نشریه علمی پژوهشی علم، فرهنگ و هنر
www.iijsca.ir
ISSN (print): 3060-8457

کاربرد نانوالیاف پاسخگو در لباس‌های ورزشی هوشمند: ارزیابی عملکرد ترموکرومیک، رطوبتی و حرارتی

محبوبه نکوفرد[1]*
[1]هیئت علمی (مربی) گروه هنر، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

MDOI-02-2026.0618
MNR-639-2-397B9C

استناد به مقاله: نکوفرد ، محبوبه، (1405). کاربرد نانوالیاف پاسخگو در لباس‌های ورزشی هوشمند: ارزیابی عملکرد ترموکرومیک، رطوبتی و حرارتی، نشریه علم، فرهنگ و هنر ، دوره 2 (2)، صفحه 1-صفحه 9.

چکیده

تقاضای روزافزون برای پوشاک ورزشی با کارایی بالا، ضرورت دستیابی به منسوجاتی را که قادر به تنظیم دینامیک ریزاقلیم پوست باشند، دوچندان کرده است. منسوجات سنتی به دلیل محدودیت در مدیریت همزمان تعریق و تعادل حرارتی، اغلب در شرایط فعالیت‌های بدنی شدید منجر به استرس حرارتی و افت عملکرد ورزشکار می‌شوند. پژوهش حاضر با هدف ارائه و ارزیابیبیک ساختار چندلایه هوشمند مبتنی بر نانوالیاف الکتروریسی‌شده پلی‌وینیل‌الکل (*PVA*) جهت دستیابی به عملکردهای همزمان انتقال رطوبت، تنظیم حرارت نهان و بازخورد دیداری طراحی و اجرا شد. در این مطالعه، چهار گروه نمونه شامل پارچه پنبه‌ای (شاهد)، نانوالیاف خالص، نانوالیاف حاوی میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده (*PCM*) و نانوالیاف با پوشش ترموکرومیک ساخته و از نظر شاخص‌های عملکردی نظیر زاویه تماس، زمان تبخیر، نفوذپذیری هوا، مقاومت حرارتی و تغییر رنگ (تحت طیف حرارتی) مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شبکه نانوالیاف به دلیل تخلخل بالا و آب‌دوستی، زاویه تماس آب را از 118/5 درجه در نمونه پنبه‌ای به 42/3 درجه کاهش داده و زمان خشک‌شدن را با افتی 63 درصدی، از 18/4 به 6/8 دقیقه رساند. افزودن میکروکپسول‌های *PCM* مقاومت حرارتی را به 0/52 کلوا افزایش داد که بیانگر پتانسیل بالای آن در بافرینگ حرارتی و تثبیت دمای بدن است. نمونه ترموکرومیک نیز پاسخ نوری دقیق و غیرخطی نشان داد؛ به‌طوری‌که با عبور از آستانه دمایی 30 درجه سانتی‌گراد، شاخص تغییر رنگ (*ΔE**) به‌طور چشمگیری افزایشیافته و در دمای 45 درجه به مقدار 21/4 رسید. اینیافته‌ها اثبات می‌کند که یکپارچه‌سازی نانوالیاف *PVA* با مواد عملکردی، راهکاری هم‌افزا برای حل چالش‌های فیزیولوژیک ورزشکاران است. این سیستم چندمعیاره، ضمن حفظ تعادل میان تنفس‌پذیری و عایق‌بندی، بازخوردی شهودی از استرس حرارتی ارائه می‌دهد و زیربنای فنی لازم برای توسعه نسلی نوین از پوشاک ورزشی هوشمند و عملیاتی را فراهم می‌آورد.

تاریخچه مقاله:
دریافت شده: 1405.07.28
پذیرفته شده: 1405.07.29
در دسترس آنلاین: 1405.07.30

واژگان کلیدی: نانوالیاف، منسوجات هوشمند، پوشاک ورزشی، مواد ترموکرومیک، مدیریت رطوبت

1. مقدمه:

افزایش استفاده از پوشاک ورزشی در فعالیت‌های حرفه‌ای و تفریحی، نیاز به توسعه منسوجاتی را افزایش داده است که علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی و زیبایی‌شناختی، بتوانند نسبت به تغییرات محیطی و فیزیولوژیک واکنش نشان دهند[1]. در فعالیت ورزشی، افزایش دمای بدن و تولید عرق می‌تواند موجب کاهش آسایش حرارتی، افزایش اصطکاک، احساس سنگینی لباس و افت عملکرد شود. ازاین‌رو، مدیریت همزمان رطوبت و حرارت یکی از

The corresponding authors:
Email: mnekofard@yahoo.com
Tel: 09151634417

مهم‌ترین چالش‌های طراحی لباس‌های ورزشی محسوب می‌شود[2]. نانوالیاف به‌دلیل نسبت سطح به حجم بالا، قابلیت تنظیم ساختار متخلخل، امکان اصلاح شیمیایی و قابلیت ترکیب با مواد عملکردی، بستر مناسبی برای تولید منسوجات پاسخگو فراهممی‌کنند[3].ساختار نانوالیافی می‌تواند با افزایش سطح تماس، انتقال و تبخیر رطوبت را بهبود دهد. همچنین، افزودن مواد تغییر فاز می‌تواند بخشی از گرمای تولیدشده در هنگام فعالیت را جذب یا آزاد کند[3]. از سوی دیگر، مواد ترموکرومیک قادرند در محدوده دمایی مشخص، تغییر رنگ برگشت‌پذیر ایجاد کنند. این ویژگی امکان ارائه بازخورد بصری درباره تغییرات حرارتی را فراهم می‌سازد. بااین‌حال، استفاده جداگانه از این فناوری‌ها الزاماً به عملکرد مطلوب منجر نمی‌شود؛ زیرا افزایش آب‌دوستی، کاهش نفوذپذیری هوا، کاهش دوام شست‌وشوییا اختلال در تغییر رنگ از جمله چالش‌های احتمالی هستند[4].

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف طراحییک ساختار مفهومی چندلایه برای لباس ورزشی هوشمند انجام شد. نوآوری پیشنهادی مطالعه در ترکیب سه عملکرد است:

1- مدیریت رطوبت با استفاده از نانوالیاف آب‌دوست؛
2- تنظیم حرارت با استفاده از ماده تغییر فاز؛
3- نمایش دیداری تغییر دما با استفاده از ماده ترموکرومیک.

2. پیشینه تحقیق:

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که منسوجات هوشمند از حوزه‌ای نوظهور به قلمرویی میان‌رشته‌ای در ورزش، سلامت و حفاظت فردی تبدیل شده‌اند. این منسوجات با واکنش به محرک‌هایی مانند دما، رطوبت و حرکت، می‌توانند علاوه بر نقش پوششی، در پایش وضعیت بدن، افزایش آسایش و ارتقای عملکرد ورزشی نیز مؤثر باشند[5].

