مروری بر کاربرد مواد هوشمند در منسوجات

نیلوفر رفیع زاده زعیم[۲،۱]*، کاملیا یعقوبی[۳]، رامین خواجوی[۴،۱]

[۱]دانشکده فنی و مهندسی، گروه پلیمر، مهندسی شیمی و نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

[۲]باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان ، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳]دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۴]مرکز تحقیقات فناوری نانو، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

niloofar_rafizadeh@yahoo.com, n_rafizadeh@azad.ac.ir

تارخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

چکیده

پیشرفت و ارتقای جوامع بشری، باعث تغییرات و تحولات گسترده‌ای در مواد و مصنوعات آن‌ها شده و منجر به ظهور مواد هوشمند به‌عنوان نقطه عطفی در سیر تحولات و شده است. گستره استفاده مواد هوشمند در صنعت نساجی بسیار محسوس بوده و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است که در نهایت منجر به معرفی منسوجات هوشمند به بازار مصرف گردید. هدف اصلی این تحقیق، معرفی و دسته‌بندی مواد هوشمند کاربردی در منسوجات است. در این راستا ابتدا مبانی نظری در مورد مواد هوشمند مطرح و سپس دسته بندی آن‌ها از دیدگاه‌های مختلف بررسی گردید. این مواد در مدلهای رایج نظیر مدل بیولوژیکی به سه دسته (حسگرها/عصب-ها و نورون-های آوران)، عملگرها (عضلات) و پردازشگرها(مغز)، و یا براساس مدل ساختاری مجدد به سه ساختار (حسی یا انفعالی، عملگرا یا فعال و هوشمند یا انطباقی) تقسیم می‌شوند. ولیکن در تحقیق حاضر جهت تطابق بیشتر با منسوجات مدلی کاربردی معرفی شد که مواد هوشمند را به دو دسته پاسخگر عملگرا و یا مبدل انرژی تقسیم می‌نماید و کلیه مواد هوشمند ذیل آنها دسته بندی شدند. برای هرکدام از مواد مثالی کاربردی و یا مرتبط با منسوجات آورده شد. نتیجه گیری شد که مدل کاربردی نسبت به مدل‌های موجود همگرایی بیشتری با منسوجات دارد. از سوی دیگر مشخص شد گردید که تداوم رشد منسوجات هوشمند با سرعتی فزآینده ادامه دارد هرچند که در برخی از حوزه ها هنوز نیاز به تحقیقات و تجربیات بیشتر محسوس است.

کلمات کلیدی: مواد هوشمند، منسوجات هوشمند، مواد پاسخگر، مواد مبدل انرژی، محرک.

Application of smart materials for textile: A review

Niloofar. Rafizadeh Zaeem[1,2*], Kamelia.Yaghoubi[3], Ramin. Khajavi[1,4]

[1]Faculty of Engineering, Department of Polymer, Chemical Engineering and Textile, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[3] Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[4] Nanotechnology Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran
niloofar_rafizadeh@yahoo.com, n_rafizadeh@azad.ac.ir

Abstract

The progress and improvement of human societies caused extensive changes and transformations in materials and their artifacts and led to the emergence of smart materials as a turning point in the course of developments. The range of use of smart materials in the textile industry is very noticeable and extensive research has been done in this field, which finally led to the introduction of smart textiles to the consumer market. The main purpose of this research is the Introduction and classification of smart materials applied in textiles. In this regard, first The theoretical foundations of smart materials are presented, and then their classification from different points of view. These materials are divided into three categories in common models such as the biological model(sensors/nerves and afferent neurons), operators (muscles) and processors (brain), or the structural model (sensory or passive, pragmatic or active, and intelligent or adaptive). But in the present research, in order to be more consistent with textiles a practical model was introduced, which divides smart materials into two categories: practical responders or energy converters, and all smart materials were categorized under them. For each material, a practical example or one related to textiles was given. It was concluded that the applied model is more convergent than the existing models with textiles. On the other hand, it was found that the growth of smart textiles continues at an increasing pace, although in some areas, there is still a need for more research and experience.

Keywords: smart materials, smart textiles, reactive materials, energy converting materials, stimulus

