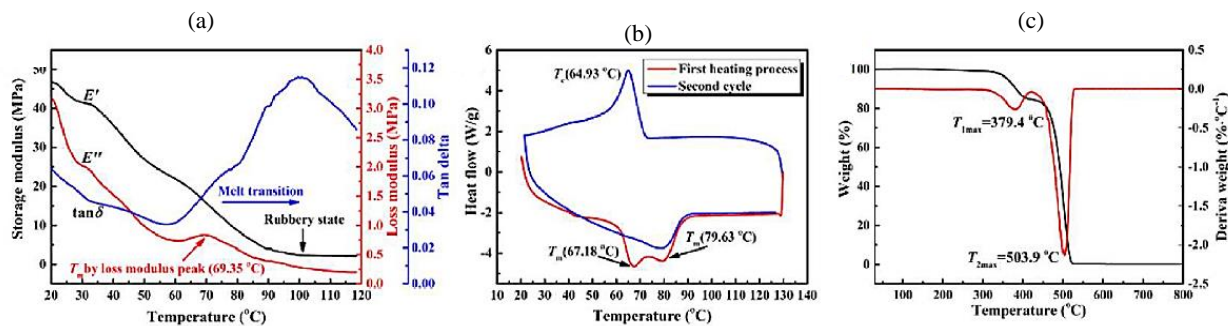
براساس شکل (۱۴-ا) نتایج فرایندهای حرارتی، حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت است. به‌علاوه، نتایج شکل (۱۴-ب) گویای وجود دو پیک در حین سرد کردن اولیه بوده که نشان‌دهنده وجود دو مرحله تشکیل بلور است. از طرفی، شکل (۱۴-ج) نشان‌دهنده وجود دو مرحله تجزیه در دماهای ۳۷۶/۴ و ۵۰۳/۹ درجه سلسیوس شامل استیک اسید و زنجیر اتیلن است [۴۲].

با رفتار حافظه‌شکل سه‌گانه شده و رفتار حرارتی- مکانیکی الیاف به‌دست‌آمده مطالعه شده است. بلورینگی بسیار نیز با استفاده از روش پراش پرتو ایکس با دامنه زاویه بلند انجام شده است. برای تولید الیاف، از فرایند ذوب‌ریسی^۱ و پخت با نور فرابنفش به‌مدت ۱۰ دقیقه با نسبت ۹۸:۱:۱ به‌ترتیب از اتیلین وینیل استات، بنزن فنون و تری‌آلیل ایزوسیانات استفاده شده است. قطر الیاف به‌دست‌آمده در حدود ۲۶۱ μm با نسبت ژل ۴۳/۶۸٪ بوده است.



شکل ۱۳. مقایسه اثر رطوبت در حالت خیس و خشک منسوج پلی‌اتیلن ترفتالات (a) حالت خشک و مرطوب منسوج طراحی‌شده (b) تصویر IR از مناطق خشک و مرطوب منسوج خنک‌کننده بر روی کف دست، (c) طیف عبور IR منسوجات خنک‌کننده و پارچه پنبه‌ای معمولی [۴۰].

Figure 13. Comparison of the effect of humidity in wet and dry state of polyethylene terephthalate fabric (a) dry and wet state of designed fabric (b) IR image of dry and wet areas of cooling fabric on the palm, (c) IR transmission spectrum of cooling fabric and fabric Ordinary cotton [36].



شکل ۱۴. نتایج آزمون‌های حرارتی اتیلن وینیل الکل، (a) DMTA، (b) DSC و (c) TGA-DTG [۴۲].

Figure 14. Results of thermal tests of ethylene vinyl alcohol, (a) DMTA, (b) DSC and (c) TGA-DTG [38].