نانوالیاف الکتروریسی‌شده به‌دلیل سطح ویژه بالا، وزن کم، تخلخل مناسب و امکان اصلاح شیمیایی و ساختاری، بستر مناسبی برای توسعه پوشاک هوشمند به شمار می‌روند. قابلیت بارگذاری مواد فعال و ترکیب آن‌ها با ساختارهای چندلایه، امکان ایجاد منسوجاتی با عملکردهای هم‌زمان مانند تنظیم حرارت، مدیریت رطوبت و پاسخ‌گویی بصری را فراهم می‌کند[6]. مواد کرومیک، به‌ویژه ترکیبات ترموکرومیک، می‌توانند در برابر تغییرات دمایی تغییر رنگ دهند و به‌عنوان شاخصی بصری برای پایش شرایط حرارتی عمل کنند. در لباس‌های ورزشی، این ویژگی می‌تواند برای نمایش افزایش دمای سطح لباس یا بدن و ارائه هشدار اولیه درباره تنش حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برگشت‌پذیری، سرعت پاسخ و مقاومت در برابر نور و شست‌وشو از عوامل مهم در کاربرد آن‌ها هستند[7]. در حوزه تنظیم حرارت، مواد تغییر فاز با جذب و آزادسازی گرمای نهان می‌توانند نوسانات دمایی را کاهش دهند. ادغام این مواد با شبکه‌های نانوالیافی، ضمن افزایش سطح تماس و بهبود انتقال حرارت، امکان تثبیت ماده فعال در ساختار لباس را فراهم می‌کند. با وجود این، جلوگیری از نشت ماده، حفظ انعطاف‌پذیری و کاهش وزن اضافی همچنان از چالش‌های مهم این فناوری است[8]. مدیریت رطوبت نیزیکی از الزامات اساسی پوشاک ورزشی هوشمند است. طراحی منسوجات با سطوح آب‌دوست و آب‌گریز می‌تواند جذب عرق از سطح پوست، انتقال جهت‌دار آن و تبخیر در لایه بیرونی را تسهیل کند. این فرایند از تجمع رطوبت در مجاورت پوست جلوگیری کرده و موجب بهبود خشکی، تنفس‌پذیری و آسایش حرارتی می‌شود[9]. ساختارهای چندلایه و ***core–sheath*** امکان تفکیک عملکردهای مختلف را در یک سامانه واحد فراهم می‌کنند. در چنین ساختاری، لایه داخلی می‌تواند مسئول جذب رطوبت، لایه میانی تنظیم حرارت و لایه بیرونی نمایش تغییرات دمایی باشد. این معماری، بدون افزایش چشمگیر ضخامت لباس، ظرفیت تلفیق چند عملکرد را افزایش می‌دهد[10]. با وجود پیشرفت‌های موجود، بیشتر پژوهش‌ها بر یک عملکرد خاص مانند تغییر رنگ، تنظیم حرارت یا انتقال رطوبت تمرکز داشته‌اند. چالش اصلی، تلفیق هم‌زمان این قابلیت‌ها در لباسی سبک، انعطاف‌پذیر، بادوام و سازگار با پوست است. همچنین، پایداری در برابر شست‌وشو، سایش، تابش فرابنفش، هزینه تولید و مقیاس‌پذیری صنعتی باید در فرایند توسعه مورد توجه قرار گیرد[11]. بر این اساس، شکاف پژوهشی موجود نه در نبود فناوری‌های منفرد، بلکه در فقدان یک معماریکپارچه برای ترکیب پایش حرارتی، تنظیم انرژی و مدیریت رطوبت است. پژوهش حاضر با تمرکز بر نانوالیاف ترموکرومیک و ساختارهای هیدروفیلیک–هیدروفوبیک، امکان طراحی لباس ورزشی چندلایه‌ای را بررسی می‌کند که بتواند هم‌زمان بازخورد بصری دما، انتقال مؤثر رطوبت و آسایش حرارتی را فراهم سازد[12].

در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که هر یک از فناوری‌های ترموکرومیک، مواد تغییر فاز، نانوالیاف پاسخگو و ساختارهای مدیریت‌کننده رطوبت، ظرفیت مشخصی برای ارتقای عملکرد پوشاک ورزشی دارند. با این حال، پژوهش‌های موجود کمتر به طراحییک سامانه پوشیدنی پرداخته‌اند که این قابلیت‌ها را به‌صورت هم‌زمان، هماهنگ و متناسب با نیازهای ورزشکار ترکیب کند. از این منظر، شکاف پژوهشی اصلی در نبود فناوری‌های منفرد نیست، بلکه در فقدان الگوی طراحییکپارچه برای تلفیق پایش حرارتی، تنظیم انرژی، انتقال جهت‌دار رطوبت، دوام مکانیکی و آسایش پوشنده است. این خلأ، ضرورت بررسی رویکردهای معماری چندلایه و نانوالیافی را در توسعه نسل جدید لباس‌های ورزشی هوشمند نشان می‌دهد.

3. مبانی نظری

ساختار پیشنهادی شامل سه لایه عملکردی است:

لایه	ماده یا عملکرد پیشنهادی	نقش عملکردی
لایه داخلی	نانوالیاف آب‌دوست پلی‌وینیل‌الکل	جذب، انتقال و تبخیر رطوبت
لایه میانی	ماده تغییر فاز	جذب یا آزادسازی بخشی از گرمای بدن
لایه بیرونی	پوشش یا نانوالیاف ترموکرومیک	نمایش تغییرات دمایی از طریق تغییر رنگ