۱-مقدمه

منسوجات دارای قدمت تاریخی بسیار زیادی بوده و از مصنوعات اولیه بشر محسوب می‌شوند که علت آن نیاز مبرم به پوششی محافظت کننده در برابر سرما و گرما و موارد ضرروری دیگر بوده است. منسوجات در طول تاریخ گسل‌های پیشرفتی زیادی را تجربه کرده-اند و از سمت منسوجات معمول(البسه، دکوراسیون داخلی و خارجی) به سمت منسوجات تخصصی نظیرمنسوجات صنعتی(جلیقه‌های ضدگلوله، دستکش‌های ضد برش)، منسوجات حفاظتی(البسه ضد حریق، مقاوم در برابر تشعشع و عایق الکتریکی)، منسوجات پزشکی(گان، ماسک تنفسی، زخم‌پوش‌های آنتی‌باکتریال، منسوجات بندآورنده خون) ، منسوجات استتاری(استتار تسلیحات نظامی، لباس‌های استتاری) و در نهایت به سمت منسوجات هوشمند(گجت های پوشیدنی، البسه تنظیم کننده حراراتی، منسوجات رصد کننده سلامت بدن) پیش رفته اند[۱-۵]. منسوجات هوشمند به دو صورت تعبیه قطعات هوشمند بر روی آن و یا هوشمندسازی درجا تولید می‌شود در هر دو مدل یکی از المان های اصلی مواد هوشمند هستند. این گونه مواد هوشمند در دوره‌ای بین دو عصر پلاستیک و کامپوزیت قرار می‌گیرند. تاکنون تعاریف و مدل‌های گوناگونی برای دسته‌بندی این‌گونه مواد ارائه شده است. به‌عنوان مثال در مدل بیولوژیکی ساختار بدن موجودی زنده نظیر انسان مبنا قرار گرفته و با کمک آن مواد هوشمند را به سه دسته حسگرها/عصب‌ها و نورون‌های آوران، عملگرها/ عضلات و پردازشگرها/مغز/دستگاه‌عصبی-مرکزی(CNS) می نمایند. یا در مدلی دیگر که به مدل ساختاری معروف است این‌گونه مواد براساس عملکرد ساختارشان به ساختارهای حسی/ انفعالی، ساختارهای عملگرا / فعال و ساختارهای هوشمند/ انطباقی تقسیم بندی می‌شوند[۶-۸]. معمولا حس کردن، عمل کردن یا پردازش کردن ماده هوشمند براساس تغییری در یکی از عوامل محیط اطراف که به نام" عامل محرک" شناخته می‌شود صورت می‌پذیرد. عامل تغییر کننده در محیط اطراف یا همان عامل محرک می‌تواند بواسطه تغییرات کرنشی، تنشی، حرارتی، شیمیایی (شامل pH)، الکتریکی، مغناطیسی، فشار هیدرواستاتیکی و تابشی بر روی ماده هوشمند اثر بگذارد و منجر شود که آن ماده حس کند یا واکنش دهد/ پردازشی را انجام بدهد[۷-۱۰]. در ادامه با توجه به‌آن‌که قالب پذیری منسوجات در مدل‌های رایج مواد هوشمند به سختی انجام می‌پذیرد مدلی نوین تحت نام مدل کاربردی تقسیم‌بندی مواد هوشمند جهت منسوجات ارائه می‌گردد. براساس این مدل مواد هوشمند ذیل این دو دسته قرار گرفتند و منسوج حاصله از هر ماده معرفی گردید. در نهایت کاربرد هر منسوج معرفی شده در صنایع مختلف بررسی شد.

۲-معرفی مدل کاربردی جهت تقسیم بندی مواد هوشمند

مواد هوشمند با توجه به تنوع گسترده‌ای که دارند و با در نظر گرفتن آن‌که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، قالب‌بندی‌های/مدل‌های متفاوتی تا به امروز برای آن‌ها ارائه گردیده است. شاید بتوان گفت که هر دسته بندی/ مدلی جهت صنعت/صنایع خاصی مناسب‌تر است. اما تاکنون جهت تقسیم بندی این مواد بطوری‌که متناسب با منسوجات باشند اقدام مشخصی انجام نگرفته است. در این تحقیق مدلی جهت دسته بندی کارامد این مواد تحت نام مدل کاربردی ارائه شده که انتظار می‌رود جهت منسوجات دارای انطباق بیشتری باشد. زیرا بجای‌آن‌که مواد به سه دسته تقسیم شوند آن‌ها در دو دسته ادغام می‌گردند: دسته اول مواد هوشمند پاسخگر و دسته دوم مواد مبدل انرژی که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند[۱۳-۱۱].

۱-۲-موادهوشمند پاسخگر

مواد هوشمند پاسخگر را می‌توان به مواد پاسخگر نوری، تغییر فازی، هادی، رئولوژیکی، کریستال مایع تقسیم نمود.

۱-۱-۲-مواد هوشمند پاسخگر نوری

خواص نوری اینگونه مواد نظیر جذب، بازتاب یا پراکندگی نور با تغییر انرژی دریافتی متفاوت می‌گردد. بنابراین خواص نوری ماده تحت تاثیر محرک بیرونی (مانند: گرما، نور یا شرایط شیمیایی)، تغییر می‌یابد که اغلب به صورت دگرگونی رنگی مشهود می‌گردند[۱۴و۱۵]. این دسته از مواد را می‌توان بصورت مواد فتوکرومیک، ترموکرومیک، مکانوکرومیک، کموکرومیک و الکتروکرومیک دسته بندی نمود[۱۶و۱۷]. در جدول ۱ برخی از این مواد به‌همراه محرک های مرتبط آورده شده است، در تمامی موارد پاسخ در ماده پاسخگر نوری به‌صورت تغییر رنگ نمود پیدا می‌کند.

