Journal of Health and Safety at Work 2024; 14(3): 661-691

REVIEW PAPER

# A Systematic Review on the Improvement of Thermoregulating Properties of Cotton Fabrics with Nanocapsules of Phase Change Materials

***Elnaz Rahimi*** [1], ***Azam Biabani*** [1], ***Maryam Ghaljahi*** [1,2], ***Farideh Golbabaei*** [1,*]

[1]*Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2]*Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran*

Received: 23 - 5 - 2024 Accepted: 16 - 9 - 2024

## ABSTRACT

**Introduction:** Workers who work in warm situations need clothes with better thermal regulation. Nowadays, improving the thermal regulation properties of cotton fabric by treating it with phase change materials (PCMs) has been considered. The type of fabric plays an important role in providing thermal comfort. Cotton fabric is the most popular raw material in the textile industry due to its distinctive features. Therefore, this systematic review aims to investigate the effects of PCM nanoencapsulation in commonly used cotton fabrics, including morphology, thermal properties, thermal stability, tensile strength, abrasion resistance, leakage, water absorption, washing ability, and breathability of the fabric, related challenges, and future research trends.

**Material and Methods:** This research was conducted with the papers obtained from the systematic search in Science Direct, Web of Sciences, Scopus, and PubMed databases. Keywords "nanoencapsulated phase change materials", "nanoenhanced phase change materials", "cotton", "cotton fabric", and "cotton textiles" were used.

**Results:** Of the 1251 studies identified through search databases, 13 were selected according to the entry criteria. The results revealed that in all the studies, PCM nanocapsules were successfully synthesized and inserted into the cotton fabric, improving the fabric's thermal properties. Most studies used in situ polymerization and mini-emulsion polymerization for nanoencapsulation. The pad-dry-cure method was also widely used for applying nanocapsules to cotton fabric.

**Conclusion:** This systematic review showed that synthesized nanocapsules of phase change materials and applied them to cotton fabric can improve the thermoregulating properties of the fabric. It is suggested to expand the research to design thermoregulating clothes made from treated fabrics and investigate their cooling performance.

**Keywords:** *Nanoencapsulation, Phase change materials, Cotton fabric, Smart textiles, Heat stress.*

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*Rahimi E., Biabani A., Ghaljahi M., Golbabaei F. A Systematic Review on the Improvement of Thermoregulating Properties of Cotton Fabrics with Nanocapsules of Phase Change Materials. J Health Saf Work. 2024; 14(3): 661-691.*

## 1. INTRODUCTION

Climate change and global warming are intensifying in recent years, and hot weather causes a high incidence of summer heat stroke. Working in intense heat leads to occupational diseases and injuries, including heat stress, heat exhaustion, heat cramps, and heat rash. Some factors affect the level of comfort of people in hot environments, such as temperature, humidity, radiation, airflow speed, air pressure, type of clothing, and intensity of metabolic activity. Heat stress is the total heat load on the body, which is caused by the accumulation of body heat acquired during work and clothing

* Corresponding Author Email: *fgolbabaei@tums.ac.ir*

Copyright © 2024 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

constraints. The hazard of heat stress is high in foundries, steel mills, bakeries, smelters, glass factories, furnaces, and outdoor environments, including the construction and operation of oil and gas wells. Construction workers, farmers, and other farmworkers commonly work in hot and humid situations, and hard physical work can exacerbate heat stress. Working in such situations is unpleasant and dangerous for individuals and has a negative impact on their performance and work efficiency.

In hot environments, clothing can comfort the wearer and play an insulating role, creating a barrier between the skin and the environment. Workers who work in warm situations need clothes with better thermal regulation. Clothing can prevent evaporative and convective cooling of the body and disturb the maintenance of cellular homeostasis during work and exercise. By wearing clothes, a microclimate is created between the skin and the clothes, which, depending on the environmental conditions, is usually warmer and more humid than the environment. Usually, a microclimate temperature of 28–30 °C is needed to keep the thermal balance at rest. Body heat is dissipated in four ways: conduction, convection, radiation, and evaporation, among which the evaporation of sweat plays a decisive role in cooling the body.

Fanger first defined the comfort of clothing. Various factors, such as skin temperature and moisture, affect the comfort of clothes. The type of fabric, such as polyester, cotton, wool, and synthetic fibers, has a crucial effect on absorbing moisture and transferring sweat through clothes. Cotton fabric is the most popular raw material in the textile industry due to its distinctive features, such as comfortability, flexibility, water absorption, and breathability.

Although cotton clothing supplies comfort and breathability, it may not be sufficient to protect individuals from extreme heat and maintain body temperature in a thermally neutral state. According to this important point, it has been proposed to improve the thermoregulation property of cotton fabric by treating it with phase change materials (PCMs) as coating agents, e.g., n-hexadecane, n-heptadecane, n-octadecane, and n-icosane. This systematic review study investigates the effects of PCM nanoencapsulation in commonly used cotton fabrics, related challenges, and future research trends.

### *1.1. Phase Change Materials*

Phase change materials (PCMs) can absorb or release stored energy when the material changes from solid to liquid or vice versa. According to Fig. 1, the thermal energy storage system (TES) is divided into three types: sensible heat storage (SHS), latent heat storage (LHS), and thermochemical classification. PCMs are divided into three main types: organic (paraffin and fatty acids), inorganic (salt hydrates and metals), and eutectic. Figure 2

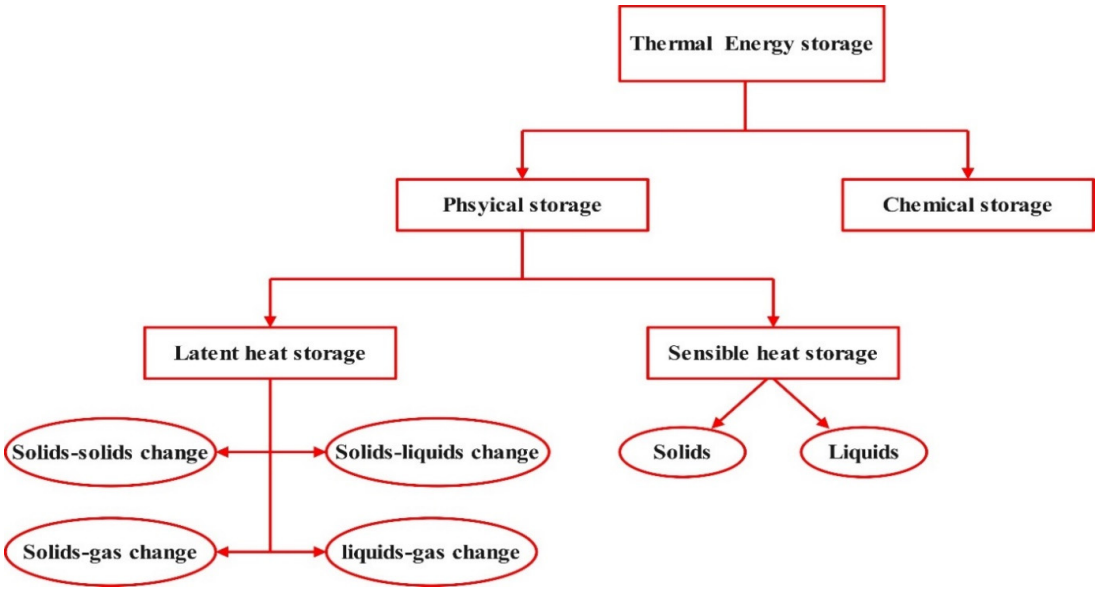



**Fig. 1:** Classification of thermal energy storage systems.

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

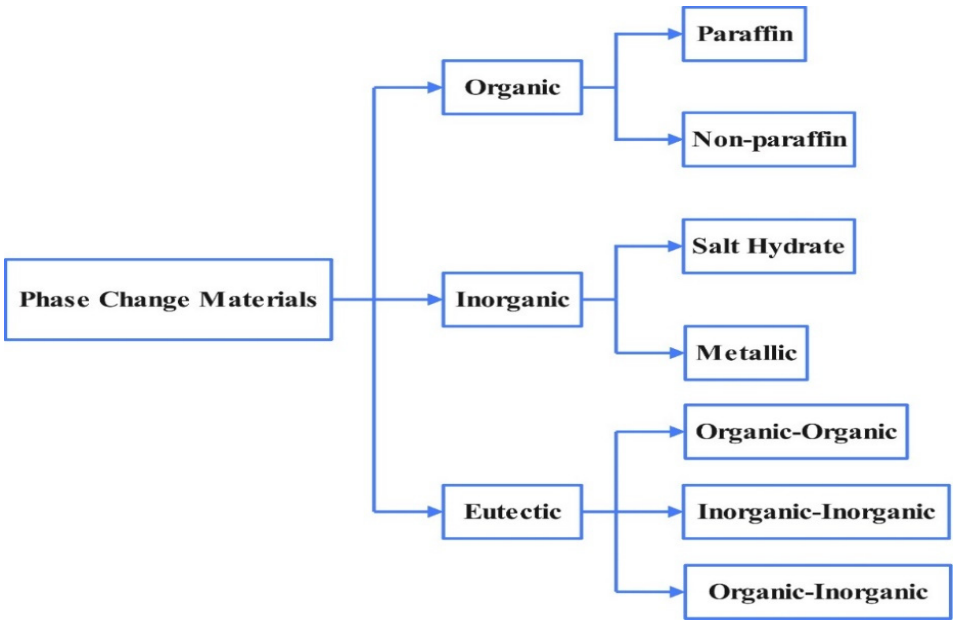



**Fig. 2:** Types of PCM.

shows a diagram of PCM types.

### *1.2. Nanoencapsulation of Phase Change Materials*

Microencapsulation or nanoencapsulation is a process in which PCMs are covered with polymer material. Microcapsules have a diameter between 1 and 1000 micrometers, but nanocapsules are smaller than one micrometer.

### *1.3. Advantage of Nanoencapsulation*

Nanoencapsulated PCMs (NePCMs) have a larger surface-to-volume ratio than microcapsules, accelerating thermodynamic processes with a powerful driving force. NePCMs have a firmer structure than MePCMs (Microencapsulated PCMs) and reduce the supercooling of PCMs. NePCMs have potential applications in textiles, thermoregulating fibers, and fabrics.

### *1.4. Application of nanoencapsulated PCMs in Textiles*

Nowadays, due to the increased surface characteristics of nano-sized particles, the attention of many researchers is focused on nanotechnology, and they have obtained the best results after application to textiles. NePCMs modify different properties of textiles depending on the amount of their loading.

## 2. MATERIAL AND METHODS

This research was conducted with the papers from the systematic search on May 21, 2024, in Science Direct, Web of Sciences, Scopus, and PubMed databases. Keywords "*nanoencapsulated phase change materials*", "*nanoenhanced phase change materials*", "*cotton*", "*cotton fabric*", and "*cotton textiles*" were used.

Entry and exit criteria

The input studies were selected according to the following criteria:

- Original research articles, experimental and laboratory articles that nano encapsulated phase change materials and coated them on cotton fabric.
- English-language articles.

Exclusion criteria included the following.

- Articles with unrelated topics.
- Non-research articles, including review articles, conference papers, books, editorials, authors' notes, and letters to the editor.
- Articles whose full text was not available.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

This study was conducted by reviewing papers that applied NePCMs to improve the thermoregulating properties of cotton fabric. After searching the databases, the articles that met the inclusion criteria were selected, and the information

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]





**Table 1:** A summary of some of the reviewed studies.

| Core material | Shell material | Encapsulation technique | Coating method onto the cotton fabric | Encapsulation efficiency on cotton fabric (wt.%) | Particle size range (nm) | The size of the nanocapsules | Encapsulation ratio (%) | tensile strength (N) | Latent Heat of the fabric (J/g) | Latent Heat of the nanocapsules (J/g) | Melting Temperature of the nanocapsules (°C) | Melting Temperature of the fabric (°C) | Thermal conductivity (W/m•K) | Leakage (%) | Ref. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| polyethylene glycol | urea formaldehyde (UF) | in situ polymerization | pad-dry-cure method | - | 141 nm | - | - | 268.23 ± 0.23 (warp)<br>114.33± 0.35 (Weft) | 0.198 | 17.8 | 41.9 | - | - | - | (93) |
| Paraffin wax | Urea and Formaldehyde (UF polymer) | in situ polymerization | pad-dry-cure method | 20 - 40 | 256 nm | 200–400 nm | 48% | 263.3 ± 0.2<br>282.1 ± 0.1 | 1.52<br>1.91 | 74.2 | 64.3 | 55.2<br>55.45 | - | - | (94) |
| Paraffin (Eicosane and n-octadecane) | melamine formaldehyde (MF) | in situ polymerization | pad-dry-cure method | - | - | 300 to 326 nm | - | - | 12.3 | 144 | 32–33 | - | - | - | (95) |
| Glauber's salt | Polymethyl Methacrylate (PMMA) | Solvent evaporation | pad-dry-cure method | - | - | 500 nm | - | - | 12.3 | 127 | 32.4- 41.1 | - | - | - | (96) |

**Table 2:** Effect of PCM nanocapsules on non-thermal properties of fabri

| Tensile Strength | Abrasion Resistance | Water Absorption | Washing Ability | Breathability | Ref. |
|---|---|---|---|---|---|
| Increase | - | - | Reducing the amount of NePCMs by increasing the number of washes | - | **(54)** |
| - | - | - | Reducing the amount of NePCMs by increasing the number of washes | - | **(84)** |
| Decrease | Increase | Increase | - | - | **(93)** |
| Decrease | Increase | Increase | - | - | **(94)** |
| - | - | - | Reducing the amount of NePCMs by increasing the number of washes | - | **(95)** |
| - | - | - | Reducing the amount of NePCMs by increasing the number of washes | - | **(96)** |
| - | - | - | - | Good (no change compared to untreated fabric) | **(97)** |
| - | - | - | Reducing the amount of NePCMs by increasing the number of washes | - | **(98)** |

was extracted. In the initial search, 1251 articles were added to EndNote. After removing duplicates, 1130 articles remained. Upon reviewing the title and abstract, 1113 articles were removed due to being unrelated. A total of 17 articles were selected for review, of which 2 were excluded due to limited access to the full text. The full text of 15 articles was reviewed. One article was excluded from the study because it was a conference paper, and one was excluded because it was written in Chinese. Finally, the full text of 13 articles was analyzed.

The results revealed that in most studies, in situ polymerization and mini-emulsion polymerization were used for nanoencapsulation. The pad-dry-cure method was also widely used for applying nanocapsules to cotton fabric. A summary of the main information of the reviewed studies is presented in Table 1, and the effect of PCM nanocapsules on the non-thermal properties of the fabric is presented in Table 2. In all the studies, PCM nanocapsules were successfully synthesized and inserted into the cotton fabric, improving the fabric's thermal properties.

## 4. CONCLUSIONS

This systematic review showed that the synthesized nanocapsules had a spherical shape and a core-shell structure and were well applied to the fabric.

Fabrics modified with NePCMs have better latent heat, more durability, and retention in frequent washing. The use of nanoparticles in the shell of nanocapsules increases the thermal conductivity and latent heat and improves the thermal performance of the fabric.

It is suggested to expand the research in designing thermoregulating clothes made from treated fabrics with NePCMs and investigating their cooling performance in the climatic chamber on a thermal manikin or human.