مدل مفهومی پژوهش بر این فرض بنیادین استوار است که عملکرد پوشاک ورزشی را نمی‌توان صرفاً با تغییر جنس کلی الیافیا افزودن یک ماده منفرد بهبود بخشید؛ بلکه ارتقای واقعی عملکرد، محصولِ طراحی آگاهانه در دو مقیاس به‌هم‌پیوسته است: نخست، اصلاح ساختار سطحی و ریزساختاری الیاف و دوم، افزودن مواد پاسخگو به محرک‌های محیطی. اصلاح ساختار سطحی، از طریق کنترل قطر الیاف، تخلخل، زبری سطحی، انرژی سطحی و آرایش هندسی لایه‌ها، امکان هدایت هدفمند جریان رطوبت، هوا و حرارت را فراهم می‌سازد. در همین حال، افزودن مواد پاسخگو مانند پلیمرهای حساس به دما، مواد تغییر فاز و رنگدانه‌های ترموکرومیک، این توانایی را به منسوج می‌دهد که در برابر تغییرات شرایط محیطیبا وضعیت فیزیولوژیک بدن، پاسخی فعال، برگشت‌پذیر و قابل کنترل از خود نشان دهد. بر این اساس، مدل پیشنهادی فرض می‌کند که تلفیق این دو رویکرد یعنی مهندسی ساختار از یک‌سو و عملکرد پاسخگویی از سوی دیگر می‌تواند عملکرد پوشاک را در سه سطح مکمل ارتقا دهد: (1) سطح مدیریت رطوبت، به‌معنای انتقال سریع عرق از سطح پوست به بیرون، جلوگیری از چسبندگی و تسریع تبخیر؛ (2) سطح تنظیم حرارت، به‌معنای جذب یا آزادسازی کنترل‌شده انرژی گرمایی برای حفظ تعادل دمایی بدن در شدت‌های مختلف فعالیت؛ و (3) سطح بازخورد دیداری، به‌معنای تبدیل تغییرات دماییبا رطوبتی به یک پیام قابل مشاهده برای کاربر. بدین‌ترتیب، نوآوری مدل در آن است که این سه سطح را نه به‌عنوان قابلیت‌های مجزا، بلکه به‌عنوان اجزاییک زنجیره عملکردییکپارچه در نظر می‌گیرد که در آن، انتقال رطوبت، تنظیم حرارت و بازخورد دیداری به‌صورت هم‌افزا یکدیگر را تقویت می‌کنند و در نهایت به شکل‌گیری مفهوم «آسایش هوشمند» در پوشاک ورزشی می‌انجامد.

4. روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد؛ چرا که دستاورد نهایی آن نه صرفاً تبیین نظریک پدیده، بلکه ارائه یک الگوی طراحی قابل اجرا برای ساخت نمونه پوشاک ورزشی هوشمند و هدایت فرایند تولید آن است. از نظر روش، این مطالعه به‌صورت آزمایشگاهی و مقایسه‌ای طراحی شده است؛ بدین معنا که پس از ساخت نمونه‌های نانوالیافی، رفتار هر نمونه در پاسخ به محرک‌های رطوبتی و دمایی به‌طور کنترل‌شده اندازه‌گیری شده و سپس عملکرد آن‌ها در چارچوب یک طرح مقایسه‌ای، در برابر نمونه شاهد پنبه‌ای و نیز در برابر یکدیگرمورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این ساختار، متغیر مستقل، نوع ساختار منسوجی و ترکیب مواد پاسخگو به‌کاررفته در هر لایه است و متغیرهای وابسته، شاخص‌های عملکردی پوشاک شامل مدیریت رطوبت، تنظیم حرارت و بازخورد دیداری تعریف می‌شوند. افزون بر این، به‌منظور کنترل اثر متغیرهای مداخله‌گر، شرایط آزمون شامل دما، رطوبت نسبی محیط و شدت فعالیت در تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته می‌شود.

گروه‌های آزمایشی

چهار گروه نمونه در نظر گرفته شد:

گروه ***C***: پارچه شاهد پنبه‌ای؛

گروه NF: نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل؛

گروه ***NF–PCM***: نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل حاوی ماده تغییر فاز؛

گروه ***NF–TC***: نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل دارای پوشش ترموکرومیک.

شاخص‌های اندازه‌گیری

الف) زاویه تماس آب

زاویه تماس آب به‌عنوان شاخصی از ترشوندگی سطح اندازه‌گیری شد. زاویه تماس کمتر نشان‌دهنده آب‌دوستی بیشتر سطح است.

ب) زمان خشک‌شدن

نمونه‌ها پس از اعمال مقدار مشخصی رطوبت در شرایط کنترل‌شده قرار گرفتند و زمان رسیدن به جرم پایدار ثبت شد.

ج) پاسخ ترموکرومیک

نمونه ترموکرومیک در دماهای 20، 25، 30، 35، 40 و 45 درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. تغییر رنگ با شاخص اختلاف رنگ ΔE بیان شد:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^*-L_1^*)^2 + (a_2^*-a_1^*)^2 + (b_2^*-b_1^*)^2}$$

د) نفوذپذیری هوا

نفوذپذیری هوا بر حسب مترمکعب بر مترمربع در دقیقه گزارش شد.

هـ) مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی نمونه‌ها بر اساس واحد clo بیان شد. مقدار بیشتر نشان‌دهنده عایق‌بودن بیشتر نمونه است.

تحلیل آماری پیشنهادی

در این پژوهش، برای مقایسه گروه‌ها از تحلیل واریانسیک‌طرفه استفاده شده است:

$$Yij=\mu+Ti+Eij$$

که در آن:

The corresponding authors:
Email: mnekofard@yahoo.com
Tel: 09151634417

Yij: مقدار مشاهده‌شده؛

μ: میانگین کل؛

Ti: اثر گروه آزمایشی؛

Eij: خطای تصادفی.

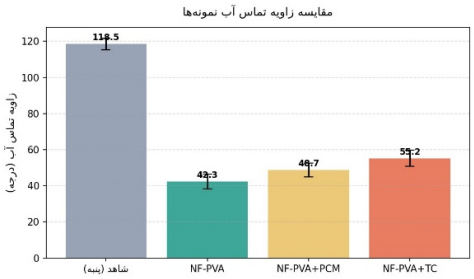
با معنادارشدن آزمون، آزمون تعقیبی توکی برای مقایسه زوجی گروه‌ها استفاده شده است. سطح معناداری برابر با 05/0 در نظر گرفته شده است.

5. یافته های تحقیق

زاویه تماس آب

بر اساس داده‌ها، گروه ***NF–PVA*** نسبت به نمونه شاهد کاهش 64/3 درصدی در زاویه تماس نشان داد:

این کاهش می‌تواند نشان‌دهنده افزایش ترشوندگی سطح نانوالیافی باشد. افزودن ماده تغییر فاز و پوشش ترموکرومیک موجب افزایش جزئی زاویه تماس شد، اما هر دو نمونه همچنان نسبت به پارچه شاهد آب‌دوست‌تر بودند. شکل1 نشان می‌دهد که نمونه‌های نانوالیافی نسبت به نمونه شاهد پنبه‌ای، زاویه تماس آب پایین‌تری دارند و در نتیجه آب‌دوستی و ترشوندگی سطحی بیشتری از خود نشان می‌دهند. در میان نمونه‌ها، ***NF-PVA*** کمترین زاویه تماس را داشته و بهترین عملکرد را در مدیریت رطوبت ارائه کرده است. افزودن ***PCM*** و ماده ترموکرومیک نیز همچنان موجب حفظ ترشوندگی مناسب شده، هرچند اندکی زاویه تماس را افزایش داده است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که اصلاح ساختار سطحی و ترکیب آن با مواد پاسخگو می‌تواند به بهبود عملکرد پوشاک در دفع و انتقال رطوبت کمک کند.