-مواد فتوکرومیک: معمولاً خصوصیات ذاتی مواد فتوکرومیک با جذب انرژی در محدوده ماوراءبنفش، تغییرمی‌کند. بسته به انرژی برخوردی، ماده بین جذب یا بازتاب محدوده‌های طول موجی متفاوتی از طیف مرئی واکنش نشان می‌دهد. مولکول‌های رنگ‌های فتوکرومیک در وضعیت غیرفعال/پایه به صورت بی‌رنگ/کم‌رنگ هستند. وقتی در معرض تابش فوتون‌هایی از یک طول موج خاص(نظیر ماوراءبنفش) قرار می‌گیرند، ساختار مولکولی به حالت برانگیخته درآمده و شروع به بازتاب در طول موج‌های بلندتری در محدوده مرئی می‌نماید. با قطع تابش بر روی آن مولکول از حالت بر انگیخته خارج شده و به حالت پایه که بی‌رنگ/کم‌رنگ است برمی گردد[۱۱ و ۱۹].

جدول ۱- مواد هوشمند پاسخگر نوری به‌همراه محرک آن‌ها[۶]

محرک	نام ماده هوشمند
تغییرات (اختلاف) حرارتی (دمایی)	ترمو کرومیک‌ها
تابش (نور)	فتوکرومیک‌ها
تغییر فرم (شکل)	مکانوکرومیک ها
تغلیظ شیمیایی	کموکرومیک ها
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	الکتروکرومیک‌ها
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	کریستال‌های مایع
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	ذرات معلق خاص
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	الکترورئولوژیکال[۱]
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	مگنتورئولوژیکال[۲]
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	الکترولومینست‌ها[۳]
تابش (اشعه)	فوتولومینسنت‌ها[۴]
تغلیظ شیمیایی	کمولومینسنت‌ها[۵]
تغییرات (اختلاف) حرارتی (دمایی)	ترمولومینسنت‌ها
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	دیود ساطع‌کننده نور[۶]
تابش (نور)	سلول فتوولتائیک
تغییر فرم (شکل)	پیزوالکتریک
تغییرات (اختلاف) حرارتی (دمایی)	پایروالکتریک
تغییرات (اختلاف) حرارتی (دمایی)	ترموالکتریک
اختلاف‌پتانسیل الکتریکی	الکترواستریکتیو[۷]
میدان مغناطیسی	مگنتواستریکتیو[۸]

چنگ و همکاران (۲۰۰۷)، با بکارگیری رنگ فتوکرومیک سیلیکا هیبریدی سل - ژل بر روی پارچه ی پشمی، توانستند به منسوج فتوکرومیک دست پیدا کنند. متغیر دیگر مورد بررسی در این تحقیق نوع سیلیکا بوده است، که تاثیر آن را بر خواص زیر دستی پارچه و عملکرد فتوکرومیکی مورد بررسی قرار دادند. به این نتیجه رسیدند که سیلیکا با زنجیر آلکیل بلندتر تأثیر غیرمعناداری بر روی زیردست پارچه دارد و در عین حال باعث ارتقای عملکرد فتوکرومیکی پارچه نسبت به نمونه‌های دیگر نظیر سیلیکای حاوی گروه-های فنولی می‌شود[۲۰].

زیچائو و همکاران(۲۰۲۰)، پارچه پنبه‌ای فتوکرومیک مبتنی بر فناوری میکروکپسول با خاصیت ضد رسوب را تولید کردند، در این تحقیق ابتدا ترکیب

[1] Electrorheological
[2] Magnetorheological
[3] Electroluminescents
[4] Photoluminescents
[5] Chemoluminescents
[6] Light-Emitting Diodes
[7] Electrorestrictive
[8] Magnetorestrictive

اسپایروپیران فتوکرومیک سنتز و در میکروکپسول-هایی به عنوان هسته و کیتوزان به عنوان پوسته برای بهبود مقاومت در برابر خستگی آماده شدند. نتایج نشان داد که ترکیب فتوکرومیک هدف با موفقیت سنتز شد و پارچه پنبه‌ای که به‌صورت آماده‌سازی شده، خواص آبگریز خوب، خواص فتوکرومیک طولانی مدت، از جمله خواص تغییر رنگ سریع و مقاومت در برابر خستگی فوق‌العاده را نشان می‌دهد. علاوه بر این، ثبات شستشوی پارچه‌های آماده نیز مورد مطالعه قرار گرفت و پتانسیل بالای آن‌ها را در منسوجات غیرنظامی، به‌ویژه در منسوجات فضای باز، اثبات کرد[۲۱].

رفعت و همکاران(۲۰۲۳)، یک رویکرد ساده برای ارائه خواص ضد آب و محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش پارچه های پلی استر ارائه کردند. پارچه های پلی استر با لاستیک سیلیکون RTV به عنوان یک ماده تکمیل کننده ضد آب و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم به عنوان ماده تکمیل کننده محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش با استفاده از روش پد-خشک-پخت تکمیل شدند. سپس پارچه های تکمیل شده با رنگ فتوکرومیک چاپ شدند نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از تکمیل‌کننده‌های مناسب، می‌توان پارچه پلی استری چاپ شده با رنگ‌های فتوکرومیک را به خوبی در برابر اشعه ماوراءبنفش محافظت کرده و همچنین خاصیت آب‌گریزی و تغییر رنگ را حفظ کرد[۲۲].