## 5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank all the people who helped carry out this review research.

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

# مروری سیستماتیک بر ارتقای ویژگی تنظیم حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای با نانوکپسول‌های مواد تغییر فاز دهنده

**الناز رحیمی[۱]، اعظم بیابانی[۱]، مریم قلع جهی[۲،۱]، فریده گلبابایی[۱*]**

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

*تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۶*

## چکیده

**مقدمه:** کارگرانی که در محیط های گرم کار می کنند، به لباس هایی با خواص تنظیم حرارتی خوب نیاز دارند. امروزه بهبود خاصیت تنظیم حرارت پارچه پنبه ای با تثبیت مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) بر روی آن، مورد توجه قرار گرفته است. نوع پارچه نقش مهمی در تامین آسایش حرارتی دارد. پارچه پنبه ای به دلیل داشتن ویژگی های متمایز خود، محبوب ترین ماده اولیه در صنعت نساجی است. از این رو، هدف این مطالعه مرور سیستماتیک بررسی اثرات نانوکپسولاسیون PCM در پارچه‌های پنبه‌ای متداول، از جمله مورفولوژی، خواص حرارتی، پایداری حرارتی، استحکام کششی، مقاومت در برابر سایش، نشت، جذب آب، قابلیت شستشو و تنفس پذیری پارچه، چالش‌های مرتبط و روندهای تحقیقاتی آینده است.

**روش کار:** این پژوهش با مقالات به‌دست‌آمده از جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های Science Direct، Scopus، Web of Sciences و PubMed انجام شد. از کلیدواژه‌های « nanoencapsulated phase change materi-» ، «cotton fabric»، «cotton»، « nanoenhanced phase change materials»، «als»، و « cotton textiles» استفاده شد.

**یافته ها:** از ۱۲۵۱ مطالعه شناسایی شده از طریق پایگاه های جستجو، ۱۳ مطالعه بر اساس معیارهای ورود انتخاب شدند. نتایج نشان داد که در تمام مطالعات، نانوکپسول‌های PCM با موفقیت سنتز شدند و وارد پارچه پنبه‌ای شدند و خواص حرارتی پارچه را بهبود بخشیدند. در اکثر مطالعات، روش های پلیمریزاسیون درجا و پلیمریزاسیون مینی امولسیونی برای نانوکپسولاسیون استفاده شد. روش pad-dry-cure نیز روشی پرکاربرد برای استفاده از نانوکپسول ها بر روی پارچه های پنبه ای بود.

**نتیجه گیری:** این مطالعه سیستماتیک نشان داد که نانوکپسول‌های سنتز شده از مواد تغییر فاز دهنده و اعمال آن بر روی پارچه پنبه‌ای می‌تواند خواص تنظیم‌کننده حرارت پارچه را بهبود بخشد. پیشنهاد می‌شود تحقیقات در زمینه طراحی لباس‌های تنظیم‌کننده حرارت از پارچه‌های ارتقا یافته و بررسی عملکرد خنک‌کنندگی آن‌ها گسترش یابد.

**کلمات کلیدی:** *نانوکپسولاسیون، مواد تغییر فاز دهنده، پارچه پنبه ای، منسوجات هوشمند، استرس گرمایی*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *fgolbabaei@tums.ac.ir*



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

## مقدمه

پدیده تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی کره زمین در سال‌های اخیر در حال تشدید است و آب و هوای گرم منجر به بروز بالای گرمازدگی تابستان می‌شود (۱). مواجهه با گرمای شدید منجر به بیماری و صدمات شغلی مانند استرس گرمایی، خستگی گرمایی، کرامپ گرمایی و بثورات گرمایی می‌شود. دما، رطوبت، سرعت جریان هوا، تشعشع، فشار هوا، نوع لباس و شدت فعالیت متابولیکی فرد، از جمله عوامل اصلی موثر بر آسایش افراد در محیط‌های گرم به شمار می‌آیند (۲، ۳). استرس گرمایی بار گرمایی کلی بدن است که از تجمع گرمای بدن در حین کار و محدودیت‌های ناشی از لباس ایجاد می‌شود (۴). خطر استرس گرمایی در ریخته‌گری‌ها، کارخانه‌های فولاد، نانوایی‌ها، کارخانه‌های ذوب، کارخانه‌های شیشه‌سازی و کوره‌ها و فضاهای باز شامل ساخت و ساز و عملیات چاه‌های نفت و گاز بالا است(۵). کارگران ساختمانی، کشاورزان و سایر کارگران مزرعه معمولاً در شرایط گرم و مرطوب کار می‌کنند که کار فیزیکی سنگین، باعث تشدید تنش گرمایی در چنین شرایطی می‌شود (۶). کار در چنین شرایطی برای کارگران ناراحت‌کننده و خطرناک است و بر عملکرد و بازده کاری آنها تاثیر منفی دارد (۷-۹).

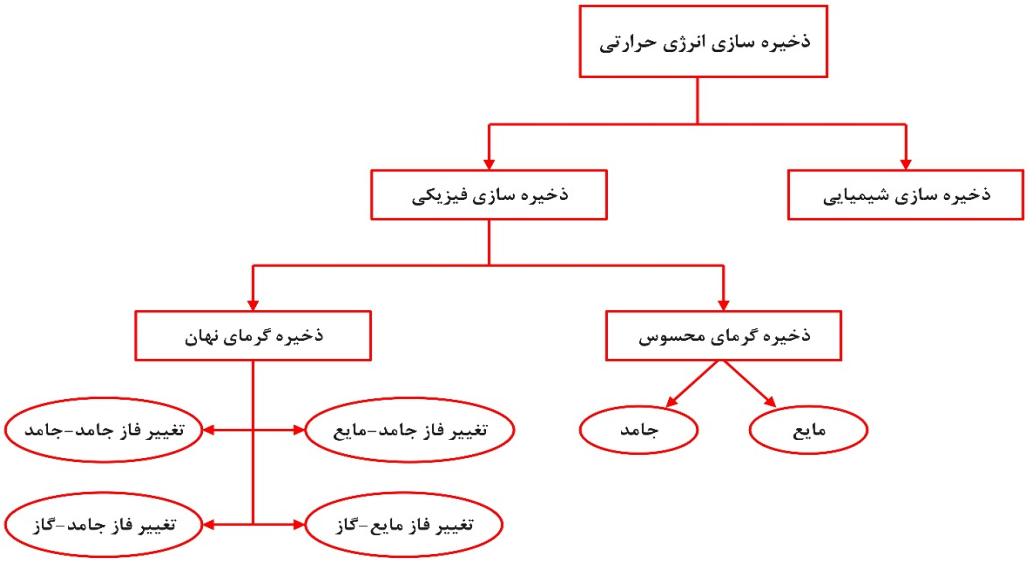
در این بین، با توجه به راه‌های متفاوت تبادل حرارتی بین بدن انسان و محیط، لباس می‌تواند نقش مهمی در حفظ تعادل حرارتی انسان ایفاء کند. یکی از کارکردهای اساسی لباس، بهبود راحتی پوشندگان و ایجاد عایق در برابر شرایط گرم و ایجاد مانعی بین پوست و محیط است. کارگرانی که در محیط‌های گرم کار می‌کنند به لباس‌هایی با ویژگی‌های تنظیم حرارتی خوب نیاز دارند (۱۰). انتقال گرما و رطوبت مهمترین عامل برای حفظ تعادل حرارتی بدن و محیط و در نتیجه دستیابی به راحتی لباس است (۱۱، ۱۲). دمای راحتی پوست انسان ۳۳/۴ درجه سانتیگراد است. اگر بیش از ۴/۵ درجه سانتیگراد تغییر در دمای پوست رخ دهد، بدن انسان احساس ناراحتی می‌کند. دمای داخلی بدن به طور معمول ۳۷ درجه سانتیگراد است و افزایش یا کاهش دمای ۱/۵درجه سانتیگراد نسبت به دمای داخلی بدن می‌تواند کشنده باشد (۱۰، ۱۳، ۱۴).

از طرفی، لباس به عنوان مانعی در برابر سرمایش تبخیری و همرفتی عمل می‌کند و تهدیدی برای حفظ هموستاز سلولی در حین کار و ورزش است (۱۵-۱۷). با پوشیدن لباس، میکروکلایمتی بین پوست و لباس ایجاد می‌شود که بسته به شرایط محیطی معمولاً گرمتر و مرطوب‌تر از محیط است (۱۸). برای حفظ تعادل حرارتی در حالت استراحت، دمای میکروکلایمت ۲۸ تا ۳۰ درجه سانتیگراد مورد نیاز است (۱۹). گرمای بدن به ۴ طریق رسانایی، همرفتی، تابش و تبخیر انتشار می‌یابد که در این میان، تبخیر عرق در گرما نقش تعیین کننده‌ای در خنک کنندگی بدن دارد (۲۰). با افزایش دمای محیط و کاهش گرادیان فشار بخار، ظرفیت تبخیر و قابلیت اتلاف گرما کاهش می‌یابد (۲۱). Fanger اولین کسی بود که راحتی لباس را تعریف کرد. راحتی لباس تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دمای پوست و رطوبت است (۱۹). نوع پارچه مانند پلی استر، پنبه، پشم و الیاف مصنوعی نقش مهمی در جذب رطوبت (تعریق) و انتقال تعریق از طریق لباس دارد. پارچه پنبه‌ای به دلیل ویژگی‌های بارز آن مانند راحتی پوشیدن، انعطاف پذیری، جذب آب و تنفس پذیری، محبوب‌ترین مواد اولیه در صنعت نساجی است (۲۲-۲۴). الیاف طبیعی مانند پشم و پنبه در مقایسه با پلی استر یا سایر الیاف مصنوعی، توانایی زیادی در جذب رطوبت دارند (۱۹). بر اساس مطالعه Smith و Block، پشم و پنبه می‌توانند رطوبت بیشتری را نسبت به سایر پارچه‌ها جذب کنند. پشم و پنبه بالاترین هدایت حرارتی را دارند، اما پلی پروپیلن و بسیاری از الیاف مصنوعی هدایت حرارتی کمتری دارند. در مقایسه با الیاف مصنوعی، پنبه و پشم گرمای بیشتری را با محیط تبادل می‌کنند (۱۹، ۲۵). اگرچه لباس‌های پنبه‌ای راحتی و قابلیت تنفس را تامین می‌کنند، اما ممکن است برای محافظت از افراد در برابر گرمای شدید و حفظ دمای بدن در حالت خنثی حرارتی کافی نباشد.

برای غلبه بر چنین مشکلاتی، محققان به مطالعه



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]




**شکل ۱:** طبقه بندی سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی

منسوجات هوشمند پرداخته‌اند. منسوجات هوشمند آنهایی هستند که می‌توانند شرایط محیطی یا محرک‌های ناشی از منابع مکانیکی، حرارتی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی را حس کنند و به آنها واکنش نشان دهند (۲۶). بدین منظور، محققان سعی بر استفاده از تکنیک‌های خنک‌کننده مختلف در طراحی لباس دارند (۲۷، ۲۸). مواد تغییر فازدهنده (PCMs[1]) نیز به عنوان وسیله‌ای برای بهبود راحتی حرارتی پوشندگان و کاهش استرین حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. PCMها مقدار قابل توجهی گرما را در طول تغییر فاز (از جامد به مایع) جذب می‌کنند و از این رو، کل گرمای رسیده به بدن انسان را کاهش می‌دهند. تعداد زیادی از مطالعات در طول چند دهه گذشته برای تجزیه و تحلیل لباس‌های PCM انجام شده است (۲۹-۳۲). این مواد به روش‌های مختلفی مثل پکیج‌سازی، ماکروکپسوله‌سازی، میکروکپسوله‌سازی، نانوکپسوله‌سازی و الکتروریسی الیاف وارد لباس‌ها می‌شوند (۳۳). به طور مثال می‌توان به بهبود خاصیت تنظیم حرارتی پارچه پنبه‌ای با استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) به عنوان عوامل پوشش‌دهنده، به عنوان مثال، اِن هگزادکان، اِن هپتادکان، اِن اکتادکان و اِن ایکوزان اشاره کرد (۳۴-۳۷). لذا با توجه به موارد گفته شده در بالا، هدف از این مطالعه مرور سیستماتیک، بررسی اثرات نانوکپسوله‌سازی PCM در پارچه‌های پرکاربرد پنبه‌ای، چالش‌های مرتبط با آن و روند مطالعات آینده است.

1. Phase change materials

*- مواد تغییر فاز دهنده*

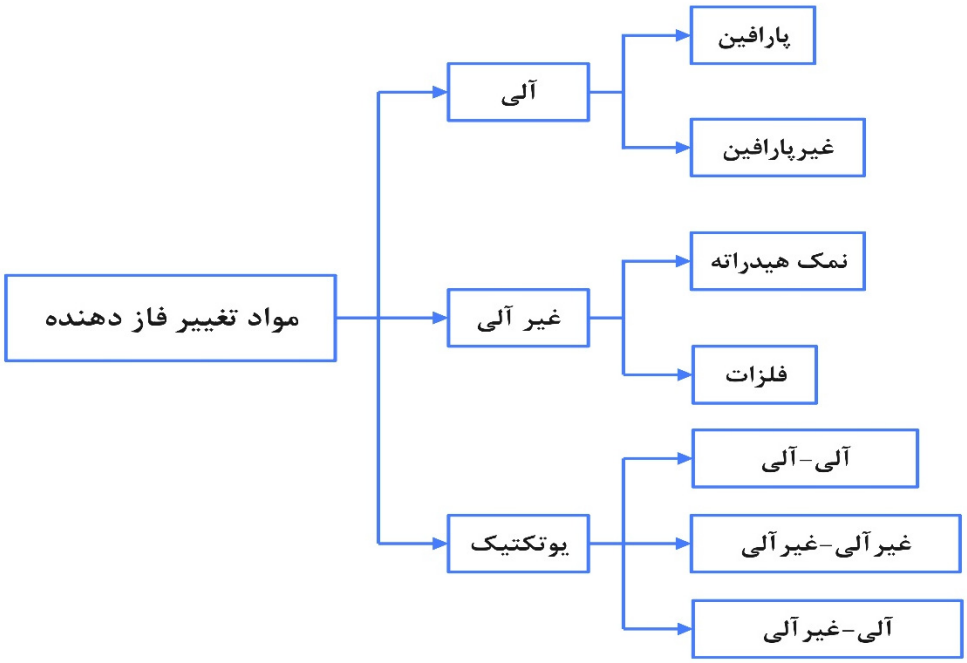
مواد تغییر فازدهنده (PCM) به ترکیباتی اشاره دارد که می‌توانند انرژی ذخیره شده را در زمانی که ماده از جامد به مایع یا برعکس تغییر می‌کند، جذب یا آزاد کنند (۲۰). این انرژی، کاربردهای مختلف گرمایشی و سرمایشی دارد (۳۸-۴۱). طبق شکل ۱، سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES[2]) به سه نوع ذخیره‌سازی حرارت محسوس (SHS[3])، ذخیره‌سازی گرمای نهان (LHS[4]) و طبقه بندی ترموشیمیایی تقسیم می‌شود (۴۲-۴۴).

سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان به وسیله مواد تغییر فازدهنده (PCM) گزینه مناسبی برای ذخیره انرژی

2. Thermal energy storage
3. Sensible heat storage
4. Latent heat storage



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]




**شکل ۲:** انواع PCM

حرارتی هستند (۴۵) و می‌تواند به حفظ دمای داخلی ساختمان‌ها در محدوده آسایش حرارتی ساکنان و کاهش مصرف انرژی کمک کند (۴۶). میزان ذخیره‌سازی گرمای نهان در این مواد ۵ تا ۱۴ برابر مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس است و علاوه بر آن، در طول فرآیند تغییر فاز، دما را ثابت نگه می‌دارند و می‌توانند در محدوده دمای مورد مطالعه ذوب و منجمد شود (۴۵). با توجه به فاز اولیه و نهایی، PCM می‌تواند جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز، مایع-گاز یا برعکس باشد که PCM با انتقال فاز جامد به مایع به دلیل ظرفیت ذخیره حرارت بالا، پرکاربردترین نوع است (۴۷). این مواد به دلیل چگالی بالا، سیستم ذخیره‌سازی فشرده و گرمای نهان بالا برای ذخیره انرژی در تمام تکنیک‌های ذخیره انرژی حرارتی موجود قابل توجه هستند (۴۸، ۴۹). از آنها به طور گسترده‌ای در ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی، کاربردهای ساختمانی، صنایع غذایی و کاربردهای دارویی استفاده شده است (۵۰-۵۳). PCM همچنین در پوشیدنی‌هایی مانند دستکش، کفش، کت و کیسه خواب به عنوان یک پارچه هوشمند گنجانده شده است (۵۴). تعبیه PCM در داخل پارچه برای پوشاک و منسوجات تزئینی می‌تواند آسایش انسان را بهبود بخشد و مصرف انرژی در داخل خانه را کاهش دهد (۳۴، ۵۵).

PCMها به سه نوع اصلی طبقه بندی می‌شوند: آلی (پارافین و اسیدهای چرب)، غیرآلی (هیدرات‌های نمک و فلزات) و یوتکتیک (۵۶). شکل ۲ نموداری از انواع PCM را نشان می‌دهد. PCMهای آلی بیشتر به عنوان PCMهای پارافینی و غیر پارافینی طبقه بندی می‌شوند. PCMهای معدنی نیز به عنوان هیدراته نمک یا فلز طبقه بندی می‌شوند (۴۵، ۵۷، ۵۸). بیش از ۵۰۰ نوع PCM طبیعی و مصنوعی وجود دارد که گرمای نهان و دمای ذوب متفاوتی دارند (۵- تا ۱۹۰ درجه سانتیگراد) (۵۹-۶۱). برای افزایش آسایش حرارتی، PCMها با محدوده دمای ذوب ۱۸ تا ۶۵ درجه سانتی گراد می‌توانند در ساختمان‌ها و منسوجات استفاده شوند (۵۷، ۶۲). در میان تمام PCMها، اِن اکتادکان و پلی اتیلن گلیکول (PEG[1]) متداول‌ترین PCMها برای تولید منسوجات تنظیم‌کننده

1. Polyethylene glycol



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

حرارت هستند (۴۹).

انتخاب PCM مناسب به چندین معیار مرتبط با خواص حرارتی آنها (به عنوان مثال ظرفیت گرمای نهان و محدوده دمای تغییر فاز)، ویژگی‌های فیزیکی (مانند تغییر حجم و چگالی)، پایداری شیمیایی، هزینه‌ها و در دسترس بودن بستگی دارد (۶۳). اگرچه PCMهای معدنی چگالی ذخیره انرژی بالا و رسانایی حرارتی نسبتاً بالایی دارند، PCMهای آلی مزایای قابل توجهی نسبت به PCMهای معدنی با توجه به سوپرکولینگ کم و عدم جداسازی فاز دارند (۶۴-۶۶). پارافین‌ها یا اِن آلکان‌ها در مقایسه با سایر PCMها به دلیل رفتار تغییر فاز خوب، پایداری شیمیایی، گرمای نهان زیاد همجوشی، محدوده دمای تغییر فاز مناسب برای کاربردهای گرمایش و سرمایش، غیرسمی بودن، عدم خورندگی و هزینه کم، خواص ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بهتری دارند (۵۷). امروزه PCMها در الیاف و منسوجات هوشمند تنظیم‌کننده حرارت، ساختمان‌ها، استفاده از انرژی خورشیدی، مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیکی و غیره به خوبی استفاده می‌شوند (۶۷)، اما همچنان PCMها دارای مشکلاتی هستند، مانند فرسایش ناشی از تماس با محیط خارجی، مشکل نشت هنگام تغییر فاز از جامد به مایع و تاخیر در پاسخ حرارتی ایجاد شده توسط هدایت حرارتی پایین (۶۸). برای غلبه بر این معایب، از فناوری نانوکپسولاسیون برای محصور کردن PCMها با مواد پایدار استفاده می‌شود. محصور کردن PCMها در پوسته‌های آلی یا معدنی می‌تواند از نشت آنها جلوگیری کند، سرعت انتقال حرارت را افزایش دهد، بر تغییر حجم در طول انتقال فاز غلبه کند و پایداری حرارتی بهینه را در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد حفظ کند (۶۳، ۶۹-۷۱).

### - *نانوکپسوله‌سازی مواد تغییر فاز دهنده*

میکروکپسولاسیون یا نانوکپسولاسیون فرآیندی است که در آن مواد هسته با مواد پلیمری پوشانده می‌شود. میکروکپسول برای توصیف ذرات با قطر بین ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر استفاده می‌شود، ذرات کوچکتر از ۱ میکرومتر نیز نانوکپسول یا نانوذرات نامیده می‌شوند (۷۲). انتخاب مواد پوسته‌ی مناسب برای سنتز نانوکپسول‌ها مهم است. معمولاً از پلیمرهایی مانند دی اکسید سیلیکون، ملامین-فرمالدئید، ملامین-اوره-فرمالدئید، پلی استایرن، پلی متیل متااکریلات، پلی اورتان و سایر مواد در ساختار پوسته میکروکپسول‌ها یا نانوکپسول‌ها برای جلوگیری از نشت PCM مذاب استفاده می‌شود (۷۳-۷۸). کپسولاسیون میکرو یا نانو را می‌توان با روش‌های فیزیکی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی انجام داد. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به خشک کردن اسپری، سل-ژل، تبخیر با حلال، پلیمریزاسیون درجا، پلیمریزاسیون سطحی، کواسرواسیون پیچیده، پلیمریزاسیون مینی امولسیونی و ... اشاره کرد (۷۹). در این میان، پلیمریزاسیون درجا و تبخیر حلال روش‌های رایج برای محصور کردن PCMها با قابلیت سنتز کپسول‌های مقاوم هستند و برای کاربردهای نساجی نیز مناسب هستند (۴۹، ۷۹، ۸۰). برای مثال، کپسول‌های پوسته‌های PMMA[1] (پلی متیل متااکریلات) با تکنیک تبخیر حلال بدست می‌آیند، در حالی که کپسول‌هایی با پوسته‌های ملامین-فرمالدئید با استفاده از پلیمریزاسیون درجا سنتز می‌شوند (۴۹، ۷۹). شکل ۳ شماتیکی از دو روش نانوکپسوله‌سازی را نشان می‌دهد.

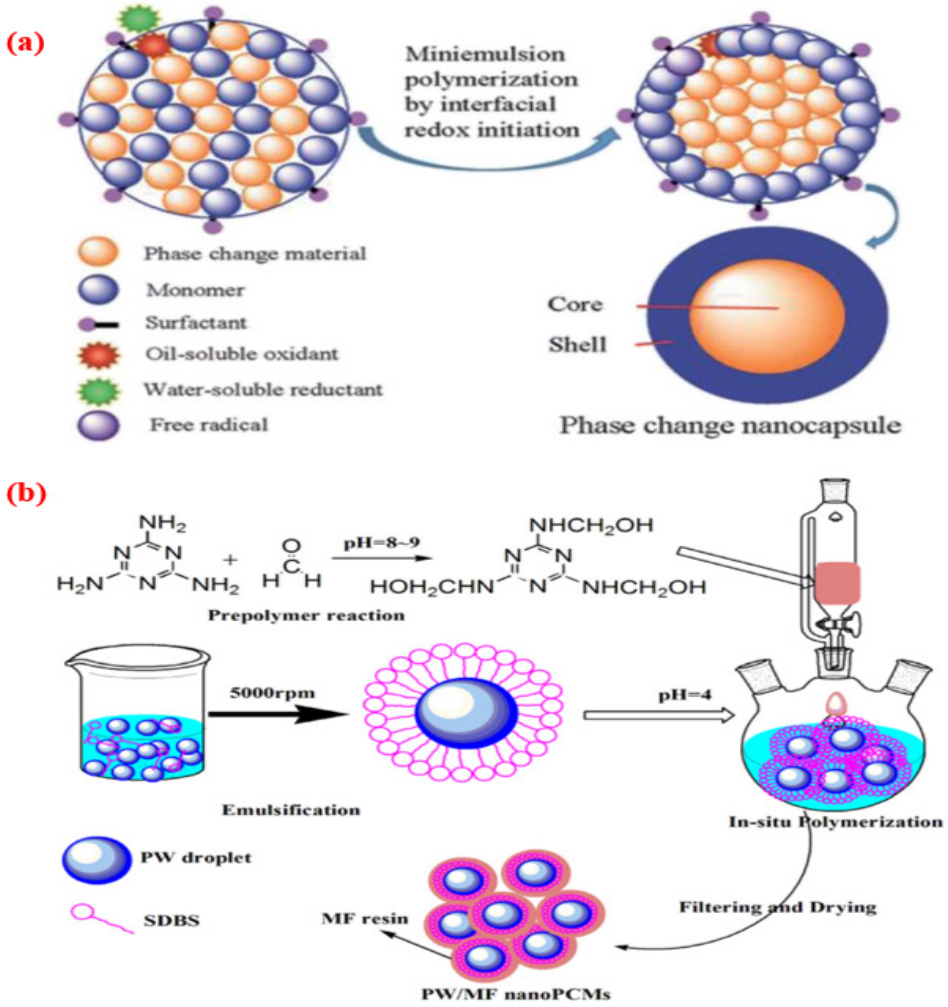
### - *مزایای نانوکپسوله سازی*

مواد تغییر فاز میکرو کپسوله شده (MePCMs[2]) می‌توانند در برابر تغییر حجم PCM مقاومت کنند، پایداری حرارتی و استحکام مکانیکی آن‌ها اصلاح می‌شود، ناحیه انتقال حرارت گسترش یافته و واکنش PCMها با مواد دیگر کاهش می‌یابد (۸۳). اما نانوکپسول‌های حاوی PCM (NePCM[3]) نسبت سطح به حجم بالاتری نسبت به میکروکپسول‌ها دارند که نیروی محرکه قوی‌تری برای سرعت بخشیدن به فرآیندهای ترمودینامیکی فراهم می‌کند (۸۴). به عبارت دیگر، PCMهای نانوکپسوله شده با اندازه کوچکتر در

1. Poly methyl methacrylate
2. Microencapsulated Phase change materials
3. Nanoencapsulated Phase change materials



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]




**شکل ۳**:روش های نانوکپسوله سازی PCMs. (a): پلیمریزاسیون مینی امولسیونی با استفاده از شروع ردوکس سطحی (۸۱). (b): روش پلیمریزاسیون درجا (۸۲).

مقایسه با PCMهای میکرو کپسوله شده در طی فرآیند ذوب و کریستالیزاسیون پاسخ حرارتی سریعتری دارند (۸۵-۸۷). نانوکپسول‌ها ساختار محکم‌تری نسبت به میکروکپسول‌ها دارند و سوپرکولینگ PCM را کاهش می‌دهند (۸۸). به همین دلیل NePCMها اخیراً توجه محققان بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. Fang و همکاران NePCMها را با اِن اکتادکان و پلی استایرن به عنوان مواد هسته و پوسته با موفقیت سنتز کردند. NePCMهای کروی با اندازه‌های ۱۰۰-۱۲۳ نانومتر به دست آمدند. گرمای نهان تغییر فاز نانوکپسول‌ها به دلیل وجود یک پوسته پلی استایرن، کمتر از اِن اکتادکان بود (۸۹). Li و همکاران نانوکپسول‌های حاوی اِن هگزادکان و اوره فرمالدئید (UF) را به ترتیب به عنوان مواد هسته و پوسته با استفاده از روش پلیمریزاسیون دو مرحله‌ای مینی امولسیون سنتز کردند. نتایج نشان داد که نانوکپسول‌ها دارای سطح صاف با اندازه ذرات ۲۷۰ نانومتر هستند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش مقدار سورفکتانت، آنتالپی تغییر فاز افزایش می‌یابد (۹۰). از آنجایی که PCMها با جذب گرما ذوب می‌شوند، نمی‌توانند مستقیماً روی پارچه اعمال شوند (۴۹). NePCMها کاربردهای بالقوه‌ای در منسوجات، الیاف تنظیم‌کننده حرارت و پارچه‌ها دارند (۷۲).



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

**جدول ۱:** راهبرد جست و جو

| ردیف | بخش ها | کلیدواژه ها |
|---|---|---|
| ۱ | مواد تغییر فاز دهنده | *phase change materials OR PCM* |
| ۲ | نانوکپسوله سازی | *Nanoencapsulated OR Nano-encapsulated OR nanoenhanced OR nano-enhanced* |
| ۳ | پارچه پنبه ای | *Cotton OR cotton fabric OR cotton textiles* |
| ۴ | زبان | انگلیسی |
| ۵ | تاریخ جست و جو | ۱ خرداد ۱۴۰۳ (۲۱ می ۲۰۲۴) |
| ۶ | استراتژی جست و جو | ترکیب ردیف های ۱ تا ۵ |

*- کاربرد PCMهای نانوکپسوله شده در منسوجات*

پارچه‌های تنظیم‌کننده حرارت را می‌توان نوعی پارچه هوشمند در نظر گرفت که می‌تواند دمای بدن را در محدوده طبیعی در برابر تغییرات دمای محیط حفظ کند. راحتی حرارتی منسوجات به تبادل حرارت بین بدن انسان و محیط اطراف بستگی دارد. اگرچه MePCMها خواص تنظیم‌کننده حرارت را به مواد نساجی می‌دهند اما محتوای بالای آن‌ها اثرات نامطلوبی بر دوام، نفوذپذیری رطوبت، کشسانی و نرمی پارچه‌های پوشش داده شده دارد (۸۱). امروزه به دلیل افزایش ویژگی‌های سطحی ذرات در اندازه نانو، توجه بسیاری از محققین به فناوری نانو معطوف شده است و بهترین نتایج را پس از کاربرد در منسوجات به دست آورده‌اند (۷۲). NePCMها خواص مختلف منسوجات را بسته به میزان بارگذاری آنها تغییر می‌دهند. بنابراین، برای بهبود عملکرد تنظیم حرارتی منسوجات، بارگذاری بالای NePCMها بسیار مهم است (۸۱). PCMهای کپسوله شده با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله coating، laminating، pad-dry-cure، finishing و ساخت فوم در منسوجات اعمال می‌شوند (۸۱). روش pad-dry-cure بیشتر از روش‌های دیگر برای پوشش منسوجات ساخته شده از الیاف طبیعی یا مصنوعی استفاده می‌شود. برای توسعه منسوجات هوشمند، coating نیز روش مطلوبی نیست زیرا ویژگی اصلی پارچه تنفس پذیری است که با روش coating محدودتر می‌شود (۹۱). در این روش، NePCM ها به وسیله پراکندگی روی پارچه اعمال شده و پارچه از غلتک‌های بالشتکی عبور داده می‌شود تا مایع اضافی حذف شود (۹۲).