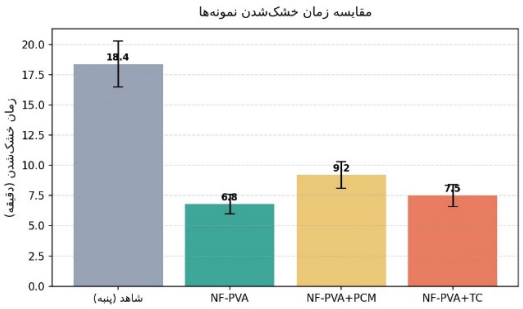


شکل1. مقایسه میانگین زاویه تماس آب در نمونه شاهد پنبه‌ای و ساختارهای نانوالیافی پاسخگو

زمان خشک‌شدن

در این داده‌ها، نمونه ***NF–PVA*** سریع‌ترین خشک‌شدن را داشت. حضور ماده تغییر فاز زمان خشک‌شدن را افزایش داد که می‌تواند به حفظ نسبی رطوبت در ساختار میانی و افزایش ظرفیت حرارتی نمونه مربوط باشد. نتایج حاصل از ارزیابی زمان خشک‌شدن (شکل 2) نشان‌دهنده برتری محسوس تمامی ساختارهای نانوالیافی نسبت به نمونه شاهد پنبه‌ای است. نمونه شاهد با زمان 18/4 دقیقه، طولانی‌ترین زمان خشک‌شدن را به ثبت رسانده است، در حالی که در نمونه نانوالیافی خالص (***NF-PVA***) این زمان با حدود 63٪کاهشبه8/6دقیقه رسیده است. این بهبود چشمگیر را می‌توان به تخلخل بالای شبکه نانوالیافی و نسبت سطح به حجم بسیار زیاد الیاف نسبت داد که مسیرهای بهینه‌ای را برای تبخیر سریع رطوبت فراهم می‌کنند.

با افزودن مواد پاسخگو به ساختار، زمان خشک‌شدن در ***نمونه‌های-NF PVA+PCM*** و ***NF-PVA+TC*** به‌ترتیب به 9/2 و 7/5 دقیقه افزایشیافت. اگرچه حضور ریزکپسول‌های ***PCM*** و رنگدانه‌های ترموکرومیک به دلیل پر کردن بخشی از فضاهای خالی بین‌الیافی و تغییر در ویژگی‌های سطحی، سرعت تبخیر را نسبت به نانوالیاف خالص اندکی کاهش داده است، اما همچنان هر دو نمونه عملکردی بسیار مطلوب‌تر (به‌طور میانگین 50 تا 60 درصد سریع‌تر) از نمونه شاهد پنبه‌ای نشان می‌دهند.

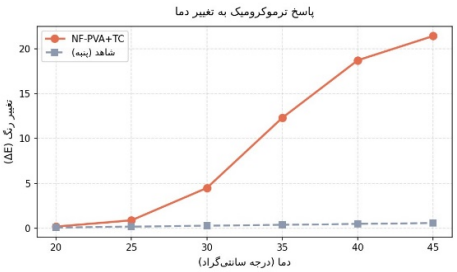


شکل 2. مقایسه زمان خشک‌شدن (***Drying Time***) نمونه شاهد و ساختارهای نانوالیافی

پاسخ ترموکرومیک

از دمای 30 درجه سانتی‌گراد به بعد، افزایش قابل‌توجهی در شاخص اختلاف رنگ نمونه ترموکرومیک مشاهده شد. در دمای 45 درجه، مقدار ΔEنسبت به دمای 20 درجه، 21/2 واحد افزایشیافت. این الگو نشان می‌دهد که نمونه می‌تواند در بازه دمایی فعالیت ورزشی، بازخورد دیداری ایجاد کند.تحلیل رفتار نوری نمونه‌ها در برابر تغییرات دما (شکل 3) نشان‌دهنده عملکرد هوشمند و پاسخگوی نمونه نانوالیافی حاوی مواد ترموکرومیک است. در حالی که نمونه شاهد پنبه‌ای در بازه دمایی 20 تا 45 درجه سانتی‌گراد هیچ تغییر رنگ معناداری نشان نداده است***ΔE<1***، نمونه ***NF-PVA+TC***یک رفتار غیرخطی و حساس به دما را به نمایش گذاشته است.

مطابق نمودار، در دماهای پایین (20 تا 25 درجه)، میزان تغییر رنگ بسیار ناچیز است. اما با عبور از دمای 30 درجه سانتی‌گراد، شیب نمودار به‌شدت افزایش‌یافته و در دمای 45 درجه به مقدار بیشینه 21/4 می‌رسد. نقطه عطف این تغییرات در محدوده 30 تا 35 درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که با دمای فیزیولوژیک سطح پوست در هنگام فعالیت ورزشی مطابقت دارد. این تغییر رنگ شدید (رسیدن به $\Delta E=12.3$ در 35 درجه) نشان می‌دهد که منسوج طراحی‌شده به‌خوبی می‌تواند تغییرات وضعیت حرارتی بدن ورزشکار را به یک سیگنال دیداری واضح تبدیل کند.



شکل 3. ارزیابی پاسخ ترموکرومیک ساختار نانوالیافی در مقایسه با نمونه شاهد

نفوذپذیری هوا و مقاومت حرارتی

نمونه ***NF–PVA*** بیشترین نفوذپذیری هوا را داشت. در مقابل، نمونه ***NF–PVA+PCM*** بیشترین مقاومت حرارتی را نشان داد. این تفاوت با نقش

$$\frac{55.6 - 42.1}{42.1} \times 100 = 32.1\%$$

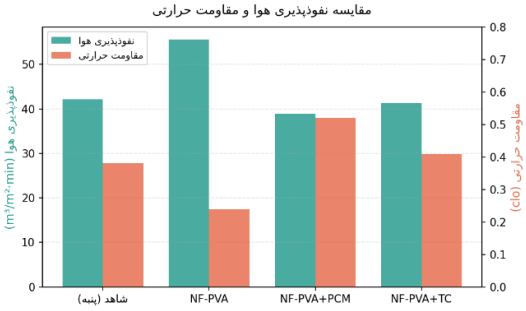
شده در بین نمونه‌ها تغییر مشابه سختی نوالیافی و مواد پوشش بر ویژگی‌های انتقال حرارت و جرم منسوج است:

1.نفوذپذیری هوا: نمونه نانوالیافی خالص (***NF-PVA***) با مقدار 55/6، بالاترین میزان نفوذپذیری هوا را به ثبت رسانده است که نسبت به شاهد پنبه‌ای حدود 32٪افزایش نشان می‌دهد. این امر به دلیل وجود تخل

$$\frac{0.52 - 0.38}{0.38} \times 100 = 36.8\%$$

تسهیل می‌کند. با افزودن مواد عملکردی (***PCM***) نفوذپذیری هوا کاهش یافته است. بیشترین کاهش در نمونه حاوی ماده تغییر فاز (***NF-PVA+PCM***) مشاهده می‌شود که به دلیل اشغال فضاهای بین‌الیافی توسط ریزکپسول‌های ***PCM*** است.