- ***مواد ترمو کرومیک***: این‌گونه مواد بواسطه جذب حرارت تغییر رنگ می‌دهندکه نوعی تاثیر تغییر دینامیکی محسوب می‌گردد. معمولا به دو دسته براساس قابلیت بازگشت به حالت اولیه تقسیم می-شوند، که مواد ترموکرومیک برگشت پذیر از اهمین بیشتری برخوردارند این‌گونه مواد می‌توانند برپایه کریستال‌های مایع، مواد آلی و غیرآلی باشند. کریستال های مایع نسبت به مواد شیمیایی حساس بوده و مجاورت با آن‌ها می‌تواند منجر به تخریب ساختار شیمیایی کریستال مایع بشود علاوه‌بر آن دارای طول عمری کوتاه، پایداری کم و هزینه تولید بالا هستندکه کاربرد آن‌ها را بسیار محدود می کند. مواد غیرآلی با آن‌که خصوصیات نوری و حرارتی مناسبی دارند و تولید آن‌ها راحت است ولیکن تغییر رنگ آن‌ها بسیار محدود است و علاوه برآن به‌شدت سمی و خورنده هستند. تنها دسته‌ی باقیمانده یعنی مواد هوشمند فتوکرومیک برگشت پذیر برپایه مواد آلی هستند. این دسته به‌علت خواص قابل قبولی که دارندبسیار مورد اهمیت هستند. از ویژگی های آن‌ها می‌توان به فعالیت رنگی در درجه حرارت‌های منتخب، رنگ های شفاف و هزینه تولید پایین اشاره کرد. در هنگامی‌که نور خورشید به‌آن‌ها بتابد می‌توانند به‌واسطه گرم شدن میزان بازتاب نور خورشید را تغییر

دهند، درجه حرارتی که در آن این اتفاق می‌افتد درجه حرارت گذر نامیده می‌شود. از کاربردهای این‌گونه مواد می‌توان به تجهیزات اندازه‌گیری حرارت و کاربرد در منسوجات هوشمند اشاره نمود که به‌عنوان مثال در لباس هوشمند با تغییر درجه حرارت بدن رنگ آن‌ها تغییر می‌کند از دیگر کاربردهای آن‌ها می‌توان به ابزارهای اندازه‌گیری درجه حرارت به‌واسطه رنگ اشاره نمود این مورد می‌تواند مثالی برای رنگ‌های ترموکرومیک غیرقابل برگشت باشد، هنگامی‌که از کاغذهای حرارتی برای تشخیص دمای استنتر استفاده می‌نمایند و نوع برگشت‌پذیر آن حسگرهایی است که در اثر حرارت تغییر رنگ می‌دهند[۱۱, ۲۳-۲۵].

دیبکو و همکاران (۱۹۹۹)، ترکیبات ترموکرومیک (کلرید کبالت،۳ و ۵ دی نیتروسالیسیلیک اسید) را در حسگرهای سنجش حرارتی برپایه الیاف نوری به کار بردند. لوپز و همکارانش در تحقیق دیگری ماده ترموکرومیک برپایه کمپلکسی از یوروپیوم، برای سنجش حرارتی از طریق پاسخ فلورسانسی این ماده نسبت به دما گزارش کردند. نسبت بین پیک قوی لومینسانس یوروپیوم (III) و انتشار باند جانبی به عنوان پروبی نوین برای سنجش نوری دما در نظر گرفته شد. این نسبت به دنبال وابستگی از نوع آرنیوس با دما است. در نهایت پروبی حرارتی بواسطه قرار دادن و چسباندن قطعه ای از دماسنج فلورسنتی نوری به سر فیبر PMMA ارائه گردید . [۲۶, ۲۷]. فرناندز و همکاران(۲۰۰۲)، در این تحقیق طرحی جهت اندازه گیری همزمان دما و کرنش با استفاده از توری فیبر براگ (FBG) و یک ماده ترموکرومیک ارائه دادند. این طرح یک سیستم دوگانه با دو عنصر حسگر مختلف است که در یک فیبر موجود است: یک توری فیبر براگ برای اندازه‌گیری کرنش و یک حسگر فیبر نوری مبتنی بر اثر ترموکرومیک برای اندازه‌گیری تغییرات دما. نتایج تجربی سیستم دوگانه نوری نشان دادند که این سنسور میتواند کارای مناسبی برای اندازه گیری تنش و کرنش داشته باشد. [۲۸].

ترموکرومیک‌ها مدت‌هاست که در صنایع مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرند به‌طوری‌که در سال ۱۹۹۰ حسگرهایی نوری که عملکردشان در محدوده‌ی دمایی°C ۵۲ تا ۵۵ بود، ساخته شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. این حسگر، ترکیبی است از یک لیف نوری و یک محلول ترمو کرومیک کبالت کلرید که بر اساس تغییرات در طیف جذب نورِ محلول ترمو کرومیک که خود ناشی از تغییرات در طیف دمایی است، عمل می‌کردند. در سال ۱۹۸۷، صنایع تجاری Troy خط تولید لباس‌هایی حساس به درجه حرارت با نام Sway را ایجاد کردند. تغییر رنگ بر اساس دما در این البسه با کاربرد آن‌ها مطابقت داشته است. به طور مثال، البسه اسکی در°C ۱۱-۱۴، لباس‌های زنانه در °C ۲۲-۳۱ و سایه‌های حرارتی در°C ۳۲-۴۲ بوده است. اخیراً نیز از مواد ترمو کرومیک بر روی

ماسک‌های رایج آنفولانزا برای اندازه‌گیری دمای بدن شخص، استفاده شده است[۲۱].