## روش کار

فرآیند کلی این مطالعه شامل جست و جوی مقالات در پایگاه‌های معتبر داده است. پس از گزینش مقالات و کد بندی آن‌ها، اطلاعات لازم بر اساس سوال اصلی این پژوهش (نانوکپسول‌های مواد تغییرفازدهنده چه تاثیری بر ویژگی‌های حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای دارند؟) استخراج گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، مراحل انجام مطالعه شرح داده شده است.

جمع‌آوری داده

مطالعه حاضر با بررسی مقالات به دست آمده از جستجوی سیستماتیک در تاریخ ۱ خرداد ۱۴۰۳در پایگاه‌های Science Direct، Web of Sciences، Scopus و PubMed انجام شد. از کلیدواژه‌های «*nanoencapsulated phase change materials*»، «*nanoenhanced phase change materials*»، «*cotton*»، «*cotton fabric*» و «*cotton textiles*» استفاده گردید. راهبرد جست و جو در هر یک از پایگاه‌های اطلاعاتی ذکر شده، در جدول ۱ ارائه شده است.

*معیارهای ورود و خروج*

مطالعات ورودی با توجه به معیارهای زیر انتخاب گردیدند:

- مقالات اصیل پژوهشی، مقالات تجربی و آزمایشگاهی که مواد تغییر فازدهنده را نانوکپسوله کرده و وارد پارچه پنبه‌ای کرده باشند.



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

• مقالات انگلیسی زبان

معیارهای خروج از مطالعه شامل موارد زیر بود.

• مقالاتی با موضوع غیرمرتبط

• مقالات غیر پژوهشی شامل مقالات مروری، مقالات کنفرانسی، کتب، سرمقالات، یادداشت‌های نویسندگان و نامه به سردبیر.

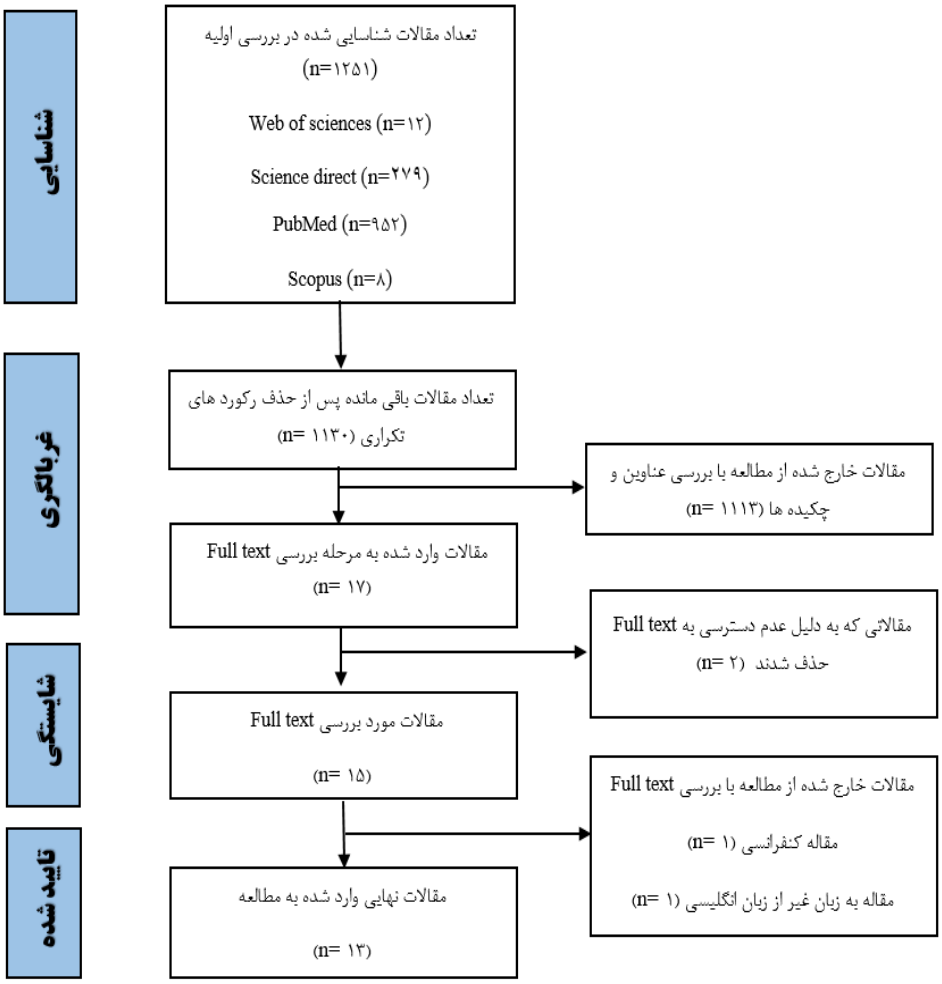
• مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود.

### *گزینش مقالات*

پس از وارد کردن مطالعات یافت شده بر اساس جست و جوی مقالات به نرم‌افزار اندنوت نسخه ۸ و حذف مطالعات تکراری، به منظور افزایش دقت کار، دو نفر از نویسندگان به طور مستقل عناوین و چکیده‌های مقالات را بررسی کردند و هرگونه اختلاف نظر بین آنها برای نتیجه‌گیری مورد بحث قرار گرفت. در گام بعدی، متن کامل مقالات برگزیده شده مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، ۱۳ مقاله پس از ارزیابی کیفیت وارد مطالعه شد که فرآیند استخراج مقالات در شکل ۴ ارائه شده است.

### *استخراج اطلاعات*

مقالات ورودی به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات لازم از آن‌ها استخراج گردید. این اطلاعات عبارت بودند از: مواد هسته و پوسته نانوکپسول‌ها، روش




**شکل ۴:** فلوچارت فرآیند مرور سیستماتیک



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]





**جدول ۲:** خلاصه ای از اطلاعات مقالات مورد بررسی

| منبع | نشتی (%) | هدایت حرارتی (W/m•K) | دمای ذوب در پارچه (°C) | دمای ذوب نانو کپسول (°C) | گرمای نهان نانوکپسول (J/g) | گرمای نهان پارچه (J/g) | مقاومت کششی (N) | درصد کپسوله سازی (%) | اندازه نانو کپسول (nm) | اندازه نانو ذرات (nm) | راندمان ورود نانو کپسول به پارچه (wt.%) | روش پوشش روی پارچه | روش کپسوله سازی | مواد پوسته | مواد هسته |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (۹۳) | - | - | - | ۴۱/۹ | ۱۷/۸ | ۰/۱۹۸ | ۲۶۸/۲۳± ۰/۲۳ (تار) ۱۱۴/۳۳± ۰/۳۵ (پود) | - | - | ۱۴۱ nm | - | pad-dry-cure | پلیمریزاسیون درجا | اوره-فرمالدئید (UF) | پلی اتیلن گلیکول |
| (۹۴) | - | - | ۵۵/۲ ۵۵/۴۵ | ۶۴/۳ | ۷۴/۲ | ۱/۵۲ ۱/۹۱ | ۲۶۳/۳± ۰/۲ ۲۸۲/۱± ۰/۱ | ۴۸ | ۲۰۰-۴۰۰ nm | ۲۵۶ nm | ۲۰-۴۰ | pad-dry-cure | پلیمریزاسیون درجا | اوره-فرمالدئید (UF) | وکس پارافین |
| (۹۵) | - | - | - | ۳۲-۳۳ | ۱۴۴ | ۱۲/۳ | - | - | ۳۰۰-۳۲۶ nm | - | - | pad-dry-cure | پلیمریزاسیون درجا | ملامین-فرمالدئید (MF) | اِکوزان و اِن اکتادکان |
| (۹۶) | - | - | - | ۳۲/۴ -۴۱/۱ | ۱۲۷ | ۱۲/۳ | - | - | ۵۰۰ nm | - | - | pad-dry-cure | تبخیر حلال | PMMA[1] | نمک گلوبر |

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]





**ادامه جدول ۲:** خلاصه ای از اطلاعات مقالات مورد بررسی

| منبع | نشتی (%) | هدایت حرارتی (W/m•K) | دمای ذوب در پارچه (°C) | دمای ذوب نانو کپسول (°C) | گرمای نهان نانوکپسول (J/g) | گرمای نهان پارچه (J/g) | مقاومت کششی (N) | درصد کپسوله سازی (%) | اندازه نانو کپسول (nm) | اندازه نانو ذرات (nm) | راندمان ورود نانو کپسول به پارچه (wt.%) | روش پوشش روی پارچه | روش کپسوله سازی | مواد پوسته | مواد هسته |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (97) | - | - | ۲۸/۷ | – | – | ۱/۵۹ | - | - | - | - | - | layer-by-layer | کواسرواسیون پیچیده | PDDA[۲] | اِن اکتادکان |
| (81) | - | - | – | ۲۹/۳ | ۱۰۵/۱ | – | – | – | ۹۰-۱۱۰ nm | ۶۰-۹۰ nm | ۹۹/۳ | خشک سازی در خلاء | پلیمریزاسیون مینی امولسیونی | (St–BA–MA)[۳] | آندکانوئیک اسید (UA) |
| (84) | - | - | - | ۲۶/۰۷ | ۵۶/۸۹ | – | - | - | ۱۷۰ nm | - | ۵۵/۰۹ | غوطه ور شدن | پلیمریزاسیون مینی امولسیونی | پلی اکریلات | اِن بوتیل استئارات و اِن اکتادکان |
| (100) | - | ۰/۰۸۱۱ | - | ۲۶/۴۹ | ۶۲/۸۵ | ۶/۶۵ | - | ۶۱/۵۴ | ۷۰-۱۰۰ nm | - | - | - | پلیمریزاسیون امولسیونی | پلی اکریلات و نانوذره $TiO_2$ | اِن بوتیل استئارات و اِن اکتادکان |

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]





**ادامه جدول ۲:** خلاصه ای از اطلاعات مقالات مورد بررسی

| منبع | نشتی (%) | هدایت حرارتی (W/m•K) | دمای ذوب در پارچه (°C) | دمای ذوب نانو کپسول (°C) | گرمای نهان نانوکپسول (J/g) | گرمای نهان پارچه (J/g) | مقاومت کششی (N) | درصد کپسوله سازی (%) | اندازه نانو کپسول (nm) | اندازه نانو ذرات (nm) | راندمان ورود نانو کپسول به پارچه (wt.%) | روش پوشش روی پارچه | روش کپسوله سازی | مواد پوسته | مواد هسته |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (101) | - | - | - | ۲۶/۱۵ | ۷۷/۷۲ | ۸/۴۵ | - | ۷۴/۲۲ | ۱۰۰ nm | - | - | - | پلیمریزاسیون امولسیونی | PMMA و FGO[۴] | اِن بوتیل استئارات و اِن اکتادکان |
| (98) | - | - | - | - | ۱۵۰ | ۵۱/۱۳ | - | - | - | - | ۴۵ | غوطه ور شدن | پلیمریزاسیون درجا | نانو دانه های فسفرین (PNF) | ماده تغییر فاز دهنده مبتنی بر پلی اورتان |
| (54) | ۲/۵۷ | - | - | ۲۸/۷ | ۱۲۶/۲ | ۲۷/۷ | ۵۴۵/۲± ۱۱/۷ ۲۹۰/۵± ۱۰/۴ | ۶۰/۲ | ۴۰۰ nm | ۱۴ nm | - | pad-dry-cure | مینی امولسیون بدون سورفکتانت | PEOS[۵] | اِن دوکوزان |
| (102) | - | ۰/۱۱۵۴ | - | ۲۸/۶۲ | ۷۹/۹۱ | - | - | ۸۶/۶۸ | ۱۰۰-۲۰۰ nm | ۲/۶ nm | - | پوشش دهی | پلیمریزاسیون مینی امولسیون RAFT | PMMA و نانوذره $Cu_2O$ | اِن بوتیل استئارات و اِن اکتادکان |

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]





**ادامه جدول ۲:** خلاصه ای از اطلاعات مقالات مورد بررسی

| منبع | نشتی (%) | هدایت حرارتی (W/m•K) | دمای ذوب در پارچه (°C) | دمای ذوب نانو کپسول (°C) | گرمای نهان نانوکپسول (J/g) | گرمای نهان پارچه (J/g) | مقاومت کششی (N) | درصد کپسوله سازی (%) | اندازه نانو کپسول (nm) | اندازه نانو ذرات (nm) | راندمان ورود نانو کپسول به پارچه (wt.%) | روش پوشش روی پارچه | روش کپسوله سازی | مواد پوسته | مواد هسته |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (99) | - | - | - | - | - | - | - | ۹۴ | ۵۰ | - | - | پوشش دهی UV-cure | پلیمریزاسیون مینی امولسیونی | PMMA | RT27 |

(1) Polymethyl Methacrylate. (2) Poly(diallyldimethylammonium chloride). (3) styrene–n-butyl acrylate–methacrylic acid copolymer.
(4) functionalized graphene oxide. (5) precursor hyperbranched polyethoxysiloxanes.

کپسوله‌سازی، روش پوشش دهی پارچه، مورفولوژی نانوکپسول‌ها، اندازه و درصد تشکیل آن‌ها، تاثیر نانوکپسول‌های مواد تغییر فازدهنده بر خواص و عملکرد پارچه پنبه‌ای از جمله خواص حرارتی (دمای ذوب، گرمای نهان، هدایت حرارتی)، پایداری حرارتی، نشت مواد تغییر فازدهنده، استحکام کششی، مقاومت سایشی، جذب آب توسط پارچه، قابلیت شست و شو و تنفس پذیری پارچه.

## یافته ها

این مطالعه با مرور مقالاتی انجام شد که از NePCM برای بهبود خواص تنظیم حرارت پارچه پنبه‌ای استفاده کردند. مقالات مورد نظر پس از جست و جو در پایگاه‌های اطلاعاتی، در صورت داشتن معیارهای ورود به مطالعه انتخاب و اطلاعات آن‌ها استخراج گردید.

با توجه به شکل ۴، در جست و جوی اولیه تعداد ۱۲۵۱ مقاله یافت شد و با حذف مطالعات تکراری به ۱۱۳۰ مقاله کاهش یافت. با مطالعه عنوان و چکیده مقالات، تعداد ۱۱۱۳ مقاله به دلیل غیرمرتبط بودن با موضوع یا غیر پژوهشی بودن حذف گردید. تعداد ۱۷ مقاله برای بررسی انتخاب شد که از این تعداد، ۲ مقاله به دلیل عدم دسترسی به متن کامل حذف شدند. متن کامل ۱۵ مقاله مورد بررسی قرار گرفت. یک مقاله به دلیل کنفرانسی بودن و یک مقاله نیز به دلیل نگارش متن کامل به زبان چینی از مطالعه حذف شدند. در نهایت متن کامل ۱۳ مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج نشان داد که در تمام مطالعات، نانوکپسول‌های PCM با موفقیت سنتز شدند و در پارچه پنبه‌ای قرار گرفتند و خواص حرارتی پارچه را بهبود بخشیدند. در اکثر مطالعات از پلیمریزاسیون درجا و پلیمریزاسیون مینی امولسیونی برای نانوکپسوله‌سازی استفاده شده است. روش pad-dry-cure نیز روشی پرکاربرد برای استفاده از نانوکپسول‌ها بر روی پارچه‌های پنبه‌ای بود. خلاصه‌ای از اطلاعات اصلی مطالعات بررسی شده در جدول ۲ و تاثیر نانوکپسول‌های PCM بر خصوصیات غیرحرارتی پارچه در جدول ۳ ارائه شده است.