2. مقاومت حرارتی: در حالی که نانوالیاف خالص کمترین مقاومت حرارتی (0/24 کلو) را به دلیل ضخامت کم و تخلخل بالا نشان می‌دهند، افزودن مواد پاسخگو منجر به ارتقای این شاخص شده است. نمونه ***NF-PVA+PCM*** با رسیدن به مقدار 0/52 کلو، بیشترین مقاومت حرارتی را نشان داد (حدود 36/8٪ بیشتر از شاهد). اینیافته تأیید می‌کند که حضور ***PCM*** در ساختار، توانایی منسوج را در مدیریت جریان گرما و ایجاد سد حرارتی به شکل معناداری بهبود بخشیده است.



شکل 4. ارزیابی هم‌زمان نفوذپذیری هوا و مقاومت حرارتی در نمونه‌های مختلف

تحلیل کمی

بر اساس داده‌ها، بیشترین بهبود در مدیریت رطوبت مربوط به نمونه ***NF–PVA*** بود. این نمونه در مقایسه با شاهد:

- زاویه تماس را حدود 64/3 درصد کاهش داد؛
- زمان خشک‌شدن را حدود 63 درصد کاهش داد؛
- نفوذپذیری هوا را حدود 32/1 درصد افزایش داد.

محاسبه افزایش نفوذپذیری هوا

نمونه NF–PVA+PCM اگرچه نسبت به NF–PVA نفوذپذیری کمتری داشت، مقاومت حرارتی آن حدود 36/8 درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن ماده تغییر فاز ممکن است میان مدیریت رطوبت و عایق‌کاری حرارتی نوعی مصالحه عملکردی ایجاد کند.

تحلیل کیفی

از نظر کاربرد طراحی، عملکرد گروه‌ها را می‌توان به شکل زیر تفسیر کرد:

نمونه شاهد

پارچه پنبه‌ای قابلیت جذب رطوبت دارد، اما خشک‌شدن آن کندتر است. بنابراین، برای فعالیت‌های ورزشی شدید ممکن است احساس رطوبت و سنگینی ایجاد کند.

نمونه *NF–PVA*

این نمونه از نظر انتقال رطوبت و خشک‌شدن عملکرد مطلوبی دارد و می‌تواند به‌عنوان لایه داخلی لباس استفاده شود. آب‌دوستی بالا، سطح تماس مؤثر و ساختار متخلخل از عوامل احتمالی عملکرد آن هستند.

نمونه *NF–PVA+PCM*

The corresponding authors:

ماده تغییر فاز مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد و می‌تواند برای فعالیت‌هایی که در آن‌ها تنظیم دما اهمیت دارد مناسب باشد. بااین‌حال، باید اثر آن بر وزن، ضخامت، انعطاف‌پذیری و قابلیت شست‌وشوی لباس بررسی شود.

نمونه *NF–PVA+TC*

پوشش ترموکرومیک قابلیت ارائه بازخورد بصری درباره افزایش دما را دارد. این ویژگی می‌تواند برای طراحی لباس‌هایی به‌کار رود که وضعیت حرارتیبدن یا محیط را به کاربر نشان می‌دهند. بااین‌حال، دوام تغییر رنگ، ثبات شست‌وشویی و احتمال تحریک پوستی باید ارزیابی شود.

6. بحث و نتیجه گیری:

پژوهش حاضر با هدف غلبه بر محدودیت‌های ذاتی منسوجات تک‌عملکردی از طریق تلفیق هدفمند نانوالیاف الکتروریسی‌شده پلی‌وینیل الکل(***PVA***) ، میکروکپسول‌های ماده تغییر فاز دهنده (***PCM***) و رنگزاهای پاسخگوی ترموکرومیک (***TC***) در قالب یک ساختار لایه‌ای انجام پذیرفت. تحلیل جامع داده‌ها حاکی از آن است که هم‌افزایی هم‌زمان این مؤلفه‌ها توانسته است توازن بهینه‌ای میان انتقال جرم (رطوبت و بخار)، تنظیم بار حرارتی نهان و بازخورد بینایی بلادرنگ از وضعیت فیزیولوژیک ورزشکار برقرار سازد. در ادامه، سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر اینرفتارها و هم‌پوشانی آن‌ها با یافته‌های پیشین به‌تفکیک تبیین شده‌اند.

1.سازوکار رفتار ترشوندگی و دینامیک تبخیر سطحی

کاهش معنی‌دار زاویه تماس قطره آب از 118/5° درنمونهشاهدپنبه‌ای به 42/3° درنانوالیاف خالص ***PVA*** (کاهش **64/3** درصدی)، به‌طور مستقیم به دو عامل ساختاری و شیمیایی نسبت داده می‌شود: نخست، حضور متراکم گروه‌های عاملی هیدروکسیل (***-OH***) در زنجیره‌های جانبی پلی‌وینیل الکل که پتانسیل تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب را به‌شدت افزایش داده و انرژی آزاد سطحی منسوج را ارتقا می‌دهد؛ دوم، ساختار فوق‌العاده متخلخل و زیرمیکرونی شبکه نانوالیاف که طبق تئوری ونزل(***Wenzel Model***) ، زبری نانومقیاس را افزایش داده و در بسترهایذاتاً آب‌دوست، موجب انتشار سریع مویینگی مایع در جهت صفحه‌ای (***In-plane wicking***)می‌گردد[13]. این ترشوندگی فوق‌سریع به‌طور مستقیم بر سینتیک تبخیر منعکس شده است؛ به‌طوری‌که زمان خشک‌شدن از 18/4دقیقه در پارچه شاهد به تنها 6/8 دقیقه در نانوالیاف خالص تقلیلیافته است (کاهش 63 درصدی). بر خلاف الیاف پنبه که رطوبت را درون ساختار حجمی و لومن خود به دام انداخته و تبخیر آن را کند می‌سازند، نانوالیاف به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا (***High surface-area-to-volume ratio***، آب را در لایه‌ای فوق‌العاده نازک و گسترده در سطح پخش می‌کنند[14]. این پدیده ضخامت لایه مرزی بخار را به حداقل رسانده و نرخ تبخیر سطحی را به بیشترین مقدار می‌رساند. اگرچه افزودن میکروکپسول‌های ***PCM*** و پوشش ترموکرومیک زاویه تماس را اندکی افزایش داد (**48/7°** و**55/2°**) وزمان خشک شدن را به **9/2** و **7/5** دقیقه رساند، اما ساختار همچنان برتری قاطعی نسبت به بستر سنتی پنبه حفظ نمود. این افزایش نسبی زاویه تماس به‌دلیل پوشیده شدن جزئی برخی از حفرات زیرمیکرونی و حضور پوسته پلیمری هیدروفوب کپسول‌ها بر سطح نانوالیاف است، اما از آنجا که ساختار سه بعدی تخلخل مسدود نشده، مسیرهای مویینگی همچنان انتقال رطوبت را تضمین می‌نمایند[15].از منظر فیزیولوژی ورزشی، این رفتار مانع از اشباع منسوج از عرق و چسبندگی آن به پوست شده و از ایجاد شوک سرمایشی پس از ورزش(***Post-exercise chill***) جلوگیری می‌کند[16].