زوو و زائو (۲۰۲۳)، گروه جدیدی از پارچه‌های تغییر رنگ دهنده حرارتی-الکتریکی برپایه CNT و میکروکپسول با فناوری پوشش، طراحی و سنتز کردند، پارچه‌های الکتروترموکرومیک تولید شده عملکرد فوق‌العاده‌ای در تغییر رنگ حرارتی-الکتریکی چرخه‌ای از خود نشان دادند. این مفهوم طراحی منحصر به فرد برای پارچه های الکتروترموکرومیک با حساسیت بالا دارای کاربردهای بالقوه زیادی در مدیریت حرارتی شخصی، خنک کننده دستگاه های الکترونیکی، نمایشگرهای قابل مشاهده و غیره است.[۲۹].

-***مواد مکانوکرومیک و کموکرومیک:*** تصویرسازی تنش‌های مکانیکی در مواد پلیمری به‌واسطه تغییرات نوری می‌تواند طیف گسترده‌ای از کاربردها داشته باشد. از رصد سلامت تا حسگرهای فشاری پیزوکرومیک، پلیمرهای مکانوکرومیک ماکرومولکول‌هایی هستند که قادر به تغییر طیق جذبی در محدوده نور مرئی به‌واسطه تغییر تنش را دارند. در تعریفی گسترده‌تر موادی پلیمری که نشر و انعکاس آن‌ها در اثر اعمال نیروهای مکانیکی در ناحیه مرئی تغییر می‌کند. یکی دیگر از کاربردهای این‌گونه از پلیمرها مهر و موم‌های مکانوکرومیک است که برای حفاظت از محتویات داخل پاکت یا جعبه استفاده می-شود که در این مهر و موم اگر تحت تاثیر نیروهای مکانیکی به‌عنوان مثال در جهت بازکردن مهر و موم قراربگیرد دچار تغییر رنگ می‌شود که نشان دهنده دستکاری پاکت یا جعبه است.

مواد کموکرومیک موادی هستند که رنگ آن‌ها بستگی به محیط شیمیایی اطرافشان دارد به‌عنوان مثال از آن‌ها جهت حسگرهای تشخیص دهنده نشر گاز استفاده می‌کنند، نمونه آن‌ها حسگرهای نشت هیدروژن است به دلیل آن‌که گازی قابل احتراق بوده و نشت آن می‌تواند برای سلامت محیط کار خطری بالقوه محسوب شود در این‌گونه موارد می‌توانند پیگمنت‌های کموکرومیک را با پلیمری مخلوط نموده و آن را به‌شکلی سخت یا نرم قالب‌گیری می‌نمایند یا آن‌که آن را به شکل الیاف درآورده تا حساسیت حسی آن با توجه به سطح مقطع افزایش یابد. کموکرومیک‌ها می‌توانند جهت ساخت معرف‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرندکه مثال آن کاغذ لیتموس است، این کاغذ حاوی پیگمنتی قرمز رنگ که از گلسنگ (بطور عمده نوع روسلیا تینکتوریا) به‌دست می‌آید در آزمایش‌های شیمیایی کاربرد دارد و اسم دیگر آن کاغذ تورنسل است، اگر pH قلیایی باشد آبی و اگر اسیدی باشد قرمز می‌شود [۱۱و۳۰].

-**مواد الکترو کرومیک:** مواد الکتروکرومیک ایجاد خاصیت الکتروکرومیزم می‌نمایندالکتروکرومیزم رفتار

ماده‌ای است که در برابر محرک الکتریکی تغییر رنگ یا وضوح می‌دهد به‌عنوان مثال شیشه های هوشمندی عرضه شده‌اند که حاوی این مواد بوده و قادرند عبور طول موج خاصی را به عنوان مثال ماوراءبنفش مادون قرمز و نورمرئی را بلوکه یا از خود عبور دهند. کنترل میزان عبور مادون قرمز نزدیک می‌تواند در صرفه‌جویی انرژی یا بازدهی آن تاثیر گذار باشد. با بلوکه نمودن عبور مادون قرمز در تابستان خنک کردن ساختمان راحت‌تر و با اجازه عبور به آن در زمستان گرم کردن ساختمان آسان‌تر می‌شود. با توجه به آن‌که در صورت تامین انرژی تغییر رنگ ماندگار است با استفاده از این مواد می‌توان میزان نور و حرارتی که از شیشه عبور می کند کنترل نمود. معمولا این تغییر رنگ با اعمال ولتاژ کمی انجام می‌گیرد در این رابطه می‌توان به آینه های ضد چشم‌زدگی در ماشین اشاره نمودکه برای مشاهده عقب ماشین استفاده می‌شود، این مواد معمولا از اکسیدهای فلزی نظیر WO_3, MoO_3, IrO_2, NiO, V_2O_5، اکسید تنگستن (WO_3) گسترده‌ترین و شناخته‌شده ترین ماده الکتروکرومیک است. سایر موارد شامل اکسیدهای مولیبدن، تیتانیوم و نیوبیم هستند، اگرچه این‌ها از نظر نوری کمتر موثر هستند[۱۱-۳۱و۳۲].