## بحث

این مطالعه بر اساس مروری سیستماتیک بر تاثیر نانوکپسوله‌سازی PCM در پارچه‌های پنبه‌ای انجام شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش توجه به ارتقای خواص تنظیم حرارتی در پارچه‌های پنبه‌ای با استفاده از مواد تغییر فازدهنده است و در این بین، روش نانوکپسوله‌سازی می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. اصلاح پارچه‌ها با نانوکپسول‌های PCM می‌تواند ویژگی‌های مختلفی از پارچه را تحت تاثیر قرار دهد که در ادامه، مطالعات مورد نظر با جزئیات بیشتری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته

**جدول ۳:** تاثیر نانوکپسول های PCM بر خصوصیات غیرحرارتی پارچه

| استحکام کششی | مقاومت سایشی | جذب آب | قابلیت شست و شو | تنفس پذیری | منبع |
|---|---|---|---|---|---|
| افزایش | - | - | کاهش میزان نانوکپسول ها با افزایش تعداد شست وشو | - | (۵۴) |
| - | - | - | کاهش میزان نانوکپسول ها با افزایش تعداد شست وشو | - | (۸۴) |
| کاهش | افزایش | افزایش | - | - | (۹۳) |
| کاهش | افزایش | افزایش | - | - | (۹۴) |
| - | - | - | کاهش میزان نانوکپسول ها با افزایش تعداد شست وشو | - | (۹۵) |
| - | - | - | کاهش میزان نانوکپسول ها با افزایش تعداد شست وشو | - | (۹۶) |
| - | - | - | - | خوب (نسبت به پارچه اصلاح نشده تغییری نکرده است) | (۹۷) |
| - | - | - | کاهش میزان نانوکپسول ها با افزایش تعداد شست وشو | - | (۹۸) |



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

و عواملی مانند مورفولوژی نانوکپسول‌ها، خواص حرارتی، پایداری حرارتی، استحکام کششی، مقاومت سایشی، جذب آب، قابلیت شست و شو، تنفس پذیری و نشت PCM در پارچه مورد بحث قرار گرفته‌اند.

Karthikeyan و همکاران در سال ۲۰۱۳، نانوکپسول‌هایی را با هسته پلی‌اتیلن گلیکول و پوسته اوره فرمالدئید به روش پلیمریزاسیون درجا سنتز کردند و با استفاده از روش pad-dry-cure روی پارچه اعمال کردند. نتایج نشان داد که پارچه‌های اصلاح شده گرمای نهان و پایداری حرارتی خوبی دارند (۹۳). در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۴، این محققان نانوکپسول‌هایی را با هسته موم پارافین و پوسته اوره فرمالدئید به روش قبلی سنتز کردند و روی پارچه اعمال کردند. نتایج نشان داد که پارچه‌های اصلاح شده با نانوکپسول‌ها دارای خواص تنظیم حرارتی بهتری نسبت به پارچه‌های اصلاح نشده هستند (۹۴).

Sun و همکاران در سال ۲۰۱۷، از مخلوط اِکوزان و اِن اوکتادکان به عنوان هسته نانوکپسول و ملامین فرمالدئید به عنوان پوسته استفاده نمودند. نانوکپسوله‌ها به روش پلیمریزاسیون درجا سنتز شده و به روش pad-dry-cure روی پارچه اعمال شدند. پارچه اصلاح شده با NePCM با پارچه اصلاح شده با MePCM مقایسه شد. نتایج نشان داد که نانوکپسول‌ها، ماندگاری بهتری بر روی پارچه پنبه‌ای نسبت به میکروکپسول‌ها دارند. همچنین کاهش گرمای نهان برای MePCM پس از شستشو بیشتر از NePCM بود (۹۵). Iqbal و همکاران در سال ۲۰۱۸، نانوکپسول‌های نمک گلوبر را با پوسته PMMA (پلی متیل متا اکریلات) به روش تبخیر حلال سنتز کرده و به روش pad-dry-cure روی پارچه اعمال نمودند. نمک گلوبرِ نانوکپسوله شده پس از کاربرد در پارچه، نتایج بهتری نشان داد و می‌توان از آن در توسعه منسوجات سلولزی هوشمند استفاده کرد (۹۶).

Iamphaojeen و Siriphannon در سال ۲۰۱۸، نانوکپسول اِن اکتادکان را با روکش PDDA[1] به روش کواسرواسیون پیچیده[2] سنتز و با روش layer-by-layer روی پارچه اعمال نمودند. مدت زمان تنظیم حرارت و تفاوت دما بین نمونه‌های پارچه اصلاح شده و اصلاح نشده عمدتاً به مقدار نانوکپسول‌ها بستگی داشت. در پارچه اصلاح شده با نانوکپسول‌ها، مدت‌زمان تنظیم حرارتی و اختلاف دما بیشتر بود (۹۷). Chen و همکاران در سال ۲۰۱۹، نانوکپسول UA[3] را با پوسته کوپلیمر استایرن-بوتیل آکریلات[4] به روش پلیمریزاسیون مینی امولوسیونی با استفاده از فرآیند شروع ردوکس سطحی[5] سنتز کردند و به روش خشک‌سازی در خلاء[6] وارد پارچه پنبه‌ای نمودند. فرآیند شروع ردوکس سطحی، نانوکپسولاسیون UA را با راندمان کپسوله‌سازی بالا انجام داد. نهایتاً، پارچه‌های غیر بافته با قابلیت نفوذپذیری هوا و تنظیم حرارتی عالی بدست آمد. این نتایج حائز اهمیت هستند زیرا نشان می‌دهند که بارگذاری بالای NePCM بر روی یک منسوج می‌تواند منجر به افزایش عملکرد تنظیم حرارتی شود (۸۱). Aftab و همکاران در سال ۲۰۲۰، PCM بر پایه پلی اورتان را در پوسته PNF[7] با هدف ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی به روش پلیمریزاسیون درجا، نانوکپسوله‌سازی کردند و بر روی پارچه اعمال نمودند. نتایج نشان داد که پارچه توسعه یافته، پتانسیل بالایی در تنظیم حرارت دارد (۹۸). Zhang و همکاران در سال ۲۰۲۱، نانوکپسول‌های N-docosane را با پوسته PEOS[8] به روش مینی امولوسیون سنتز کردند و به این نتیجه رسیدند که پارچه پنبه‌ای اصلاح شده با این مواد، بادوام با قابلیت تنظیم حرارتی خوب و مقاوم در برابر اشعه ماوراء بنفش است (۵۴). در مطالعه Prateepmaneerak و همکاران در سال ۲۰۲۲، نانوکپسول‌های PMMA/RT27 با عوامل ضد میکروبی به روش پلیمریزاسیون مینی امولسیون سنتز شد و با روش پوشش دهی UV-cure روی پارچه پنبه‌ای اعمال شد. نتایج نشان داد که پارچه به‌دست‌آمده دارای

1. Poly(diallyldimethylammonium chloride)

2. Complex coacervate core micelles technique
3. Undecanoic acid
4. Styrene–butyl acrylate copolymer
5. Mini-emulsion polymerization using interfacial redox initiation
6. Vacuum suction filtration and drying
7. Phosphorene nanoflakes
8. Precursor hyperbranched polyethoxysiloxanes



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

خواص تنظیم حرارتی و ضد میکروبی با عملکرد خوب است (۹۹).

در برخی از مطالعات مورد بررسی، از نانوذرات رسانای حرارتی در پوسته نانوکپسول‌ها به صورت کامپوزیت استفاده شده است و نتایج بسیار موثری از افزودن این نانوذرات حاصل شده است. برای مثال، Zhou و همکاران در سال ۲۰۱۹، نانوکپسول‌هایی با هسته اِن اکتادکان و اِن بوتیل استئارات و پوسته پلی اکریلات به روش پلیمریزاسیون مینی امولسیون سنتز کرده و روی پارچه پنبه‌ای اعمال نمودند. نتایج نشان داد که پارچه پنبه‌ای اصلاح شده دارای ویژگی‌های تنظیم حرارتی بوده و با دوام است (۸۴). این محقق و همکارانش در مطالعه‌ی دیگری، همان نانوکپسول‌ها را با اضافه کردن نانوذرات تیتانیوم دی اکسید($nano\text{-}TiO_2$) به پوسته پلی اکریلات به روش پلیمریزاسیون امولسیونی بدون سورفاکتانت سنتز کردند. نتایج نشان داد که افزودن کمتر از ۰/۲درصد وزنی نانوذره، اندازه نانوکپسول‌ها را کوچک‌تر کرد و در کاربردهای پارچه‌های تنظیم حرارت هوشمند می‌تواند باعث پاسخ حرارتی عالی و کارآیی بهتر پارچه شود. همچنین خواص محافظتی خوب در برابر اشعه ماوراءبنفش دارد (۱۰۰). در مطالعه دیگری، این محققان نانوکپسول‌هایی را با استفاده از همان PCM و پوسته پلی متیل متا اکریلات (PMMA) اصلاح شده با نانوذرات اکسید گرافن عامل‌دار شده، سنتز کردند و آن را روی پارچه پنبه‌ای اعمال نمودند. نتایج نشان داد که کپسول‌های کروی منظم FGO/PMMA-NePCM با ساختارهای هسته-پوسته و راندمان کپسوله‌سازی بالا تشکیل شدند. علاوه بر این، بارگذاری FGO به میزان ۰/۰۸ درصد وزنی روی PMMA-NePCM به طور موثر هدایت حرارتی، گرمای نهان و پایداری حرارتی نانوکپسول‌ها را بهبود بخشید. علاوه بر این، FGO[1] در PMMA-NePCM در مقایسه با PMMA-NePCM، در هنگام استفاده در پارچه‌های پنبه‌ای به طور قابل توجهی عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی و تنظیم حرارتی بالاتری داشتند. همچنین، در مقایسه با سایر میکروکپسول‌های اصلاح شده با GO[2] در مطالعات دیگر، نانوکپسول سنتز شده در این مطالعه عملکرد حرارتی بهتری داشت (۱۰۱). Zhao و همکاران در سال ۲۰۲۲، نانوکپسول‌های اِن اکتادکان و اِن بوتیل استئارات را با پوسته‌های کامپوزیت $PMMA/Cu_2O$ با روش پلیمریزاسیون مینی امولسیونی RAFT سنتز کردند و روی پارچه‌های پنبه‌ای پوشاندند. نانوکپسول‌های سنتز شده پایداری و دوام خوبی داشتند و پارچه مورد نظر نیز دارای خواص حرارتی خوبی بود (۱۰۲).

*- مورفولوژی*

ساختار مورفولوژیک نانوکپسول‌های سنتز شده و اعمال آن‌ها روی پارچه معمولا با استفاده از تصاویر SEM[3]، FESEM[4]، TEM[5] بررسی می‌شود تا شکل نانوکپسول‌ها و میزان موفقیت‌آمیز بودن ورود آن‌ها به پارچه مشخص شود. بدین منظور از تست FTIR[6] نیز برای بررسی ترکیب شیمیایی آن‌ها و تایید کپسولاسیون استفاده می‌شود. در مطالعات مورد بررسی نانوکپسول‌های سنتز شده، شکل کروی و ساختار هسته-پوسته داشته و به خوبی بر روی پارچه اعمال شدند.

در مطالعه Karthikeyan و همکاران، PEG در پوسته‌ی UF[7] محصور شد تا نانوکپسول‌های کروی شکل منظمی را تشکیل دهد و سطوح عمدتاً صاف بودند. تجزیه و تحلیل TEM مشخص کرد که اندازه ذرات نانوکپسول‌ها ۱۴۱ نانومتر بود. پوسته‌ی UF استحکام مکانیکی را برای PCM نانوکپسوله‌شده فراهم کرده و از نشت PEG مذاب جلوگیری می‌کند. همچنین تصاویر SEM نانوکپسول‌هایی را نشان داد که در مکان‌های مختلف روی پارچه پنبه‌ای توزیع شده‌اند. نانوکپسول‌های پوشش داده شده دارای سطح صاف و منظمی بودند که سطح پارچه را پوشش داده‌اند (۹۳). در مطالعه دیگر توسط این محقق،

1. functionalized graphene oxide

2. Graphene oxide
3. Scanning Electron Microscopy
4. Field Emission Scanning Electron Microscope
5. Transmission electron microscopy
6. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
7. Urea-formaldehyde



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

مورفولوژی سطح PCM نانوکپسوله شده با استفاده از SEM بررسی شد. تصاویر SEM نشان داد که مواد پوسته اوره فرمالدئید UF، موم پارافین را محصور کرده و از نشت پارافین ذوب شده جلوگیری می‌کند. نانوکپسول‌ها با سطح صاف و شکل کروی، تا حدی آگلومره شده بودند. میانگین اندازه ذرات نانوکپسول‌ها ۲۵۶ نانومتر مشخص شد. همچنین، نانوکپسول‌ها با سطح صاف و منظمی روی سطح پارچه را به طور همگن پوشش دادند. تست FTIR نیز نشان داد که موم پارافین به خوبی در پوسته‌ی پلیمری UF محصور شده است (۹۴). در مطالعه Sun و همکاران، تصاویر SEM نشان داد که نانوکپسول‌ها به صورت کروی و بسیار پایدار سنتز شده‌اند. همچنین، نتایج آزمایش FTIR ثابت کرد که NePCMها از پارافین و ملامین فرمالدئید به عنوان مواد هسته و پوسته تشکیل شده‌اند (۹۵).

در مطالعه Chen و همکاران، تصاویر TEM نشان داد که ذرات نانوکپسول یک شکل کروی یکنواخت با ساختار هسته-پوسته مشخص دارند و هسته UA در مرکز پوسته کوپلیمر St-BA-MA[1] قرار دارد. تصاویر SEM نشان داد که الیاف پنبه‌ای که با NePCM اصلاح شده است، سطح ناهمواری دارد و در نتیجه اتصال نانوکپسول‌های PCM را تایید می‌کند. همچنین ساختار متخلخل پارچه‌های نبافته حاوی NePCM، نشان داد که این پارچه‌ها می‌توانند عملکرد تنظیم حرارتی و نفوذپذیری هوای خوبی از خود نشان دهند (۸۱). در مطالعه‌ی Zhou و همکاران، تصاویر SEM و TEM نشان داد که ذرات نانوکپسول دارای ساختار هسته-پوسته مشخصی هستند و PCM با پوسته پلی‌اکریلات با موفقیت سنتز شده است. تصاویر پارچه اصلاح شده نیز تشکیل لایه پلیمری صاف روی سطح الیاف و توزیع یکنواخت ذرات کروی نانوکپسول را تایید کرد. تست FTIR نیز نشان داد که نانوکپسول‌ها با موفقیت روی پارچه پنبه‌ای اعمال شده است (۸۴). در مطالعه دیگر توسط این محقق، تصاویر TEM نشان داد که نانوکپسول‌ها همراه با نانوذرات FGO به شکل کروی و منظم تشکیل یافته‌اند. تست FTIR نیز تشکیل نانوکپسول‌ها را با هسته PCM و پوسته PMMA/ FGO تایید کرد (۱۰۱). در مطالعه ی Zhang و همکاران، تصاویر FESEM و TEM تشکیل نانوکپسول‌هایی کروی با قطر ۴۰۰ نانومتر و ساختار هسته -پوسته را نشان داد. تست FTIR نیز سنتز نانوکپسول‌ها را به طور موفقیت‌آمیز تایید نمود. همچنین اصلاح پارچه پنبه‌ای با نانوکپسول‌های $PCM/SiO_2$ باعث توزیع پراکنده آن‌ها در سطح الیاف پارچه شد که با افزایش مقادیر مواد، توزیع آن‌ها روی پارچه متراکم‌تر می‌شود (۵۴). در مطالعه Prateepmaneerak و همکاران، تصاویر SEM نشان داد که پارچه‌ی پنبه‌ای حاوی نانوکپسول‌ها، سطح زبرتری نسبت به پارچه‌ی ساده دارد و این تصاویر، اعمال نانوکپسول‌ها بر روی پارچه را تأیید نمودند (۹۹).