2. موازنه مقاومت حرارتی و تنفس‌پذیری (تحلیل***Trade-off***)

یکی از چالش‌های بنیادین در طراحی منسوجات ورزشی، برقراری تعادل میان عایق‌سازی حرارتی و نفوذپذیری هوا (تنفس‌پذیری) است. نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق نانوالیاف با ماده تغییر فاز دهنده(***NF–PCM***) مقاومت حرارتی را با 36/8 درصد افزایش از**clo38** به **clo 52** رسانده است. این ارتقاء چشمگیر، ناشی از دو پدیده هم‌افزا است: نخست، به دام افتادن میکروهوای ساکن درون شبکه درهم‌تنیده نانوالیاف که اتلاف حرارت از طریق رسانش و همرفت را محدود می‌کند؛ و دوم، رفتار ترمودینامیکی فاز گذار پارافینی درون کپسول‌ها که در هنگام افزایشدمای بدن گرمای مازاد را به‌صورت گرمای نهان جذب کرده و یک بافر پایدار دمایی میان سطح پوست و محیط ایجادمی‌نماید[17]. بااین‌حال، افزودن این ذرات ناگزیر با کاهش نفوذپذیری هوا همراه بوده است. در نمونه نانوالیاف خالص، عبور هوا به‌دلیل وجود حفرات باز به 55/6 متر مکعب در متر مربع بر دقیقه (***$m^3/m^2/min$***)رسید (32/1 درصد بیشتر از پنبه)، اما در نمونه دارای ***PCM*** به‌دلیل مسدود شدن موضعی گلوگاه‌های منفذی توسط میکروکپسول‌ها، مقاومت در برابر عبور گاز افزایشیافت. این نتیجه منطبق بر یافته‌های پژوهشگران پیشین[18] است که بیان کرده‌اند جای‌گیری ذرات عملکردی در فضاهای بین‌رشته‌ای نانوالیاف منجر به افت تخلخل مؤثر می‌گردد. بنابراین، هنر طراحی در این است که میزان بارگذاری ***PCM*** در حد آستانه‌ای کالیبره شود که ظرفیت ذخیره آنتالپی بالا بدون خفه کردن جریان هوای تنفسی محقق گردد؛ زیرا افت بیش از حد نفوذپذیری، جریان تبخیر عرق را سرکوب کرده و اثرات مثبت سرمایش تبخیری نانوالیاف را خنثی می‌سازد[19].

3.دینامیک فوتوترمال و پاسخگویی سنسورهای ترموکرومیک

رفتار نوری نمونه ***NF–TC*** تأیید کرد که سیستم ترموکرومیکیک پاسخ غیرخطی و دقیق به گرما ارائه می‌دهد. در بازه دمایی کمتر از 30

درجه سانتی‌گراد، میزان اختلاف رنگ نامحسوس بود (***ΔE<1/5***)، اما با عبور از آستانه بحرانی 30 درجه سانتی‌گراد، شاخص ΔE جهش شدیدیافت و در 45 درجه سانتی‌گراد به مقدار بیشینه 21/4 رسید. تغییر رنگ در رنگزاهای بر پایه لوکودای(***Leuco-dye***) ، ناشی از سازوکار باز شدن حلقه لاکتون و تبدیل آن به فرم زوئیتریون در ساختار مولکولی است که تحت تأثیر ذوب شدن حلال کو-کریستال در دمای از پیش تعیین‌شده رخ می‌دهد[20]. قرارگیری ناحیه عطف این تغییر فاز در محدوده دمایی 30 تا 37 درجه سانتی‌گراد، ارزش کاربردی منحصربه‌فردی به این معماری می‌بخشد؛ چراکه این پنجره حرارتی دقیقاً منطبق بر دمای فیزیولوژیک سطح پوست انسان حین فعالیت‌های بدنی با شدت بالا است. ازاین‌رو، پارچه قادر است بدون نیاز به هرگونه منبع تغذیهالکترونیکی، باتریبا حسگرهای سیمی سنگین، هشداری دیداری (***Passive Visual Alert***) از تجمع حرارت در نواحی با تعریق و دمای بالا فراهم کند[21]. البته همان‌گونه که در مبانی تئوریک مطرح است، باید این تمایز فیزیولوژیک در نظر گرفته شود که دمای اندازه‌گیری‌شده توسط منسوج، دمای ریزاقلیم سطحی پوست (***Skin temperature***) است و نباید مستقیماً با دمای عمقی بدن (***Core temperature***) یکسان فرض شود؛ با این حال، تغییر دمای سطحی همچنان یکی از قوی‌ترینهمبستگی‌ها را با شروع استرس حرارتی و خستگی ناشی از گرما در ورزشکاران دارد[22].

4. طراحی عملکردی چندمعیاره و دیدگاه هم‌افزا

مقایسه کلی الگوها اثبات می‌کند که هیچ‌یک از لایه‌هایا افزودنی‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند پاسخگوی نیازهای پیچیده بدن حین ورزش باشند. رویکردهای سنتی نساجی غالباً بر بیشینه‌سازییک صفت منفرد (مانند نفوذپذیری مطلق یا عایق‌بندی صرف) تمرکز داشتند، درحالی‌که ساختار چندلایه پیشنهادی در این پژوهش بر پایه مفهوم «مهندسی چندمعیاره» عمل می‌کند: لایه زیرین نانوالیاف آب‌دوست، بلافاصله عرق مایع را از پوست کشیده و به طرفین پخش می‌کند[23]. لایه میانی حاوی***PCM*** ، پیک‌های حرارتی ناشی از فعالیت انفجاری عضلانیرا جذب و دمای پوست را در محدوده راحتی تثبیت می‌نماید. لایه سطحی ترموکرومیک، به عنوان یک رابط تعاملی انسان-منسوج، وضعیت بحرانی حرارتی را گزارش می‌دهد[24]. این ترکیب سه‌گانه نشان می‌دهد که از دست رفتن جزئی نفوذپذیری هوا در حضور ***PCM*** با افزایش چشمگیر سرعت تبخیر سطحی نانوالیاف جبران می‌شود و ساختار یک تعادل دینامیکی به دست می‌آورد[25].