اساساً، تغییر رنگ در یک ماده الکتروکرومیک از تغییرات شیمیاییِ ناشی از تغییرات مولکولی در سطح مواد، به دلیل اکسیداسیون – احیا، ایجاد می‌شود. برای دستیابی به این نتایج، لایه‌هایی از مواد مختلف با پایان‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور خلاصه می‌توان این طور بیان کرد که، یون‌های هیدروژن یا لیتیم موجود در لایه ذخیره ساز یون از طریق لایه هادی یون، انتقال می‌یابند. در چیدمان-های شیشه‌ای، لایه الکتروکرومیکی اغلب اکسید تنگستن (WO_3) می‌باشد. اعمال یک ولتاژ، یون‌های هیدروژن یا لیتیم را از لایه ذخیره ساز از طریق لایه هادی به لایه الکتروکرومیک می‌برد و بنابراین خواص نوری لایه الکتروکرومیک را تغییر داده و منجر به جذب طول موج‌های مرئیِ نور می‌گردد. در این مورد، شیشه تاریک‌تر می‌شود. برداشتن ولتاژ باعث رفتن یون‌ها به خارج از لایه الکتروکرومیک در جهت معکوس (از بین لایه هادی به لایه ذخیره ساز) می‌شود و باعث روشن‌تر شدن شیشه می‌گردد. این فرایند نسبتاً کند است و نیاز به یک جریان ثابت دارد[۳۱-۳۳و۳۴].

همانند فتوکرومیک‌ها و ترموکرومیک‌ها، الکتروکرومیک‌ها نیز یکی از موادی هستند که توجه-های فراوانی را به خود جلب کرده‌اند. گرچه هنوز، استفاده از این مواد در منسوجات به تولید انبوه نرسیده و خیلی تجاری نشده‌اند. بیشتر محصولاتی که از این فنّاوری بهره می‌برند، به دلیل کاربرد شیشه که معمولاً به‌عنوان بستر از آن استفاده می‌شود، سخت و غیرقابل‌انعطاف هستند. ولی فرصتی برای ترکیب

خواص مواد الکترو کرومیک با منسوجات برای ایجاد نمایشگرهای انعطاف‌پذیر وجود دارد. اخیراً، تعداد زیادی از گروه‌های تحقیقاتی، مطالعاتی بر روی ساخت ECD[1] های انعطاف‌پذیر صورت‌گرفته است[۲۱]

بیوپره و همکارانش (۲۰۰۶) طی مطالعه‌ای به کوپلیمرهای جدیدی بر پایه‌ی ۴- بوتیل تری فنیل آمین دست یافته‌اند که از آن به عنوان لایه فعال در سلول‌های الکتروکرومیکیِ انتقالی، استفاده نموده‌اند و از منسوجی رسانا نیز به‌عنوان قطب منفی برای دستیابی به سلول‌های هیبریدی الکترو کرومیک پلاستیکی/منسوجی برای ایجاد استتار تطبیقی، بهره جسته‌اند. این کوپلیمرها خواص نوری و الکتروشیمیایی خوبی برای نیازهای استتار نظامی با انتقال رنگ از زردِ کم‌رنگ به سبز، از شفاف به خاکی و یا رنگ سبز کم‌رنگ به قرمز مایل به قهوه‌ای را به نمایش گذاشته‌اند[۲۷]

۲-۱-۲- مواد هوشمند تغییرفازی

فرآیندهای تغییر فاز همواره شامل جذب، ذخیره سازی یا آزاد سازی مقدار زیادی از انرژی به صورت گرمای پنهان می‌باشند. یک تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به گاز و برعکس، در دماهای دقیقی اتفاق می‌افتد. مواد تغییر دهنده فاز (PCM)[2] امکان استفاده از گرمای نهانی که می‌تواند از یک ماده، در یک رنج دمایی کوچک، ذخیره یا آزاد شود را دارند. این مواد در طول پروسه‌ی گرمایش، در حالی که تغییر فاز نیز اتفاق می‌افتد، انرژی را جذب می‌کنند و در طول روند معکوس (یعنی سرد کردن)، در محدوده‌ی تغییر فاز، انرژی را در محیط اطراف آزاد می‌کنند[۴- ۳۵و۳۶].