1. Melt Spinning

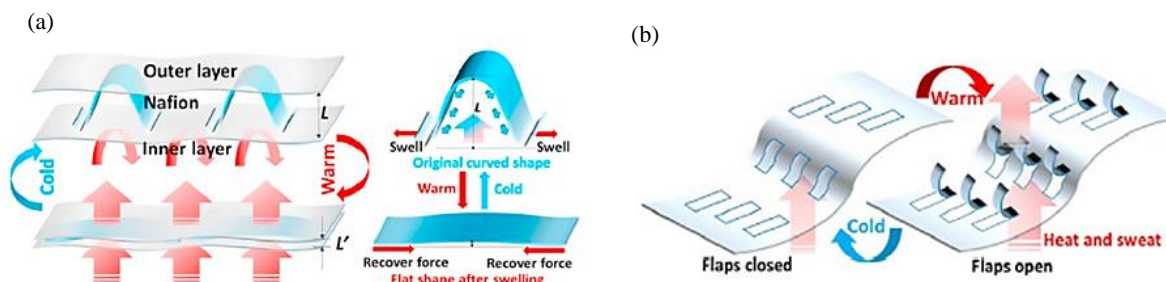
رطوبت، ورق‌ها نازک‌تر می‌شوند، بنابراین فاصله بین دو پارچه کاهش می‌یابد تا اثر عایق حرارتی کاهش یابد. لایه عایق می‌تواند ضخامت اصلی خود را پس از کاهش رطوبت بازیابی کند تا عملکرد حفظ حرارت را بازیابی نماید (شکل (۱۵) (a)-[۴۳]).

در مطالعات فوق عمدتاً برای کنترل همرفت هوا، از تغییر ساختار ناشی از تغییر رطوبت و حرارت که منجر به تغییر توانایی نفوذپذیری بخار آب می‌شود، استفاده شده است. این امر می‌تواند انتقال حرارت را از طریق همرفت تنظیم کند، اما در پژوهشی اولین دروازه دینامیکی تابش IR در یک منسوجات پاسخگو بررسی شده است. در این پژوهش، ژانگ و همکارانش [۴۴]، الیاف دو شکل تری استات-سلولز را با لایه نازکی از نانولوله‌های کربنی مهندسی کردند تا الیاف بسپاری را به رسانای الکتریکی تبدیل کنند. سپس یک منسوج با ویژگی‌های نوری IR هوشمند و سازگار دینامیکی، با ترکیب برهمکنش‌های الکترومغناطیسی قابل تنظیم در سطح لیف، تولید کردند. در شرایط مرطوب، نخ تشکیل شده به وسیله الیاف به گونه‌ای تغییر می‌کند که تابش منسوجات برای تطابق بهتر با تشعشعات حرارتی بدن انسان تغییر کرده و به‌طور مؤثر تبادل حرارت بین بدن انسان و محیط افزایش یافته است. با کاهش رطوبت، نخ به روشی معکوس پاسخ می‌دهد تا انتقال حرارت را کاهش دهد. منسوج طراحی شده این امکان را فراهم می‌کند که به‌طور مؤثر در پاسخ به تغییرات محیطی، تابش IR از راه پارچه عبور داده شود. تغییر ضریب عبور IR با بیش از ۳۵ درصد در پاسخ به تغییر رطوبت نشان داده شده است.

طبق بررسی انجام شده، اثر حافظه شکل الیاف اتیلن وینیل الکل دومرحله‌ای به‌طور اساسی وابسته به ازدیاد طول بلوری القاشده، انقباض ذوب القاشده، آرایش یافتگی، فرایند بلورینگی و هم‌چنین شرایط آزمون هم‌چون مقدار تنش، دمای تحریک و نرخ حرارت‌دهی است. به‌طوری‌که با افزایش نرخ دمایی، نرخ برگشت‌پذیری کرنش بیشتر می‌شود. به‌علاوه، هر چه تنش اعمالی بیشتر شود، مقدار برگشت‌پذیری کرنش به دلیل محدود کردن زنجیرهای بسپاری، کمتر می‌شود. به‌طور کلی، در تنش ثابت با افزایش دما می‌توان نرخ برگشت‌پذیری کرنش بیشتری را مشاهده کرد [۴۲].