5. محدودیت‌های پژوهش و افق‌های آینده

با وجود دستیابی به این هم‌افزایی کارکردی، پیاده‌سازی صنعتی این فناوری با چالش‌های معینی روبروست که نیازمند توجه در پژوهش‌های آتی است: پایداری شستشویی و مکانیکی: اتصال میکروکپسول‌های ***PCM*** و پوشش ترموکرومیک بر بستر نانوالیاف، تحت تنش‌های برشی حاصل از چرخه‌های مکرر شستشو (***Laundering***) و سایش بدنی ممکن است دچار زوال شود. به‌کارگیری روش‌های پیوند عرضی (***Cross-linking***) یا الکتروریسی هم‌محور (***Coaxial electrospinning***) برای کپسوله‌کردن در هسته الیاف می‌تواند راهکاری مؤثر باشد[26].

بررسی در شرایط دینامیک و میدانی: ارزیابی‌های حاضر در شرایط ایستا و کنترل‌شده آزمایشگاهی صورت گرفته‌اند. شبیه‌سازی با مانکن‌های تعریق‌کننده حرارتی (***Thermal Sweating Manikin***) و آزمون‌های میدانی بر روی ورزشکاران در اقلیم‌های گوناگون جهت اعتبارسنجی قابلیت تنفس در شرایط واقعی ضروری است

این مقاله یک چارچوب پژوهشی برای طراحی لباس ورزشی هوشمند مبتنی بر نانوالیاف پاسخگو به محرک‌های محیطی ارائه کرد و نشان داد که می‌توان با ترکیب هدفمند اجزای عملکردی مختلف، به ساختاری چندلایه و هم‌افزا دست یافت. بر اساس نتایج، نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل با ایجاد سطحی آب‌دوست و متخلخل، توانستند ترشوندگی سطح را بهبود دهند و در عین حال زمان خشک‌شدن را به‌طور محسوسی کاهش دهند؛ این ویژگی برای لباس‌های ورزشی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا موجب انتقال سریع‌تر رطوبت، کاهش چسبندگی به پوست و افزایش آسایش کاربر در حین فعالیت بدنی می‌شود. در کنار آن، به‌کارگیری ماده تغییر فاز این امکان را فراهم کرد که بخشی از انرژی گرمایی بدن به‌صورت کنترل‌شده جذب یا آزاد شود و در نتیجه، مقاومت حرارتی و پایداری دمایی سامانه افزایشیابد. همچنین پوشش ترموکرومیک به‌عنوان یک لایه پاسخگو، تغییرات دماییرا به یک سیگنال دیداری تبدیل کرد و به منسوج قابلیت بازخورد عملکردی داد؛ قابلیتی که می‌تواند در پایش شرایط حرارتی بدن و آگاهی کاربر از وضعیت لباس نقش مکمل داشته باشد. در مجموع، هم‌زمانی این سه کارکرد نشان می‌دهد که معماری پیشنهادی ظرفیت آن را دارد که از یکمنسوج منفعل به یک سامانه پوشیدنی هوشمند تبدیل شود که هم‌زمان رطوبت، گرما و بازخورد دیداری را مدیریت می‌کند.

با وجود این، باید تأکید کرد که یافته‌های کنونی در وضعیت فعلی صرفاً حاصل و تولید داده‌ها هستند و هنوز در سطح نتایج تجربی قابل انتشار قرار ندارند. برای تبدیل این پیش‌نویس به یک مقاله واقعی و قابل استناد، لازم است نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شوند، آزمون‌های استاندارد با ابزارهای معتبر انجام گیرد، داده‌های خام به‌صورت دقیق ثبت شوند و تحلیل آماری مناسب برای بررسی معنی‌داری تفاوت‌ها صورت پذیرد. همچنین اعداد باید به‌طور کامل با داده‌های واقعی جایگزین شوند تا نتایج مقاله بر پایه شواهد تجربی و قابل دفاع علمی شکل بگیرد.

7. منابع:

[1] M. P. S.Ferreira, A. S.Gonçalves, J. C.Antunes, J. Bessa,F.Cunha, R. Fangueiro. Fibrous structures: An overview of their responsiveness to external stimuli towards

The corresponding authors:
Email: mnekofard@yahoo.com
Tel: 09151634417

[14] B. Zhang,X. Li, Y. Lin, N. Cheng, W. Jiao, X.Wang, J. Yu, B. Ding. Optimization of bio-based polyurethane elastic nanofibrous membrane via electrospinning for waterproof and breathable applications, *Polymers* 17(4) (2025) https://doi.org/10.3390/polym17040486

[15] B. Khan, R. T. Khalid, U. Amara, N. Imdad,M. H. Masrur,M. Awais,A. Q.Laghari, B. Khan,M. Elgendi, B. L.Khoo, S. Abdullah. Electrospun nanofibers for wearable cardiovascular health monitoring,*Journal of Science and Medicine* 12 (2025) https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.101030

[16] M. T. Islam,M. I. Hosen,T. Islam, M. A.Al Mamun, T. Islam. Advancements in functional smart and wearable textiles for sportswear applications,*RSC Advances* 15(58) (2025) https://doi.org/10.1039/d5ra07231j

[17] A. G. Hassabo,M. Bakr,M.Zayed, H. A. Othman. Chromic dyes for SMART textile: A review,*Letters in Applied NanoBioScience* 12(4) (2023) https://doi.org/10.33263/LIANBS124.161

[18] A. Filimon,D.Serbezeanu, D. Rusu, A. Bargan, L. Lupa. Design of high-performance electrospun membranes for protective clothing applications, *Membranes* 14(11) (2024) https://doi.org/10.3390/membranes14110244

[19] G. Yan,Y. Hu,M. Liu,F.Huang,J. Miu, G. Huang. Application of electrospun nanofiber membranes in outdoor sportswear: From preparation technologies to multifunctional integration,*Coatings* 16(1) (2026) https://doi.org/10.3390/coatings16010029

[20] B.Mondal, S. M. S. Shahriar,S. M. Andrabi, J. Xie. Polymer microfibers: Fabrication, structural design, functionalization, and biomedical applications,*International Journal of Extreme Manufacturing* (20) (2026) https://doi.org/10.1088/2631-7990/ae0a90