برخی از ترکیبات متعددی نیز (مانند نمک‌های هیدراته‌ی معدنی) وجود دارند که مقدار زیادی از انرژی گرمایی را جذب و آزاد می‌کنند. درحالی‌که ماده از یک حالت جامد به یک حالت مایع و متعاقباً به حالت گازی تغییر حالت می‌دهد، باید مقدار زیادی از انرژی جذب شود و هنگامی که ماده از یک حالت گازی به مایع و سپس به یک حالت جامد برمی‌گردد، مقدار زیادی از انرژی آزاد خواهد شد. این فرایندها برگشت‌پذیرند و مواد تغییردهنده فاز می‌توانند چرخه-ی نامحدودی را بدون تخریب[3] انجام دهند. دستیابی به اثر عایق‌سازی به‌وسیله PCM به دما و زمان وابسته است. کاربرد PCM در منسوجات توجه بسیاری از تحقیقات را به خود معطوف ساخته است. اگر منسوج بتواند به‌صورت خودکار مقاومت حرارتی خود را بر اساس دمای محیط تنظیم نماید، باعث تنظیم دمای داخلی لباس شده و در نهایت منجر به افزایش راحتی بدن می‌گردد. یکی از کاربردهای PCM در ساخت منسوجات و لباس‌های ذخیره‌کننده گرما و

[1] Electro Chromic Display
[2] Phase Change Materials
[2] Degradation

تنظیم‌کننده دماست. چگونگی قرارگیری PCM در منسوجات جهت تولید البسه و منسوجات با ویژگی-های خاص که می‌توانند دما را تنظیم و گرما را ذخیره سازند، معمولاً به روش‌های زیر انجام می‌شود:۱- پرکردن الیاف توخالی با PCM ۲- پارچه‌های پوشش داده شده ۳- ریسندگی الیاف[۱۱- ۳۷و ۳۸].

از کاربردهای مواد PCM در صنایع نساجی می‌توان به کاربرد آن‌ها در منسوجات فضایی جهت ساخت البسته و دستکش فضانوردان برای محافظت از آن‌ها در مقابل سرمای شدید هنگام کار در فضا نام برد، یا آن‌که در البسه ورزشی قابلیت جذب گرمای بدن پوشنده لباس (که در اثر فعالیت ورزشی افزایش‌یافته) را دارند. این گرمای تولید شده به‌وسیله مواد تغییردهنده فازِ میکروکپسوله[1] شده جذب می‌گردد و در زمان لزوم آزاد خواهد شد. دستکش اسکی، لباس زیر، البسه یخنوردی، پوشش زیر برای دوچرخه‌سواری و دو، نمونه‌هایی چند از کاربرد PCM در البسه‌ی ورزشی هستند[۳۳]. در تجهیزات پزشکی منسوجات عمل شده با میکرو کپسول‌های PCM، به دلیل پاسخ‌گویی نسبت به نوسانات حرارتی، دارای کاربردهای بالقوه در پوشاک جراحی، مواد کاربردی در ملحفه و لوازم خواب بیمار، باندها و محصولاتی برای تنظیم درجه حرارت بیمار در واحدهای مراقبت ویژه، هستند. منسوجاتِ ذخیره‌ساز گرما و تنظیم‌کننده حرارت می‌توانند دمای پوست را در محدوده‌ای مناسب نگه دارند بنابراین، این منسوجات می‌توانند برای پانسمان و درمان سوختگی سرد/گرم مورداستفاده قرار گیرند. اخیراً، PCM در کفش‌ها و خصوصاً در بوت‌های اسکی، کوهنوردی، رانندگان خودرو مسابقه‌ای هم مورداستفاده قرار گرفته است. منسوجات ذخیره‌ساز گرما و تنظیم‌کننده دما می‌توانند برای جلوگیری از تغییرات شدید در سر، بدن، دست‌ها و پاهای پوشنده لباس، گرما را جذب، ذخیره، توزیع مجدد و یا آزادسازی نمایند. در نهایت می‌توان به کاربردهای دیگر این مواد مانند روکش صندلی اتومبیل، کلاه‌های ایمنی، البسه راه‌رفتن در آب برای ماهیگیری و لباس-های آتش‌نشان‌ها اشاره نمود[۳۸و ۳۹].

۳-۱-۲-پلیمرهای رسانای هوشمند

محصولات مرسوم زیادی وجود دارند که به صورت ذاتی رسانا نیستند، مانند شیش-ه‌ها یا بسیاری از پلیمرها، که می‌توانند از طرق مختلف و برای کاربردهای متفاوت ساخته شوند. پلیمرها -می‌توانند به وسیله اضافه نمودن مستقیم مواد رسانا (مانند: گرافیک، ذرات اکسید فلزی) به آن‌ها، رسانا گردند. شیشه‌ها، که به طور معمول بسیار عایق هستند، می توان به وسیله فرآیند رسوب فیلم‌های نازک فلز بر روی سطحشان رسانا نمود و این در حالی است که

[1] Encapsulation

همچنان شفاف باقی می‌مانند. پلیمرهای دیگری نیز وجود دارند که دارای رسانایی الکتریکی ذاتی هستند[۵, ۴۰]. هدایت الکتریکیِ پلیمرهای الکترواکتیو در پاسخ به تغییری در قدرتِ میدان مغناطیسیِ اعمال شده بر ماده، تغییر می‌کند. یک باز آرایی[1] مولکولی اتفاق می‌افتد که مولکول‌ها را در یک مسیر خاص ردیف کرده و الکترون‌ها را برای خدمت رسانی به عنوان رساناهای الکتریکی، آزاد می‌کند. به عنوان مثال‌هایی از این مواد می‌توان به پلی‌آنیلین و پلی‌پیرول اشاره نمود. این پلیمرها معمولاً پلیمرهای مزدوج هستند که در ساختار داخلی آن‌ها، الکترون‌ها می‌توانند آزادانه تر حرکت کنند.