*- خواص حرارتی*

خواص حرارتی NePCMها با استفاده از تست DSC[2] ارزیابی می‌شود. گرمای نهان یک عامل تعیین‌کننده در ارزیابی ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در کامپوزیت‌های مواد تغییر فازدهنده است (۱۰۲). در مطالعه Karthikeyan و همکاران، نتایج نشان داد که گرمای نهان نانوکپسول‌ها به دلیل هدایت حرارتی پایین لایه پوسته، کمتر از گرمای نهان هسته PEG است. با افزایش مقدار بایندر اضافه شده به مخلوط نانوکپسول، ظرفیت ذخیره گرمای نهان پارچه نیز افزایش یافت. این نتیجه نشان داد که ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان پارچه به مقدار NePCMهای اضافه شده به پارچه و نسبت عامل بایندر/ نانو کپسول پوشانده شده روی پارچه مربوط می‌شود (۹۳). در مطالعه‌ی دیگر توسط این محقق، آنتالپی گرمای نهان موم پارافین و نانوکپسول‌ها ۱۵۴/۲ و ۷۴/۲ J/g بود. دمای نقطه ذوب نانوکپسول‌ها نزدیک به دمای پارافین بود که نشان می‌دهد که لایه پوسته نانوکپسول‌ها بر خواص تغییر فاز پارافین تأثیر نمی‌گذارد. ظرفیت ذخیره انرژی گرمای نهان پارچه‌های

1. styrene–n-butyl acrylate–methacrylic acid copolymer

2. Differential Thermal Analysis



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

اصلاح شده ۲۰ درصد وزنی و ۴۰ درصد وزنی به ترتیب ۱/۵۲ و ۱/۹۱ J/g بود و خاصیت تنظیم حرارتی پارچه اصلاح شده بیشتر از پارچه اصلاح نشده بود. ظرفیت گرمای نهان پارچه‌های اصلاح شده در مقایسه با پارچه‌های اصلاح نشده افزایش یافت. این نتیجه نشان داد که ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان منسوجات تنظیم حرارتی به مقدار نانوکپسول‌های اضافه شده به پارچه و نسبت نانوکپسول به ماده اتصال‌دهنده بستگی دارد. علاوه بر این، مقدار ذخیره انرژی گرمای نهان را می‌توان از طریق انتخاب مواد هسته و پوسته، مقدار سورفکتانت و سرعت هم زدن بهبود بخشید (۹۴). مقایسه منحنی‌های DSC، NePCM و MePCM در مطالعات نشان داد که دمای تغییر فاز NePCM به دمای آسایش پوست انسان نزدیک‌تر است. همچنین، گرمای نهان NePCMها ۲۸ درصد بیشتر از MePCMها است (۹۵، ۹۶).

در مطالعه Iamphaojeen و Siriphannon پس از اینکه نمونه‌های پارچه پنبه‌ای اصلاح نشده و اصلاح شده در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه سرد شدند، در اتاقک در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و تغییرات دمایی آن‌ها به مدت ۱۰ دقیقه از طریق تصاویر حرارتی کنترل شد و مشاهده شد که دمای سطح تمام نمونه‌های پارچه اصلاح شده کمتر از نمونه‌های اصلاح نشده بود. پارچه پنبه‌ای به دلیل خاصیت عایق حرارتی می‌تواند دمای سرد را به مدت ۳ دقیقه حفظ کند. از سوی دیگر، پارچه پنبه‌ای اصلاح شده می‌تواند دمای سرد را برای مدت زمان طولانی‌تری حفظ کند. نمونه‌های پارچه اصلاح شده با مقدار بیشتری از نانوکپسول‌های اِن اکتادکان، اثر تنظیم‌کننده حرارت طولانی‌تری دارند (۹۷). طبق مطالعه‌ی Zhou و همکاران، پوسته پلی اکریلات، آنتالپی تغییر فاز هسته PCM یوتکتیک را کاهش می‌دهد اما NePCMهای سنتز شده دارای آنتالپی تغییر فاز نسبتاً بالایی هستند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ گرمایش و سرمایش پارچه اصلاح شده کمتر از پارچه اصلاح نشده است و پارچه اصلاح شده در مقایسه با پارچه اصلاح نشده می‌تواند از سرما یا گرما محافظت کند (۸۴).

در مطالعه Aftab و همکاران، نتایج DSC نشان داد که درجه سوپرکولینگ در نمونه‌های کامپوزیت PNF/PU در مقایسه با PU خالص کاهش می‌یابد. کاهش سوپرکولینگ در کامپوزیت‌های PNF/PU به اثر هسته‌زایی ناهمگن PNF نسبت داده می‌شود. همچنین آنتالپی تغییر فاز نمونه‌های PNF/PU با افزایش وزن PNF در سیستم کامپوزیت افزایش یافت و در چرخه‌های متعدد گرمایش و سرمایش ثابت بود. به طوری که با توجه به نتایج DSC، تنها ۵ درصد ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان پس از ۱۰۰۰ چرخه حرارتی کاهش یافت، که پایداری حرارتی مکرر و ظرفیت ذخیره انرژی برگشت‌پذیر نانوکپسول‌ها را تضمین می‌کند (۹۸). طبق مطالعه Zhang و همکاران، آنتالپی نانوکپسول‌های $PCM/SiO_2$ کمتر از PCM خالص بود. همچنین پارچه پنبه‌ای اصلاح شده با این نانوکپسول‌ها، دارای گرمای نهان خوبی بود، به طوری که پس از ۱۰ چرخه شست و شو، کاهش ناچیزی داشت. نتایج به وضوح ثابت کرد که پارچه اصلاح شده با PCM/$SiO_2$، دارای قابلیت تنظیم حرارتی خوبی برای مدیریت حرارتی موثر در بسیاری از زمینه‌ها، مانند لباس‌های هوشمند تنظیم‌کننده دما است (۵۴).

پوسته پلیمری محصورکننده در NePCMها هدایت حرارتی نسبتاً کمی دارد و به عنوان یک نقطه ضعف برای پاسخ حرارتی سریع در ذخیره‌سازی و انتشار انرژی حرارتی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ادغام پرکننده‌های بسیار رسانای حرارتی با نانوکپسول‌های PCM مبتنی بر پوسته پلیمری برای بهبود عملکرد انتقال حرارت NePCMهای طراحی‌شده، ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعات Zhou و همکاران، نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات تیتانیوم دی اکسید($nano\text{-}TiO_2$) به پوسته نانوکپسول‌ها باعث افزایش هدایت حرارتی و گرمای نهان نانوکپسول‌ها نسبت به حالت بدون نانوذرات می‌شود. همچنین تست DSC و تصاویر دوربین مادون قرمز نیز نشان داد که پارچه‌های اصلاح شده با این نانوکپسول‌های حاوی نانوذرات، گرما را به سرعت از طریق پوسته هیبریدی پلی اکریلات/$TiO_2$ به PCMهای محصور شده منتقل می‌کنند تا PCMها



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

بتوانند به اندازه کافی گرمای نهان را جذب و آزاد کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانو ذرات $TiO_2$ می‌تواند پاسخ حرارتی پارچه اصلاح شده با NePCMs/$TiO_2$ را تا حد معینی بهبود بخشد (۱۰۰). هدایت حرارتی نانوکپسول‌های FGO/PMMA- NePCM نیز با افزایش میزان FGO بهبود می‌یابد، که نشان می‌دهد FGO یک افزودنی رسانای حرارتی خوب است. این افزایش هدایت حرارتی، باعث بهبود کریستالیزاسیون NePCM، افزایش آنتالپی ذوب و انجماد و راندمان کپسوله‌سازی نسبت به حالت بدون FGO می‌شود. نتایج تست DSC نیز نشان داد که آنتالپی گرمای نهان پارچه پنبه‌ای اصلاح شده با FGO/PMMA- NePCM بالاتر است. به عبارت دیگر، FGO با کاهش مقاومت حرارتی پوسته PMMA، پاسخ حرارتی پارچه پنبه‌ای را که با FGO/PMMA- NePCM اصلاح شده است، تسریع می‌کند، که نشان می‌دهد FGO پراکنده روی پارچه پنبه‌ای می‌تواند گرما را به طور موثر به PCMهای کپسوله‌شده منتقل کند. PCMها می‌توانند گرمای نهان را به اندازه کافی جذب و آزاد کنند. در نتیجه، افزودن FGO می‌تواند تا حدی عملکرد ذخیره‌سازی/رهاسازی حرارتی پارچه پنبه‌ای را که با FGO/PMMA- NePCM اصلاح شده است، بهبود بخشد (۱۰۱). در مطالعه Zhao و همکاران نیز آنتالپی نانوکپسول‌های $Cu_2O$/PMMA- NePCM بیشتر از نانوکپسول‌های PMMA- NePCM بدست آمد. این افزایش آنتالپی به افزودن نانوذرات $Cu_2O$ نسبت داده می‌شود. به عنوان یک پُرکننده رسانای حرارتی، $Cu_2O$ پاسخ حرارتی PCMها را تسریع می‌کند و اجازه می‌دهد گرمای نهان به طور کامل ذخیره و آزاد شود. افزودن این نانوذرات منجر به افزایش هدایت حرارتی نانوکپسول‌ها و راندمان کپسوله‌سازی شد و هدایت حرارتی پارچه پنبه‌ای را تا ۶۷/۲۵ درصد افزایش داد. گرمای نهان پس از ۱۰۰ بار گرمایش و سرمایش تغییر بسیار ناچیزی داشت که نشاندهنده قابلیت اطمینان خوب این پارچه‌ها در کاربرد مدیریت حرارتی است (۱۰۲).

*- پایداری حرارتی*

پایداری حرارتی یک عامل حیاتی در ارزیابی عملکرد نانوکپسول‌های PCM است که محدوده دمایی نانوکپسول‌ها را از نظر ذخیره‌سازی گرمای نهان و انتشار و خواص تنظیم‌کننده حرارت مشخص می‌کند (۱۰۲). پایداری حرارتی نانوکپسول‌ها با استفاده از آنالیز TGA[1] ارزیابی می‌شود. در مطالعات مورد بررسی، نانوکپسول‌های سنتز شده پایداری حرارتی مناسبی داشتند که افزودن نانوذرات به پوسته آن‌ها در برخی مطالعات، پایداری آن‌ها را بهتر کرده بود.

در مطالعه Karthikeyan و همکاران، نتایج TGA نشان داد که PEG نانوکپسوله شده دارای پایداری حرارتی مناسب برای کاربرد نساجی است (۹۳). در مطالعه دیگری توسط این محقق، نانوکپسول‌ها در مقایسه با موم پارافین خالص، پایداری حرارتی خوبی از خود نشان دادند (۹۴). در مطالعه Chen و همکاران، نتایج TGA نشان داد که دمای شروع اولین مرحله‌ی از دست دادن جرم در مورد نانوکپسول‌های حاوی آندکانوئیک اسید (UA) در مقایسه با UA خالص بالاتر است، که نشان‌دهنده بهبود پایداری حرارتی ماده تغییر فازدهنده پس از نانوکپسوله‌سازی است (۸۱). مطالعه Aftab و همکاران نشان داد که نانوکپسول‌های سنتز شده از نظر حرارتی پایدار هستند و پایداری حرارتی پارچه توسعه یافته تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد است (۹۸). در مطالعه Zhang و همکاران، نتایج TGA نشان داد که دمای تخریب اولیه PCM/$SiO_2$ بالاتر از PCM خالص بود، به این معنی که پوسته سیلیسی خنثی می‌تواند به عنوان لایه محافظ PCM عمل کند و پایداری حرارتی به طور قابل توجهی ارتقا می‌یابد (۵۴). همچنین، در مطالعه Prateepmaneerak و همکاران، پس از ۱۰۰ چرخه آنالیز حرارتی، نتایج نشاندهنده‌ی پایداری حرارتی مناسب نانوکپسول‌ها بود (۹۹). طبق مطالعه‌ی Zhou و همکاران، نانوکپسوله‌سازی PCM در داخل پوسته هیبریدی پلی اکریلات-$TiO_2$ پایداری حرارتی را افزایش داد، با توجه به اینکه NePCM/$TiO_2$ دمای تجزیه

1. Thermal Gravimetric Analysis



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

اولیه بالاتر و کاهش وزن کمتری نسبت به NePCM دارد، بنابراین تأثیر قابل توجهی در بهبود پایداری حرارتی PCMها دارد (۱۰۰). در مطالعه دیگری توسط این محقق، پایداری حرارتی FGO/PMMA-NePCM نسبت به حالت بدون FGO بهتر بود (۱۰۱). در مطالعه Zhao و همکاران، نتایج TGA نشان داد که پوسته هیبریدی $Cu_2O$/PMMA از PCMهای هسته حفاظت بهتری دارد. به عبارت دیگر افزودن نانوذرات به پوسته باعث پایداری حرارتی بهتر نانوکپسول‌ها شد (۱۰۲).

*- استحکام کششی پارچه*

استحکام کششی پارچه، از جمله خصوصیات مکانیکی مهم است که شاخص کیفیت پارچه است. در مطالعات Karthikeyan و همکاران، پارچه‌ها در هر دو جهت تار و پود آزمایش شدند. استحکام کششی پارچه‌های اصلاح شده در مقایسه با پارچه‌های اصلاح نشده کاهش یافت. این محقق در مطالعاتش به این نتیجه رسید که افزودن مواد شیمیایی به پارچه پنبه‌ای منجر به کاهش استحکام کششی پارچه می‌شود (۹۳، ۹۴). اما در مطالعه Zhang و همکاران، استحکام کششی پارچه پنبه‌ای اصلاح شده با مقادیر بیشتری از نانوکپسول‌های $PCM/SiO_2$ روی پارچه افزایش یافت. دو علت برای افزایش استحکام کششی پارچه در این مطالعه مطرح شد: اول اینکه، لایه هیبریدی $PCM/SiO_2$ الیاف را برای تقویت پارچه می‌پوشاند و شبکه‌های اتصال عرضی فشرده‌تری را در بین الیاف ایجاد می‌کند. دوم اینکه، نفوذ $PCM/SiO_2$ در پارچه می‌تواند انرژی را تحت فشار کششی آزاد کرده و خواص مکانیکی منسوجات را بهبود بخشد(۵۴).

*- مقاومت سایشی پارچه*

این آزمایش برای تعیین کاهش جرم پارچه پس از ۱۰۰۰۰ چرخه و همچنین تا زمانی که نخ‌های پارچه روی سطحِ ساییده شده پاره شوند، انجام می‌شود. طبق نتایج مطالعات با افزایش میزان مواد نانوکپسوله شده در پارچه، مقاومت سایشی افزایش می‌یابد (۹۳). در مطالعه Karthikeyan و همکاران، پارچه اصلاح شده با ۴۰ درصد وزنی نانوکپسول، مقاومت سایشی بیشتری نسبت به پارچه اصلاح شده با ۲۰ درصد وزنی از نانوکپسول‌ها داشت. به عبارت دیگر، با افزایش درصد وزنی نانوکپسول‌ها، مقاومت سایشی پارچه افزایش می‌یابد (۹۴).