ژونگ و همکارانش [۴۳]، دو نوع پارچه هوشمند نسبت به رطوبت را طراحی کرده و نشان داده‌اند که پارچه طراحی شده می‌تواند عملکرد عایق حرارتی خود را به‌طور برگشت‌پذیر انجام دهد. هر دو طرح براساس کاربرد موفقیت‌آمیز لایه‌ای از جنس نفیون^۱ بوده که در صورت قرار گرفتن در معرض رطوبت بسیار سریع به سمت رطوبت خم می‌شود. آنان براساس تقلید از منافذ در پوست انسان، پیشنهاد داده‌اند که در منسوج مورد نظر فلپ‌هایی (flaps) برای ایجاد منافذ در ورقه‌های نفیون ایجاد شود. این فلپ‌ها در هنگام افزایش رطوبت، مانند ایجاد تعرق، باز می‌شوند و بنابراین جریان هوا ایجاد می‌شود و با افزایش جریان همرفت هوا و کاهش سطح رطوبت، دما کاهش می‌یابد. فلپ‌ها می‌توانند با کاهش رطوبت به‌طور خودکار بسته شوند تا پوشنده گرم بماند (شکل (۱۵) (b)).

طرح دوم شامل لباس‌های قابل تنظیم ضخامت است که با قراردادن ورقه‌های بسپاری خم‌شده بین دو پارچه ایجاد می‌شود. با افزایش

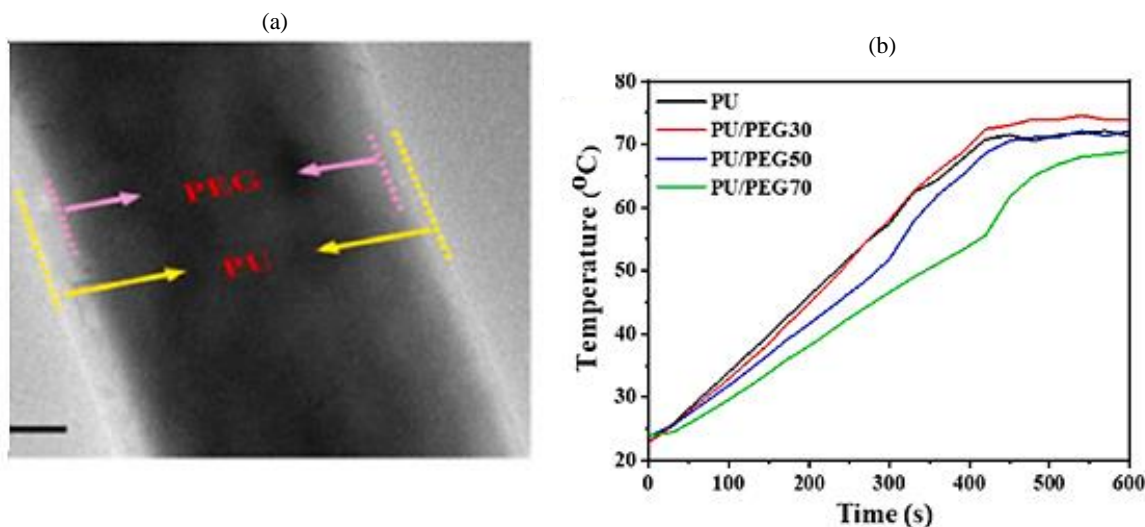


شکل ۱۵. عکس‌العمل فلپ‌های نفیون در شرایط گرم و سرد. (a) طرح دوم، (b) طرح اول [۴۳].

Figure 15. Reaction of Nafion flaps in hot and cold conditions. (a) second design, (b) first design [39].

در لحظه تغییر فاز از جامد به مایع، PEG حرارت اضافی را جذب کرده و در نهایت باعث بهبود عملکرد خنک‌کنندگی شده است. از یک طرف، اثر حافظه‌شکل به‌طور انعطاف‌پذیری تخلخل‌غشاها را تغییر داده و به‌طور مؤثر انتقال رطوبت را ارتقا داده است. از سوی دیگر، هسته PEG با حرارت نهان زیاد، خاصیت ذخیره انرژی حرارتی فوق‌العاده‌ای را به غشاها داده است، که برای جلوگیری از گرم‌شدن بیش از حد در محیط‌های گرم مفید است. به‌طور کلی، این منسوجات هوشمند با عملکرد خنک‌کنندگی خوب و قابلیت تنفس تطبیقی، می‌تواند آسایش کافی پوشندگان را در شرایط گرم تضمین کند [۴۵]. درانتها، جدول (۱) حاوی خلاصه‌ای از مطالعات است و روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