[21] L. A. Mercante,K. B. R. Teodoro,D. M. dosSantos,F. V. dosSantos, C. A. S. Ballesteros,T. Ju,G. R.Williams, D. S. Correa. Recent progress in stimuli-responsive antimicrobial electrospun nanofibers, *Polymers* 15(21) (2023) https://doi.org/10.3390/polym15214299

[22] Z.Xu, J. Deng, Y. Lai. Stimuli-responsive biomedical polymeric films for tissue regeneration, *Microstructures* 5 (2025) https://doi.org/10.20517/microstructures.2024.139

[23] A. Wang, R. Pan,J. Miao,Y. Lin,Y.Deng,S.Peng, X.Luo, P. Wu,S.Zhang, Y.Wu, J. Xie, T. Fan. Applications of advanced electrospun nanofibrous materials in water treatment, *Nanomaterials* 15 (18) (2025) . https://doi.org/10.3390/nano15181424

[24] A. Setianingsih,K.Ulfitri,M. A. E. Hafizah. Application of nanofibers from electrospinning in development of smart textiles for military clothing,*Lamintang Journal of Textile and Applied Science* 7(2) (2025) https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0702.780

[25] E.Merati, S. M. Tabatabaei. Application of smart fabrics in the future of the clothing industry,*Paya Shahr Specialized Scientific Monthly* 89 (1) (2026) http://payashahr.ir

[26] M. R. Y. McCord,R. Abidnejad,H.Baniassadi, Z. Fathi, M. Fazeli, Lipponen, J., Koivisto, J., Zimmerman, J. B., E. Kontturi, A. Seppälä, M. Alava. From structure to multifunctional performance: Fibrous cellulose for advancing intended application, *Materials* 17 (11) (2024) https://doi.org/10.3390/ma17112636

[2] M. Enyan,Z. Bing, M. F. Agyemang. Advances in smart materials soft actuators on mechanisms, fabrication, materials, and multifaceted applications: A review, *SAGE Journals*38(1)(2024) https://doi.org/10.1177/08927057241248028

[3] B. K. Dejene,R. K.Seidu, M. A. Abtew. Recent advances in 3D printed smart and multifunctional textile materials: Processing, properties, and their applications,*Reactive and Functional* Polymers 204 (2026) https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2026.106288

[4] G. Nunziata,D.Pollonio, E. Lacroce,F. Rossi. Smart pH-responsive polymers in biomedical applications: Nanoparticles, hydrogels, and emerging hybrid platforms, *Materials Today Chemistry* 42 (2025) https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2025.103063

[5] J. Li,X. Liu, J. Xi,L.Deng, Y.Yang, X. Li, H. Sun. Recent development of polymer nanofibers in the field of optical sensing,*Polymers*15 (17) (2023) https://doi.org/10.3390/polym15173616

[6] J. Wang,C. You,Y. Xu, T. Xie, Y. Wang. Research advances in electrospun nanofiber membranes for non-invasive medical applications, *Micromachines*15 (10) (2024) 1226. https://doi.org/10.3390/mi15101226

[7] Q. Lu,X. Wang, X. Zhao,Z. Bi, H. Li, Y. Liu. Recent advances in reversible thermochromic materials for smart textiles: A review, *Materials* 19(4) (2026) https://doi.org/10.3390/ma19040742

[8] A. Babapoor,Z. Dehghan Khaje Bolagh,M. Ganjkhani,M. Paar. An insight into the energy optimization in new generation clothes using phase change materials,*Scientific Quarterly of Renewable and New Energies* 8(1) (2021)

[9] J. Tian, J. Zhang,Y. Zhang, J. Liu, Y. Hu,C. Liu, P.Zhu, L. Lu, Y. Mao. Recent advances in electrospun nanofiber-based self-powered triboelectric sensors for contact and non-contact sensing,*Nanomaterials* 15 (14) (2025) https://doi.org/10.3390/nano15141080

[10] S. Kyuchyuk, D. Paneva,N.Manolova, I. Rashkov. Core-sheath fibers via single-nozzle spinneret electrospinning of emulsions and homogeneous blend solutions, *Materials* 17(21) (2024) https://doi.org/10.3390/ma17215379

[11] S.Varnaitė-Žuravliova, Ž. Rukuižienė, V. Skurkytė-Papievienė,P. Bekampienė,V. Trakšelytė,J.Baltušnikaitė-Guzaitienė. Biocompatible electrospun biomaterials for advancing thermoregulating wearable sensors in next-generation smart textiles,*Journal of Functional Biomaterials* 17(2) (2026) https://doi.org/10.3390/jfb17020100

[12] Zhu, L., Zhang, W., Luan, S., Wei, J., Yang, Y., & Miao, J. (2025). Nanomaterials for smart wearable fibers and textiles: A critical review. IScience. 28(8), 113126. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113126

[13] M. Zahid,H.Rathore, A.H. Tayyab, Z. A.Rehan, I. A. Rashid, M. Lodhi,U. Zubair, I. Shahid. Recent developments in textile based polymeric smart sensor for human health monitoring: A review,*Journal of Advanced Research*, 31 (2021) https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.103480

phase change materials,*Renewable and Sustainable Energy Reviews* 229 (2026) https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116612

جداول تکمیلی

جدول 1. زاویه تماس آب در گروه‌های مختلف

گروه	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار	تفسیر
شاهد پنبه‌ای	118/5	3/2	آب‌گریزی نسبی
NF–PVA	42/3	4/1	آب‌دوستی بالا
NF–PVA+PCM	48/7	3/8	آب‌دوستی مطلوب
NF–PVA+TC	55/2	4/5	آب‌دوستی متوسط

جدول 2. زمان خشک‌شدن نمونه‌ها

گروه	میانگین زمان خشک‌شدن، دقیقه	انحراف معیار	تغییر نسبت به شاهد
شاهد پنبه‌ای	18/4	1/9	—
NF–PVA	6/8	0/8	٪63/0 کاهش
NF–PVA+PCM	9/2	1/1	٪50/0 کاهش
NF–PVA+TC	7/5	0/9	٪59/2 کاهش

جدول 3. تغییر رنگ نمونه ترموکرومیک در دماهای مختلف

دما، °C	ΔE در نمونه *NF–PVA+TC*	*ΔE* در نمونه شاهد
20	0/2	0/1
25	0/9	0/2
30	4/5	0/3
35	12/3	0/4
40	18/7	0/5
45	21/4	0/6

جدول 4. شاخص‌های آسایش حرارتی

گروه	نفوذپذیری هوا، $M^3 / m^2 . min$	مقاومت حرارتی، *clo*
شاهد پنبه‌ای	42/1	0/38
NF–PVA	55/6	0/24
NF–PVA+PCM	38/9	0/52
NF–PVA+TC	41/3	0/41

The corresponding authors:
Email: *mnekofard@yahoo.com*
Tel: 09151634417