*- جذب آب توسط پارچه*

در مطالعات Karthikeyan و همکاران، نتایج نشان داد که مدت زمان جذب آب در پارچه اصلاح نشده بیشتر است زیرا الیاف بیرون زده بیشتری روی سطح پارچه دارد. در پارچه اصلاح شده با نانوکپسول‌ها، مواد پوشش‌دهنده باعث کاهش تعداد الیاف بیرون زده در طول فرآیندهای خشک کردن و پخت می‌شوند، بنابراین آب را سریعتر جذب می‌کند. اما میزان این مواد پوششی نیز مهم است زیرا اگر مقدار این مواد پوششی خیلی بیشتر باشد، باعث کاهش تعداد منافذ روی سطح پارچه و کاهش جذب آب می‌شود (۹۳، ۹۴).

*- قابلیت شست و شو*

به منظور بررسی اثر شست و شو بر روی مواد پوششی پارچه، قبل و بعد از چندین بار شست و شوی پارچه، مورفولوژی مواد سطح پارچه را با استفاده از SEM بررسی می‌کنند. در مطالعه Sun و همکاران، تصاویر SEM مربوط به پارچه اصلاح شده با میکروکپسول‌ها بعد از شستشوی اول و پنجم نشان داد که میکروکپسول‌ها هنوز وجود دارند اما به مقدار زیاد نیستند، وقتی کپسول‌ها بزرگ هستند، بیشتر کپسول‌ها روی سطح نخ و پارچه چسبانده می‌شوند اما پس از شست و شوی شدید نمی‌توانند ثابت شوند. فقط آن کپسول‌هایی که به کمک بایندر محکم به نخ‌ها و پارچه چسبانده شده‌اند، شسته نمی‌شوند. اما تصاویر SEM مربوط به پارچه اصلاح شده با نانوکپسول‌ها بعد از شستشوی اول و پنجم نشان داد که نانوکپسول‌ها در مقایسه با میکروکپسول‌هایی که به نخ‌های پارچه متصل می‌شوند، به سطح فیبر متصل شده و محکم‌تر چسبیده‌اند و مقاومت بهتری در برابر شستشو دارند.



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

همچنین نتایج DSC نیز نشان داد که میزان کاهش گرمای نهان در پارچه اصلاح شده با میکروکپسول نسبت به پارچه اصلاح شده با نانوکپسول پس از شست وشو، بیشتر است زیرا هرچه اندازه کپسول‌ها کوچکتر باشد، محکم‌تر به رشته‌های پارچه متصل می‌شوند. بنابراین اگر به جای میکروکپسول‌ها از نانوکپسول‌ها استفاده شود، می‌توانند ویژگی حرارتی پارچه اصلاح شده را بهبود بخشند (۹۵). با توجه به تحقیقات Iqbal و همکاران نیز، نانوکپسول‌ها به طور محکم خود را به فیبر متصل می‌کنند و حتی پس از تعداد زیادی شستشو به بخش جدایی ناپذیر بستر تبدیل می‌شوند. فقط آن کپسول‌هایی جدا می‌شوند که به فیبر محکم نچسبیده‌اند و روی سطح رسوب می‌کنند. در این مطالعه مقایسه پارچه نانوکپسوله نمک گلوبر با پارچه میکروکپسوله پارافین نشان داد که با کاهش اندازه کپسول‌ها، اتصال آنها به پارچه از طریق بایندر متقاطع افزایش می‌یابد. از این رو، گرمای نهان نمک گلوبر نانوکپسوله شده پس از شستشو در مقایسه با پارافین میکروکپسوله بیشتر است، زیرا کپسول‌های نانو اندازه کوچکتری دارند و خود را به پارچه به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از بایندر می‌چسبانند. بنابراین، NePCMها در مقایسه با MePCMها هنگام اعمال بر روی پارچه عملکرد بهتری دارند (۹۶).

طبق مطالعه‌ی Zhou و همکاران، پس از شستشو به مدت ۴۵ دقیقه، مقدار باقیمانده ماده پوششی روی پارچه تقریباً ۹۶/۴ درصد بود که نشان می‌دهد پارچه‌های اصلاح شده با نانوکپسول‌های PCM دوام بهتری دارند (۸۴). در مطالعه Aftab و همکاران، ثبات شستشوی پارچه اصلاح شده، با اندازه‌گیری کاهش وزن پارچه پس از یک چرخه شستشو و ۵۰ چرخه شستشو با مخلوط آب / مواد شوینده ارزیابی شد. پس از شست و شوی پارچه حدود ۲۰ درصد از مواد پوششی از بین رفته و حدود ۱/۵درصد از وزن پارچه در اولین شست و شو کاسته شد. به طور کلی، نتایج نشان داد که آنتالپی تغییر فاز و عملکرد تبدیل حرارتی پس از ۵۰ دوره شستشوی پارچه تحت تأثیر قرار نگرفت (۹۸). در مطالعه‌ی Zhang و همکاران نیز با توجه به نتایج تصاویر FESEM، پارچه پنبه‌ای پس از ۱۰ چرخه شستشو نسبت به نمونه‌های شسته‌نشده تغییر زیادی نداشت. این نشان می‌دهد که مواد موردنظر روی پارچه در هنگام شستشو دوام و ماندگاری خوبی داشته‌اند (۵۴).

### - تنفس پذیری پارچه

تعریق یک فرآیند مهم تنظیم حرارت در زمان افزایش دمای داخلی بدن انسان است. عرق معمولاً از طریق منافذ پارچه تبخیر می‌شود. اگر عرق نتواند خارج شود و در لباس جمع شود، پوشنده احساس ناراحتی می‌کند. به منظور تعیین توانایی عرق‌زدایی لباس یا تنفس، میزان انتقال بخار آب (WVTR [1]) اندازه‌گیری می‌شود. رتبه بندی سطح ورودی WVTR پارچه‌های قابل تنفس باید در محدوده ۱۵۰۰-۵۰۰۰ گرم در متر مربع در روز باشد، نرخ بالای WVTR در پارچه پنبه‌ای نشان دهنده خاصیت تنفس پذیری بالای آن است (۱۰۳). در مطالعه‌ی Iamphaojeen و Siriphannon نمونه‌های پارچه اصلاح شده با نانوکپسول‌های اِن اکتادکان، تنفس پذیری خوبی داشتند (۹۷).

### - نشت PCM

پایداری شکل مواد تغییر فاز دهنده‌ی نانوکپسوله شده، یک شاخص حیاتی برای ارزیابی عملکرد کپسول‌ها به منظور جلوگیری از نشت PCMهای ذوب شده است که با استفاده از دوربین دیجیتال انجام می‌شود. نتایج مطالعات Zhou و Zhao نشان داد که نانوکپسول‌ها هیچ نشتی ندارند و همچنان می‌توانند شکل اصلی خود را در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد (بالاتر از نقطه ذوب PCMs) به مدت ۱۰ دقیقه حفظ کنند. این نشان دهنده مقاومت خوب پوسته نانوکپسول‌ها است. تحقیقات ثابت کرده‌اند که نانوکپسوله‌سازی روشی ایده آل برای جلوگیری از نشت PCMهای ذوب شده است (۱۰۱، ۱۰۲). در مطالعه Zhang و همکاران، نِرخ نشتِ PCM، ۸۹/۳۳ درصد کاهش یافت زیرا لایه پوسته سیلیکا در نانوکپسول‌ها،

1. Water vapor transmission rate



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

مانع نشت PCM می‌شود، که نشان دهنده‌ی پایداری ساختاری و کارایی مانع پوسته‌های سیلیسی است (۵۴).

## محدودیت

این مطالعه، با برخی محدودیت‌ها همراه بود که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به عدم دسترسی به برخی مقالات به علت پرداخت هزینه و مطالعه مقالات فقط به زبان انگلیسی اشاره نمود. همچنین، در تمام مقالات همه‌ی خصوصیات تحت تاثیر مواد تغییر فازدهنده در پارچه‌های پنبه‌ای (مانند پایداری حرارتی، نشت PCM، استحکام کششی، مقاومت سایشی، قابلیت شست و شو، تنفس پذیری و جذب آب توسط پارچه) مورد بررسی قرار نگرفته بود که لازم است در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

## نتیجه گیری

با توجه به اینکه گرمایش زمین در حال تشدید است و انسان در چنین شرایطی در محیط‌های گرم دچار گرمازدگی و عوارض ناشی از آن می‌شود. استفاده از لباس‌هایی با خواص تنظیم حرارتی خوب نیاز ضروری محسوب می‌شود. امروزه تحقیقات بر روی تولید منسوجاتی متمرکز است که خاصیت تنظیم حرارتی داشته باشند تا بتوان از آن‌ها برای تولید لباس‌های مناسب که آسایش حرارتی انسان را تامین کند، استفاده نمود. در این بین، استفاده از مواد تغییر فازدهنده در لباس‌ها به عنوان موادی که قابلیت جذب گرما در طول تغییر فاز (از جامد به مایع) را دارند و باعث کاهش گرمای رسیده به بدن انسان می‌شوند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مرور سیستماتیک تلاش شد تا به بررسی مطالعاتی پرداخته شود که مواد تغییر فازدهنده را نانوکپسوله‌سازی کرده و بر روی پارچه پنبه‌ای اعمال نمودند تا پارچه خاصیت تنظیم حرارتی داشته باشد. نتایج این مرور سیستماتیک نشان داد که:

-نانوکپسول‌های سنتز شده، شکل کروی و ساختار هسته-پوسته داشته و به خوبی وارد ساختار پارچه می‌شوند.

-گرمای نهان پارچه‌های اصلاح شده باNePCM افزایش می‌یابد. اما وجود پوسته باعث می‌شود گرمای نهان NePCM در مقایسه با PCM خالص کمتر شود.

-استفاده از نانوذرات در پوسته نانوکپسول‌ها باعث افزایش هدایت حرارتی و گرمای نهان و بهبود عملکرد حرارتی پارچه می‌شود.

-در مقایسه با MePCM، پارچه‌های اصلاح شده با NePCM گرمای نهان بهتر، دوام بیشتر و در شست شوهای مکرر ماندگاری بهتری دارند.

-میزان سوپرکولینگ درNePCM ها نسبت بهPCM خالص کمتر است.

-نانوکپسول‌های سنتز شده پایداری حرارتی مناسبی داشتند که افزودن نانوذرات به پوسته‌ی آن‌ها در برخی مطالعات، پایداری آن‌ها را بهتر کرده بود. افزودن نانوذرات به پوسته نانوکپسول‌ها به مقدار بهینه می‌تواند خصوصیات حرارتی را ارتقاء دهد و اندازهNePCM ها را کوچک‌تر کند. اما مقدار افزودن نانوذرات بسیار مهم است چون اگر از مقدار بهینه بیشتر شود، ممکن است نتایج عکس دهد.

-استحکام کششی پارچه با افزودن NePCM در برخی مطالعات کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است که نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر می‌باشد.

-در پارچه‌های اصلاح شده با NePCM، مقاومت سایشی افزایش می‌یابد.

-در مطالعات مورد بررسی، دوام پارچه‌ها حداکثر در برابر ۵۰ بار شست و شو بررسی شده بود و نتایج تمام مطالعات نشان‌دهنده تغییرات کم پارچه است. به عبارت دیگر، نانوکپسول‌ها کمتر از هم جدا می‌شوند و مقاومت خوبی در برابر شستشو دارند.

-پارچه‌های اصلاح شده با NePCM،تنفس پذیری خوبی دارند.

- نانوکپسوله‌سازی روشی ایده آل برای جلوگیری از نشت PCMهای ذوب شده است.

علیرغم مزایای استفاده از نانوکپسوله‌سازی PCM،



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

کاربرد واقعی این پارچه‌ها و تبدیل آن‌ها به لباس‌های تنظیم‌کننده حرارت نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. از این رو پیشنهاد می‌شود:

-خاصیت انعطاف پذیری پارچه‌های پنبه‌ای اصلاح شده با NePCM مورد مطالعه و بررسی بیشتر قرار بگیرد.

-ماندگاری NePCM روی پارچه در شست و شوهای مکرر امری ضروری در طراحی لباس است. پیشنهاد می‌شود دوام، کارایی و سایر ویژگی‌های پارچه‌های اصلاح شده با NePCM با پارچه‌های اصلاح شده با نانوالیاف PCMالکتروریسی‌شده جهت طراحی لباس مقایسه شود تا از بهترین روش تولید پارچه‌های تنظیم‌کننده حرارتی بهره برده شود.

- پیشنهاد می‌شود تحقیقات در زمینه طراحی لباس‌های تنظیم‌کننده حرارت حاصل از پارچه‌های اصلاح شده با NePCM و بررسی عملکرد خنک کنندگی آن‌ها در اتاقک شرایط جوی بر روی آدمک حرارتی یا انسان گسترش یابد.


## تشکر و قدردانی

نویسندگان، از تمام کسانی که از تکمیل این پروژه حمایت کردند، نهایت تقدیر و تشکر را دارند.


## تعارض منافع

بین نویسندگان هیچ‌گونه تعارضی در منافع وجود ندارد.


## منابع مالی

ندارد.


## REFERENCES


1. Zhang G. Ergonomics and Its Application. China Mach Express. 2008:192-3.
2. Parsons K. Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance: CRC press; 2014.
3. Song W, Wang F, Wei F. Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment. Build Environ. 2016;100:92-101.
4. Zheng G, Zhu N, Tian Z, Chen Y, Sun B. Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments. Saf Sci. 2012;50(2):228-39.
5. Yang X, Zheng J, Bai Y, Tian F, Yuan J, Sun J, et al. Using lymphocyte and plasma Hsp70 as biomarkers for assessing coke oven exposure among steel workers. Environ Health Perspect. 2007;115(11):1573-7.
6. Cheung SS, McLellan TM, Tenaglia S. The thermophysiology of uncompensable heat stress: physiological manipulations and individual characteristics. Sports Med. 2000;29:329-59.
7. Venugopal V, Chinnadurai JS, Lucas RA, Kjellstrom T. Occupational heat stress profiles in selected workplaces in India. Int J Environ Res Public Health. 2016;13(1):89.
8. Ramsey JD. Task performance in heat: a review. Ergonomics. 1995;38(1):154-65.
9. Meese G, Kok R, Lewis M, Wyon D. A laboratory study of the effects of moderate thermal stress on the performance of factory workers. Ergonomics. 1984;27(1):19-43.
10. Wang S-X, Li Y, Tokura H, Hu J-Y, Kwok Y-L, Au R. Effect of phase change materials on temperature and moisture distributions in clothing during exercise in cold environment. J Fiber Bioeng Inform. 2008;1(1):29-40.
11. Kaplan S, Okur A. Thermal comfort performance of sports garments with objective and subjective measurements. Indian J Fibre Text Res. 2012;37(1):46-54.
12. Das A, Alagirusamy R. Science in clothing comfort: Woodhead Publishing India Pvt Limited New Delhi; 2010.
13. Epstein Y, Moran DS. Thermal comfort and the heat stress indices. Ind Health. 2006;44(3):388-98.
14. Tao X. Smart fibres, fabrics and clothing: fundamentals and applications: Elsevier; 2001.
15. Holmer I. Protective clothing in hot environments. Ind Health. 2006;44(3):404-13.
16. Hanson M. Development of a draft British standard:




[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

the assessment of heat strain for workers wearing personal protective equipment. Ann Occup Hyg. 1999;43(5):309-19.