فنگ و همکارانش [۴۵]، الیاف خنک‌کننده‌ای را، با تلفیق مواد تغییر فازدهنده (PCM) و مواد حافظه‌شکل (Shape Memory) مطالعه کرده‌اند. الیاف با روش الکتروریسی پوسته-هسته تولیدشده و پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) در مرکز الیاف به‌عنوان ماده PCM و پلی‌اورتان (polyurethane-PU) به‌عنوان پوسته محافظ و ماده حافظه‌دار، اطراف آن قرار داده شده است. فرایندهای الکتروریسی در دمای 45°C و رطوبت ۵۰ درصد انجام شده است. برای حذف حلال‌ها از غشاها ریزمتخلخل استفاده شده و آن‌ها در آن خلأ با دمای 45°C خشک شده‌اند. طبق آزمون TEM ساختار هسته-پوسته الیاف اثبات شده است (شکل (۱۶)-a). هم‌چنین طی آزمون‌های حرارتی انجام‌شده، هرچه غلظت PEG بیشتر باشد به‌دلیل حرارت نهان این ماده اختلاف دمای بیشتری ایجاد شده است، به‌طوری‌که در ۷۰٪ پلی‌اتیلن گلیکول، حدود $7/6^{\circ}\text{C}$ اختلاف دمایی ایجاد شده است (شکل (۱۶)-b).



شکل ۱۶. (a) تصویر TEM، (b) نمودار آزمون حرارتی برای سه نوع الیاف با غلظت PEG متفاوت [۴۵].

Figure 16. (a) TEM image, (b) thermal analysis diagram for three types of fibers with different PEG concentration [41].

جدول ۱. خلاصه‌ای از مواد، سازوکار انتقال حرارت، کاستی‌ها و برتری‌های روش‌های مختلف کنترل دما در منسوجات.

Table 1. Summary of materials, disadvantages and advantages of different temperature control methods in textiles.

Row	The authors	Year	Type of thermal regulation	Thermal regulator mechanism	Structure/Materials	Thermal tests	Advantages	Disadvantages
1	Hsu et al. [8]	2016	Cooling	Radiation mechanism control	Nanoporous polyethylene	Skin simulator	2-2.7 °C decrease in skin temperature	Lack of clothing comfort
2	Peng et al. [9]	2018	Cooling	Radiation mechanism control	Porous micro-fibers of nano-polyethylene	Skin simulator	2.3 °C decrease skin temperature, increasing the comfort of clothes compared to nano porous polyethylene	
3	Hsu et al. [10]	2017	Heating and cooling	Radiation mechanism control	Different layers of carbon, copper and polyethylene	Heater and thermocouple	3.1 °C decrease in temperature in cooling and 3.4 °C increase in temperature in heating	Unusable on an industrial scale - carbon particles are carcinogenic
4	Cai et al. [12]	2018	Cooling	Radiation mechanism control	Copper oxide nanoparticles along with polyethylene fibers	Skin simulator	5-13 °C decrease in temperature	Lack of clothing comfort parameters
5	Song et al. [13]	2020	Cooling	Radiation mechanism control	Using porous PVDF fibers	Skin simulator	2.7 °C temperature reduction in the indoor environment and 5 °C temperature reduction in the outdoor environment	lack of comfort of clothes and checking the possibility of textile dyeing
6	Wei et al. [14]	2020	Cooling	Radiation mechanism control	Fabric modification with cellulose acetate along with Al ₂ O ₃	Skin simulator	1.5 °C skin temperature reduction compared to cotton fabric	Decreased flexibility of the fabric
7	Kim et al. [15]	2021	Cooling	Radiation mechanism control	Incorporating a nanoscale sputtered thin aluminum metal film	Skin simulator	2 °C skin temperature reduction compared to normal mode	Not being usable on an industrial scale - reducing flexibility
8	Wang et al. [16]	2021	Cooling	Conduction and radiation mechanism control	Composite of zinc oxide microcrystal tape and polyester fabric	Exposure to direct sunlight for 1 hour	20 °C temperature reduction compared to polyester fabric	Reducing the flexibility of the fabric
9	Xie et al. [17]	2021	Cooling	Radiation mechanism control	Coating polyamide fibers with silver nanoparticles	Infrared camera	1.1 °C Temperature reduction compared to pure polyamide	Unusable on an industrial scale
10	Song et al. [18]	2020	Cooling	Radiation mechanism control	Different layers of PA/PVDF/PE	Temperature measurement with thermocouple and infrared camera	Low absorption of heat- high reflection of visible light	Unusable on an industrial scale - reducing the comfort of clothing
11	Abbas et al. [21]	2013	Cooling	Conduction mechanism control	Carbon nanotube coating	thermocouple and infrared camera	3.9 °C skin temperature reduction compared to common fabrics	Reducing air permeability in fabric
12	Gao et al. [22]	2017	Cooling	Conduction mechanism control	Composite fibers of boron nitride and polyvinyl alcohol	Temperature measurement with thermocouple and infrared camera	The thermal conductivity constant of the produced fibers was 22 times higher than that of cotton fabric.	Unable to produce on an industrial scale - not having comfort parameters of clothes
13	Yue et al. [23]	2019	Heating and cooling	Conduction and radiation mechanism control	Manganese oxide copper nanowires and cellulose hydroxide fibers	Temperature measurement with thermocouple and infrared camera	10 °C skin temperature reduction compared to cotton fabrics	Unusable on an industrial scale and reducing the flexibility and comfort parameters of clothing
14	Khalili et al. [24]	2017	Cooling	Conduction mechanism control	Using a combination of polyester and two layers of copper-nickel- phosphorus-nickel	Thermal radiation sensor and infrared camera	1.8-2.5 °C heating and 0.7 °C cooling in the environment with a temperature of 18 °C	Reducing the flexibility of clothing
15	Cui et al. [26]	2018	Heating	Conduction mechanism control	Biomimetic porous nanofibers made of silk	Infrared camera	Increasing the passage of infrared waves	The high price of silk and as a result it cannot be used on an industrial scale

16	Jabbari et al. [27]	2015	Heating	Conduction mechanism control	Covering polyester fabric with polyvinyl chloride	Thermal Gravimetric Analysis	5 °C heating compared to polyester fabric at an ambient temperature of 20 °C	Reducing the flexibility of the fabric
17	Peng at al. [4]	2021	Cooling and increasing sweat evaporation	Conduction mechanism and evaporation control	Covering with silver nanoparticles and using cellulose and nylon 6 fibers	Skin simulator with sweating	26% increase in thermal insulation properties of fabric	Cutting parts of the textile and thus reducing its strength
18	Mikołajczyk et al. [28]	2021	Heating	Conduction mechanism control	Organic cotton, natural silk or polypropylene	Investigating the thermal balance of a baby in a textile incubator	1.7-2.5 °C temperature reduction compared to cooling textiles available in the market (Dri-fit and cotton fabrics)	The possibility of creating hyperthermia and limiting the field of application
19	Liu et al. [29]	2019	Heating	Conduction mechanism control	Kevlar nanofibers (KNF) with porous three-dimensional structure	Temperature measurement with thermocouple and infrared camera	Increasing the thermal resistance and insulating effect of the designed fabric	Unusable on an industrial scale
20	Miao et al. [31]	2022	Cooling	Conduction mechanism and evaporation control	Polyurethane/silicon nitride fibrous membrane	Skin simulator with sweating	The insulation effect is very favorable	
21	Peng et al. [32]	2022	Heating and cooling	Conduction and radiation mechanism control	Fabric coating with silver nanoparticles	Skin simulator and infrared camera	21.9 °C temperature reduction in direct sunlight and 2.8 °C at night compared to traditional cotton	Unusable on an industrial scale
22	Lu et al. [33]	2019	Heating and cooling	Use of phase change materials	Use of paraffin wax	Infrared camera	1.1- 1.7 °C skin temperature reduction	Short duration of temperature control-inapplicability on an industrial scale
23	Sánchez et al. [34]	2010	Heating and cooling	Use of phase change materials	Polystyrene microcapsules containing paraffin wax	Infrared camera	3 °C temperature difference compared to the control sample without PCM materials	Short duration of temperature control-inapplicability on an industrial scale
24	Rezvanpour et al. [35]	2018	Heating and cooling	Use of phase change materials	Micro and nano capsules containing N-icosan	DSC and TGA analysis	8.8 °C temperature difference with control sample without PCM materials for 65 seconds	Short duration of thermal reaction
25	Sarier et al. [36]	2015	Heating and cooling	Use of phase change materials	Microcapsules containing n-octane with silver nanoparticles	DSC analysis	High thermal stability and thermal energy storage	Short duration of temperature control-inapplicability on an industrial scale
26	Wu et al. [37]	2020	Heating and cooling	Use of phase change materials	Polyethylene glycol with polydimethylsiloxane coating	Infrared camera	High thermal capacity-durability, stability and high thermal conductivity	Short duration of temperature control - adverse effect of washing on textile performance
27	Karaszewska et al. [38]	2019	Heating and cooling	Use of phase change materials	Enicosan microcapsules with siloxane skin	DSC analysis	5 °C temperature difference in the cooling and heating process compared to the raw fabric	Unusable on an industrial scale
28	Haghighat et al. [39]	2019	Heating and cooling	Use of phase change materials	Core and shell fibers containing n-hexadecane and n-octadecane	Skin simulator	High thermal stability	Short duration of temperature control
29	Fu et al. [40]	2019	Heating and cooling	Use of shape memory materials	Polyethylene terephthalate with cellulose	Infrared camera	Thermal regulation as much as 13 °C compared to fibers without phase change materials in the cooling process	
30	Qi et al. [41]	2021	Heating and cooling	Use of shape memory materials	Cotton with hydroxylated boron nitride	Skin simulator	Increasing thermal conductivity and passing infrared radiation	