17. Parsons K. International standards for the assessment of the risk of thermal strain on clothed workers in hot environments. Ann Occup Hyg. 1999;43(5):297-308.
18. Bishop P, Gu D, Clapp A. Climate under impermeable protective clothing. Int J Ind Ergon. 2000;25(3):233-8.
19. Davis J-K, Bishop PA. Impact of clothing on exercise in the heat. Sports Med. 2013;43:695-706.
20. Sajjad U, Hamid K, Sultan M, Abbas N, Ali HM, Imran M, et al. Personal thermal management-A review on strategies, progress, and prospects. Int J Heat Mass Transf. 2022;130:105739
21. Gavin TP. Clothing and thermoregulation during exercise. Sports Med. 2003;33:941-7.
22. Xi G, Wang J, Luo G, Zhu Y, Fan W, Huang M, et al. Healable superhydrophobicity of novel cotton fabrics modified via one-pot mist copolymerization. Cellulose. 2016;23:915-27.
23. Wang L, Xi G, Wan S, Zhao C, Liu X. Asymmetrically superhydrophobic cotton fabrics fabricated by mist polymerization of lauryl methacrylate. Cellulose. 2014;21:2983-94.
24. Emam HE, Bechtold T. Cotton fabrics with UV blocking properties through metal salts deposition. Appl Surf Sci. 2015;357:1878-89.
25. Smith B, Block I. Natural fiber. Text Perspect. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1982:70-156.
26. Onofrei E, Rocha A, Catarino A. Textiles integrating PCMs–A review. Bul Inst Politeh Iasi Sect Stiinte Socio Uman. 2010;60(2):99-107.
27. Zhao M, Gao C, Wang F, Kuklane K, Holmér I, Li J. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. Int J Ind Ergon. 2013;43(3):232-7.
28. Rahimi E, Babapoor A, Moradi G, Kalantari S, Esmaeelpour MM. Personal cooling garments and phase change materials: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2024;190:114063.
29. Zhao M, Gao C, Wang F, Kuklane K, Holmer I, Li J. The torso cooling of vests incorporated with phase change materials: a sweat evaporation perspective. Text Res J. 2013;83(4):418-25.
30. Gao C, Kuklane K, Holmér I. Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area. Ergonomics. 2010;53(5):716-23.
31. Gao C, Kuklane K, Wang F, Holmér I. Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective. Indoor Air. 2012;22(6):523-30.
32. Zhao M, Gao C, Li J, Wang F. Effects of two cooling garments on post-exercise thermal comfort of female subjects in the heat. Fibers Polym. 2015;16:1403-9.
33. Zhu S, Nguyen MT, Yonezawa T. Micro-and nano-encapsulated metal and alloy-based phase-change materials for thermal energy storage. Nanoscale Adv. 2021;3(16):4626-45.
34. Sarier N, Onder E. The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics. Thermochim Acta. 2007;452(2):149-60.
35. Shin Y, Son K, Yoo D. Development of natural dyed textiles with thermo-regulating properties. Thermochim Acta. 2010;511(1-2):1-7.
36. Keyan K, Ramachandran T, Shamugasundaram O, Balasubramaniam M, Ragavendra T. Microencapsulation of PCMs in textiles: a review. J Text App Technol Manag. 2012;7(3).
37. Iamphaojeen Y, Siriphannon P. Nanoencapsulation of n-Octadecane phase change material in self-assembled polyelectrolyte by soft solution technique. Int J Polym Mater Polym Biomater. 2014;63(17):918-22.
38. Sajawal M, Rehman T-u, Ali HM, Sajjad U, Raza A, Bhatti MS. Experimental thermal performance analysis of finned tube-phase change material based double pass solar air heater. Case Stud Therm Eng. 2019;15:100543.
39. Rehman T-u, Ali HM. Thermal performance analysis of metallic foam-based heat sinks embedded with RT-54HC paraffin: an experimental investigation for electronic cooling. J Therm Anal Calorim. 2020;140:979-90.
40. Ali HM. Experimental investigation on paraffin wax integrated with copper foam based heat sinks for electronic components thermal cooling. Int J Heat Mass Transf. 2018;98:155-62.
41. Ali HM, Saieed A, Pao W, Ali M. Copper foam/PCMs



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

based heat sinks: an experimental study for electronic cooling systems. Int J Heat Mass Transf. 2018;127:381-93.

42. Wei G, Wang G, Xu C, Ju X, Xing L, Du X, et al. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2018;81:1771-86.
43. Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. Energy. 2018;144:341-78.
44. Khan Z, Khan Z, Ghafoor A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. Energy Convers Manag. 2016;115:132-58.
45. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renew Sustain Energy Rev. 2009;13(2):318-45.
46. Kasaeian A, Pourfayaz F, Khodabandeh E, Yan W-M. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review. Energy Build. 2017;154:96-112.
47. Zhang G, Cai C, Wang Y, Liu G, Zhou L, Yao J, et al. Preparation and evaluation of thermo-regulating bamboo fabric treated by microencapsulated phase change materials. Text Res J. 2019;89(16):3387-93.
48. Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Convers Manag. 2004;45(9-10):1597-615.
49. Mondal S. Phase change materials for smart textiles–An overview. Appl Therm Eng. 2008;28(11-12):1536-50.
50. Hasan A, McCormack S, Huang M, Norton B. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. Sol Energy. 2010;84(9):1601-12.
51. Uribe D, Vera S. Assessment of the effect of phase change material (PCM) glazing on the energy consumption and indoor comfort of an office in a semiarid climate. Appl Sci. 2021;11(20):9597.
52. Alehosseini E, Jafari SM. Micro/nano-encapsulated phase change materials (PCMs) as emerging materials for the food industry. Trends Food Sci Technol. 2019;91:116-28.
53. Yang L, Jin X, Zhang Y, Du K. Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials. J Clean Prod. 2021;287:124432.
54. Zhang C, Hu C, Chang S, Zhan J, Shen J, Shen H. Silica-Based Core-Shell Nanocapsules: A Facile Route to Functional Textile. Processes. 2022;10(1):6.
55. Rehman AU, Ghafoor N, Sheikh SR, Kausar Z, Rauf F, Sher F, et al. A study of hot climate low-cost low-energy eco-friendly building envelope with embedded phase change material. Energies. 2021;14(12):3544.
56. Fallahi A, Guldentops G, Tao M, Granados-Focil S, Van Dessel S. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. Appl Therm Eng. 2017;127:1427-41.
57. Zalba B, Marın JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Appl Therm Eng. 2003;23(3):251-83.
58. Kenisarin MM. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. Renew Sustain Energy Rev. 2010;14(3):955-70.
59. Pause B. Driving more comfortably with phase change materials. Tech Text Int. 2002;11(2):24-7.
60. Agbossou A, Zhang Q, Sebald G, Guyomar D. Solar micro-energy harvesting based on thermoelectric and latent heat effects. Part I: Theoretical analysis. Sens Actuators A Phys. 2010;163(1):277-83.
61. Alkan C. Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage. Thermochim Acta. 2006;451(1-2):126-30.
62. Tyagi VV, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: A state of art. Renew Sustain Energy Rev. 2007;11(6):1146-66.
63. Eddhahak-Ouni A, Drissi S, Colin J, Neji J, Care S. Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs). Appl Therm Eng. 2014;64(1-2):32-9.
64. Wu W, Wu W, Wang S. Form-stable and thermally induced flexible composite phase change material for thermal energy storage and thermal management applications. Appl Energy. 2019;236:10-21.



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

65. Aftab W, Huang X, Wu W, Liang Z, Mahmood A, Zou R. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications. Energy Environ Sci. 2018;11(6):1392-424.
66. Yang J, Tang L-S, Bai L, Bao R-Y, Liu Z-Y, Xie B-H, et al. High-performance composite phase change materials for energy conversion based on macroscopically three-dimensional structural materials. Mater Horiz. 2019;6(2):250-73.
67. Jiang F, Wang X, Wu D. Design and synthesis of magnetic microcapsules based on n-eicosane core and Fe3O4/SiO2 hybrid shell for dual-functional phase change materials. Appl Energy. 2014;134:456-68.
68. Li A, Dong C, Dong W, Atinafu DG, Gao H, Chen X, et al. Hierarchical 3D reduced graphene porous-carbon-based PCMs for superior thermal energy storage performance. ACS Appl Mater Interfaces. 2018;10(38):32093-101.
69. Liu H, Wang X, Wu D. Fabrication of graphene/TiO2/paraffin composite phase change materials for enhancement of solar energy efficiency in photocatalysis and latent heat storage. ACS Sustain Chem Eng. 2017;5(6):4906-15.
70. Chen Z, Wang J, Yu F, Zhang Z, Gao X. Preparation and properties of graphene oxide-modified poly (melamine-formaldehyde) microcapsules containing phase change material n-dodecanol for thermal energy storage. J Mater Chem A Mater. 2015;3(21):11624-30.
71. Sarı A, Alkan C, Bilgin C. Micro/nano encapsulation of some paraffin eutectic mixtures with poly (methyl methacrylate) shell: Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties. Appl Energy. 2014;136:217-27.
72. Sarier N, Onder E. Organic phase change materials and their textile applications: An overview. Thermochim Acta. 2012;540:7-60.
73. Wang T, Wang S, Geng L, Fang Y. Enhancement on thermal properties of paraffin/calcium carbonate phase change microcapsules with carbon network. Appl Energy. 2016;179:601-08.
74. Liu G, Xie B, Fu D, Wang Y, Fu Q, Wang D. Preparation of nearly monodisperse microcapsules with controlled morphology by in situ polymerization of a shell layer. J Mater Chem. 2009;19(36):6605-9.
75. Konuklu Y, Paksoy HO, Unal M, Konuklu S. Microencapsulation of a fatty acid with Poly (melamine–urea–formaldehyde). Energy Convers Manag. 2014;80:382-90.
76. Borreguero AM, Carmona M, Sanchez ML, Valverde JL, Rodriguez JF. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio. Appl Therm Eng. 2010;30(10):1164-9.
77. Konuklu Y, Paksoy HO, Unal M. Nanoencapsulation of n-alkanes with poly (styrene-co-ethylacrylate) shells for thermal energy storage. Appl Energy. 2015;150:335-40.
78. Su JF, Wang LX, Ren L, Huang Z, Meng XW. Preparation and characterization of polyurethane microcapsules containing n-octadecane with styrene-maleic anhydride as a surfactant by interfacial polycondensation. J Appl Polym Sci. 2006;102(5):4996-5006.
79. Zhao C-Y, Zhang GH. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): fabrication, characterization and applications. Renew Sustain Energy Rev. 2011;15(8):3813-32.
80. Borreguero A, Valverde J, Rodríguez J, Barber A, Cubillo J, Carmona M. Synthesis and characterization of microcapsules containing Rubitherm® RT27 obtained by spray drying. Chem Eng J. 2011;166(1):384-90.
81. Chen C, Chen Z, Zeng X, Yu F. Self-assembly of nanoencapsulated undecanoic acid on cotton fiber for thermoregulating textiles. RSC Adv. 2019;9(18):10024-9.
82. Zhang N, Yuan Y. Synthesis and thermal properties of nanoencapsulation of paraffin as phase change material for latent heat thermal energy storage. Energy Built Environ. 2020;1(4):410-6.
83. Pielichowska K, Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. Prog Mater Sci. 2014;65:67-123.
84. Zhou J, Cui Y, Yao H, Ma J, Ren H. Nanocapsules containing binary phase change material obtained via miniemulsion polymerization with reactive emulsifier: synthesis, characterization, and application in fabric



[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]

finishing. Polym Eng Sci. 2019;59(s2):E42-E51.

85. Sheng N, Zhu C, Saito G, Hiraki T, Haka M, Hasegawa Y, et al. Development of a microencapsulated Al–Si phase change material with high-temperature thermal stability and durability over 3000 cycles. J Mater Chem A Mater. 2018;6(37):18143-53.
86. Graham M, Shchukina E, De Castro PF, Shchukin D. Nanocapsules containing salt hydrate phase change materials for thermal energy storage. J Mater Chem A Mater. 2016;4(43):16906-12.
87. Sarı A, Alkan C, Döğüşcü DK, Biçer A. Micro/nano-encapsulated n-heptadecane with polystyrene shell for latent heat thermal energy storage. Sol Energy Mater Sol Cells. 2014;126:42-50.
88. Jamekhorshid A, Sadrameli S, Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. Renew Sustain Energy Rev. 2014;31:531-42.
89. Fang Y, Kuang S, Gao X, Zhang Z. Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials. Energy Convers Manag. 2008;49(12):3704-7.
90. Li MG, Zhang Y, Xu YH, Zhang D. Effect of different amounts of surfactant on characteristics of nanoencapsulated phase-change materials. Polym Bull (Berl). 2011;67:541-52.
91. Iqbal K, Khan A, Sun D, Ashraf M, Rehman A, Safdar F, et al. Phase change materials, their synthesis and application in textiles—a review. J Text Inst. 2019;110(4):625-38.
92. Singh N, Sheikh J. Microencapsulation and its application in production of functional textiles. Indian J Fibre Text Res. 2020;45:495-509.
93. Karthikeyan M, Ramachandran T, Sundaram OS. Nanoencapsulated phase change materials based on polyethylene glycol for creating thermoregulating cotton. J Ind Text. 2014;44(1):130-46.
94. Karthikeyan M, Ramachandran T, Shanmugasundaram O. Synthesis, characterization, and development of thermally enhanced cotton fabric using nanoencapsulated phase change materials containing paraffin wax. J Text Inst. 2014;105(12):1279-86.
95. Sun D, Iqbal K. Synthesis of functional nanocapsules and their application to cotton fabric for thermal management. Cellulose. 2017;24:3525-43.
96. Iqbal K, Sun D. Synthesis of nanoencapsulated Glauber's salt using PMMA shell and its application on cotton for thermoregulating effect. Cellulose. 2018;25(3):2103-13.
97. Iamphaojeen Y, Siriphannon P. Adjustable thermal barrier of cotton fabric by multilayer immobilization of PCM nanocapsules. Cellulose. 2018;25:3649-61.
98. Aftab W, Khurram M, Jinming S, Tabassum H, Liang Z, Usman A, et al. Highly efficient solar-thermal storage coating based on phosphorene encapsulated phase change materials. Energy Storage Mater. 2020;32:199-207.
99. Prateepmaneerak N, Chaiyasat A, Kaewpa D, Chaiyasat P. Innovative bifunctional heat storage nanocapsules containing polymerizable surfactant for antimicrobial thermoregulating clothes. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp. 2022;653:129954.
100. Zhou J, Zhao J, Cui Y, Cheng W. Synthesis of bifunctional nanoencapsulated phase change materials with nano-TiO2 modified polyacrylate shell for thermal energy storage and ultraviolet absorption. Polym Int. 2020;69(2):140-8.
101. Zhou J, Zhao J, Li H, Cui Y, Li X. Enhanced thermal properties for nanoencapsulated phase change materials with functionalized graphene oxide (FGO) modified PMMA. Nanotechnology. 2020;31(29):295704.
102. Zhao J, Zhou J, Li H, Li X. Cuprous oxide modified nanoencapsulated phase change materials fabricated by RAFT miniemulsion polymerization for thermal energy storage and photothermal conversion. Powder Technol. 2022;399:117189.
103. Save NS, Jassal M, Agrawal AK. Polyacrylamide based breathable coating for cotton fabric. J Ind Text. 2002;32(2):119-38.

[ Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2024-11-21 ]