31	Qi et al. [42]	2021	Heating and cooling	Use of shape memory materials	Ethylene vinyl chloride acetate copolymer	Infrared camera	Increase of 1.2 to 1.7 times the thermal flux perpendicular and parallel to the textile surface	Lack of textile comfort
32	Zhong et al. [43]	2017	Heating and cooling	Use of shape memory materials	Nafion flaps	Sweat simulator	8 °C temperature reduction compared to the control fabric	Not applicable in all clothing areas
33	Zhong et al. [44]	2019	Heating and cooling	Use of shape memory materials	Cellulose triacetate fibers with carbon nanotubes	Infrared camera	2 °C temperature reduction compared to fabric without Nafion flaps	
34	Feng et al. [45]	2021	Heating and cooling	Using shape memory and phase change materials	Polyurethane fibers with polyethylene glycol core	Skin simulator	35% increase in infrared radiation transmission coefficient	Disadvantages

۵. نتیجه‌گیری

مراجع

- در این مقاله، مطالعات اخیر در زمینه منسوجات تنظیم‌کننده حرارتی در حالت گرم کردن، سرد کردن و دو حالت بررسی شده است. مدیریت حرارتی شخصی نه تنها بر راحتی، سلامتی و کارایی بدن انسان اثر دارد؛ بلکه به طور قابل ملاحظه‌ای باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی (تهویه مطبوع، سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها) نیز می‌شود. هم‌چنین از مدیریت حرارتی منسوج می‌توان در شرایط سخت آب و هوایی و شغلی استفاده کرد؛ اما با وجود مطالعات زیاد انجام‌شده، چالش‌های فراوانی در راستای تجاری‌سازی روش‌های بیان‌شده وجود دارد؛ به طور مثال استفاده از مواد نانو، به دلیل نفوذپذیری این مواد در بدن انسان، مضر است و باید راهکاری برای جلوگیری از ورود این مواد به بدن ارائه شود. هم‌چنین در استفاده از مواد تغییر فاز دهنده چالش‌هایی مانند نشتی، کاهش هدایت حرارتی و پدیده فراسرمایش وجود دارد و یا به دلیل محدودیت در مقدار ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده، مدت زمان تنظیم حرارتی کوتاه است و منسوج طراحی‌شده کارایی کوتاه‌مدتی خواهد داشت. از طرفی دیگر با استفاده از لایه‌های فلزی برای افزایش هدایت حرارتی منسوج، انعطاف‌پذیری و راحتی لباس کاهش می‌یابد. بنابراین باید در مطالعات آینده به مشخصه‌های نفوذپذیری رطوبت و هوا، نرمی و راحتی منسوج، زیست‌سازگاری با بدن انسان، قابلیت شست‌وشو و رنگ‌پذیری منسوج طراحی‌شده نیز توجه شود.
۶. تشکر و قدردانی
- بدین وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی بنیاد ملی نخبگان (طرح شهید احمدی روشن) در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

- [10] Hasanzadeh, M., Mottaghitalab, V., Ansari, R., Moghadam, B. H., & Haghi, A. K. (2015). Issues in production of carbon nanotubes and related nanocomposites: A comprehensive review. *Cell. Chem. Technol*, 49, 237-257.
- [11] Hsu, P. C., Liu, C., Song, A. Y., Zhang, Z., Peng, Y., Xie, J., ... & Cui, Y. (2017). A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling. *Science advances*, 3(11), e1700895.
- [12] Hsu, P. C., Song, A. Y., Catrysse, P. B., Liu, C., Peng, Y., Xie, J., ... & Cui, Y. (2016). Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*, 353(6303), 1019-1023.
- [13] Jabbari, M., Åkesson, D., Skrifvars, M., & Taherzadeh, M. J. (2015). Novel lightweight and highly thermally insulative silica aerogel-doped poly (vinyl chloride)-coated fabric composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(19), 1581-1592.
- [14] Karaszewska, A., Kamińska, I., Nejman, A., Gajdzicki, B., Fortuniak, W., Chojnowski, J., ... & Sowinski, P. (2019). Thermal-regulation of nonwoven fabrics by microcapsules of n-eicosane coated with a polysiloxane elastomer. *Materials Chemistry and Physics*, 226, 204-213.
- [15] Khalili, A., Mottaghitalab, A., Hasanzadeh, M., & Mottaghitalab, V. (2017). Rejection of far infrared radiation from the human body using Cu-Ni-P-Ni nanocomposite electroless plated PET fabric. *International Journal of Industrial Chemistry*, 8, 109-120.
- [16] Kim, G., Park, K., Hwang, K., Choi, C., Zheng, Z., Seydel, R., ... & Jin, S. (2021). Black textile with bottom metallized surface having enhanced radiative cooling under solar irradiation. *Nano Energy*, 82, 105715.
- [17] Lan, X., Wang, Y., Peng, J., Si, Y., Ren, J., Ding, B., & Li, B. (2021). Designing heat transfer pathways for advanced thermoregulatory textiles. *Materials Today Physics*, 17, 100342.
- [18] Leng, J., Lan, X., Liu, Y., & Du, S. (2011). Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications. *Progress in Materials Science*, 56(7), 1077-1135.
- [19] Liu, Z., Lyu, J., Fang, D., & Zhang, X. (2019). Nanofibrous kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments. *Acs Nano*, 13(5), 5703-5711.
- [20] Lu, Y., Xiao, X., Fu, J., Huan, C., Qi, S., Zhan, Y., ... & Xu, G. (2019). Novel smart textile with phase change materials encapsulated core-sheath structure fabricated by coaxial electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, 355, 532-539.
- [21] Miao, D., Cheng, N., Wang, X., Yu, J., & Ding, B. (2022). Integration of Janus wettability and heat conduction in hierarchically designed textiles for all-day personal radiative cooling. *Nano Letters*, 22(2), 680-687.
- [22] Mikołajczyk, Z., & Szalek, A. (2022). Analysis of newborn thermal comfort in a textile incubator. *The Journal of The Textile Institute*, 113(8), 1521-1530.
- [23] Moghadam, B. H., Haghi, A. K., Kasaei, S., & Hasanzadeh, M. (2015). Computational-based approach for predicting porosity of electrospun nanofiber mats using response surface methodology and artificial neural network methods. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 54(11), 1404-1425.
- [24] Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*, 28(11-12), 1536-1550.
- [25] Peng, Y., Chen, J., Song, A. Y., Catrysse, P. B., Hsu, P. C., Cai, L., ... & Cui, Y. (2018). Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric. *Nature sustainability*, 1(2), 105-112.
- [26] Peng, Y., & Cui, Y. (2020). Advanced textiles for personal thermal management and energy. *Joule*, 4(4), 724-742.
- [27] Peng, Y., Lee, H. K., Wu, D. S., & Cui, Y. (2022). Bifunctional asymmetric fabric with tailored thermal conduction and radiation for personal cooling and warming. *Engineering*, 10, 167-173.
- [28] Peng, Y., Li, W., Liu, B., Jin, W., Schaadt, J., Tang, J., ... & Cui, Y. (2021). Integrated cooling (i-Cool) textile of heat conduction and sweat transportation for personal perspiration management. *Nature communications*, 12(1), 6122.
- [29] Qi, B., Wang, F., Chen, Q., Xu, B., Wang, P., Man, Z., ... & Wang, Q. (2021). Green Constructing an Intelligent Temperature-Regulating Fabric with Multiple Heat-Transfer Capabilities.
- [30] Qi, X., Dong, Y., Islam, M. Z., Zhu, Y., Fu, Y., & Fu, S. Y. (2021). Excellent triple-shape memory effect and superior recovery stress of ethylene-vinyl acetate copolymer fiber. *Composites Science and Technology*, 203, 108609.
- [31] Rezvanpour, M., Hasanzadeh, M., Azizi, D., Rezvanpour, A., & Alizadeh, M. (2018). Synthesis and characterization of micro-nanoencapsulated n-eicosane with PMMA shell as novel phase change materials for thermal energy storage. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 299-304.
- [32] Sánchez, P., Sánchez-Fernandez, M. V., Romero, A., Rodríguez, J. F., & Sánchez-Silva, L. (2010). Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. *Thermochimica Acta*, 498(1-2), 16-21.
- [33] Sarier, N., Onder, E., & Ukuser, G. (2015). Silver incorporated microencapsulation of n-hexadecane and

- n-octadecane appropriate for dynamic thermal management in textiles. *Thermochemica Acta*, 613, 17-27.
- [34] Song, Y. N., Lei, M. Q., Lei, J., & Li, Z. M. (2020). Spectrally selective polyvinylidene fluoride textile for passive human body cooling. *Materials Today Energy*, 18, 100504.
- [35] Song, Y. N., Li, Y., Yan, D. X., Lei, J., & Li, Z. M. (2020). Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130, 105738.
- [36] Taherkhani, A., & Hasanzadeh, M. (2018). Durable flame retardant finishing of cotton fabrics with poly (amidoamine) dendrimer using citric acid. *Materials Chemistry and Physics*, 219, 425-432.
- [37] Wang, Y., Shou, D., Shang, S., Chiu, K. L., & Jiang, S. (2021). Cooling performance of a bioinspired micro-crystal-bars coated composite fabric with solar reflectance. *Composites Communications*, 27, 100814.
- [38] Wei, W., Zhu, Y., Li, Q., Cheng, Z., Yao, Y., Zhao, Q., ... & Gao, Y. (2020). An Al₂O₃-cellulose acetate-coated textile for human body cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 211, 110525.
- [39] Wong, A., Daoud, W. A., Liang, H. H., & Szeto, Y. S. (2015). Application of rutile and anatase onto cotton fabric and their effect on the NIR reflection/surface temperature of the fabric. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 134, 425-437.
- [40] Wu, J., Hu, R., Zeng, S., Xi, W., Huang, S., Deng, J., & Tao, G. (2020). Flexible and robust biomaterial microstructured colored textiles for personal thermoregulation. *ACS applied materials & interfaces*, 12(16), 19015-19022.
- [41] Xie, X., Liu, Y., Zhu, Y., Xu, Z., Liu, Y., Ge, D., & Yang, L. (2022). Enhanced IR radiative cooling of silver coated PA textile. *Polymers*, 14(1), 147.
- [42] Yue, X., Zhang, T., Yang, D., Qiu, F., Wei, G., & Zhou, H. (2019). Multifunctional Janus fibrous hybrid membranes with sandwich structure for on-demand personal thermal management. *Nano Energy*, 63, 103808.
- [43] Zhang, X. A., Yu, S., Xu, B., Li, M., Peng, Z., Wang, Y., ... & Wang, Y. (2019). Dynamic gating of infrared radiation in a textile. *Science*, 363(6427), 619-623.
- [44] Zhao, D., Lu, X., Fan, T., Wu, Y. S., Lou, L., Wang, Q., ... & Yang, R. (2018). Personal thermal management using portable thermoelectrics for potential building energy saving. *Applied Energy*, 218, 282-291.
- [45] Zhong, Y., Zhang, F., Wang, M., Gardner, C. J., Kim, G., Liu, Y., ... & Chen, R. (2017). Reversible humidity sensitive clothing for personal thermoregulation. *Scientific reports*, 7(1), 44208.