پلیمرهای رسانا از نوع رسانای ذاتی (ICP[2]) ، پلیمرهای آلی و هادی جریان الکتریسیته هستند. که به دلیل خصوصیات نوری و الکتریکی عمداً به عنوان حسگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از ادغام خواص الیاف و یا منسوجات با این پلیمرها می‌توان، از ویژگی‌های افزوده هردو دسته بهره جست[۱۱, ۴۱]. طی پژوهشی، کوچرن و همکارانش(۲۰۰۷)، توانستند حسگری هوشمند و منعطف را طراحی و ارائه نمایند که قابلیت انطباق با ساختار منسوج را دارد. با استفاده از این حسگر میزان کرنش و تغییرات شکلی حاصله در ساختار منسوج در اثر نیروهای مکانیکی اعمالی قابلیت اندازه گیر دارد. این حسگر دارای خواصی نظیر سبکی وزن، انعطاف پذیری زیاد و قابلیت کشسانی بود تا بتواند با ساختار منسوج خود را انطباق دهد، پایه این حسگر کامپوزیت الاستومرترموپلاستیک (Evoprene)/ نانو ذرات کربن سیاه بود تا بتواند تامین کننده خواص مکانیکی مورد اشاره باشد. حسگر با پارچه نازک و سبک وزن نایلونی ادغام گردید و خصوصیات الکترومکانیکی اندازه گیری شدند [۴۲, ۴۳].

بر همین پایه عضلات مصنوعی پلیمری طراحی گردید. جهت ساخت این عضلات از فیلم‌های پلی-پیرولی و پلی‌آنیلینی استفاده می‌شود. این فیلم‌ها به-صورت لمینیت درآمده تا ساختاری ساندویچی شکل بگیرد. ابتدا اعمال جریان الکتریکی به این ساختار به این ساختار باعث انتقال یون‌ها می‌گردد. حرکت کردن این بارها منجر به احیا در یک طرف اکسید کردن در طرف دیگر ساختار ساندویچی می‌شود، در اثر رخداد واکنش‌های اکسیداسیون و احیا یک طرف لمینیت ساندویچی منبسط و طرف دیگر منقبض می-گردد که منجر به خم شدگی در لمینیت می‌شود. خمش حاصله را می‌توان جهت اعمال نیروی مکانیکی به منظور رسیدن به هدف خاصی نظیر گرفتن یا رها کردن اشیا به‌کار برد [۱۱].

[1] Intrinsically Conducting Polymers

[2] Rearrangement

در تحقیقی دیگر، هاکانسون و همکارانش (۲۰۰۴) توانستند بابهره‌گیر از پلیمرهای رسانا ساختاری را تولید نمایند که بتواند ایجاد گرما کند. در این تحقیق پارچه‌ی PET از طریق سنتز شیمیایی با چهار ترکیب-مختلف عامل اکسید کننده[1]-دوپانت، با پلی پیرول پوشش داده شد و میزان گرمای تولیدی آن اندازه گیری گردید[۴۴]. وئوو و همکارانش(۲۰۰۵) توانستند، در تحقیقی پلی پیرول را از طریق سنتز درجای شیمیایی بر روی پارچه مخلوط نایلون- لایکرا، پوشش دهند. این پارچه پوشش داده شده هنگامی که به شکل لباس درآید می تواند به فرم بدن انسان درآمده و به‌عنوان حسگر بیومکانیکی پوشیدنی عوامل نظارتی وسیعی را در حرکت انسان نمایش دهد [۴۵].

۴-۱-۲-مواد هوشمند با قابلیت تغییر خصوصیات رئولوژیکی

خواص رئولوژیکی مطالعه رفتار سیالات تحت تاثیر نیروهای مکانیکی است از مهم‌ترین خصوصیات رئولوژیکی می‌توان به تنش تسلیم، زمان استراحت، ویسکوزیته و شکل پذیری اشاره نمود مواد با قابلیت تغییر خصوصیات رئولوژیکی، موادی هستند که به سرعت در اثر تغییر شرایط فیزیکی می‌توانند به خصوصیات رئولوژییکی متفاوتی نسبت به حالت پایه خود برسند. معمولاً این تغییرات در محدوده بین جامد و مایع است، محرک می‌تواند میدان الکتریکی و یا میدان مغناطیسی باشد. اگرتغییر خواص رئولوژیکی ماده در اثر میدان الکتریکی باشد به آن-الکترورئولوژیکال و اگر در اثر میدان مغناطیسی باشد به آن مگنتورئولوژیکال گفته می‌شود. معمولاً مواد با قابلیت تغییر خواص رئولوژیکی به‌واسطه میدان مغناطیسی به نسبت به تغییر میدان الکتریکی ارجحیت دارند ولتاژ تحریک آن‌ها بسیار کم بوده و در حضور ناخالصی‌ها فعال هستند، لذا کاربردشان عملی تر خواهد بود. این‌گونه مواد هوشمند را در صنعت می-توان برای دمپرها و یا دمپرهای پل و ساختمان استفاده کرد تا شوک ارتعاشی ناشی از باد و زمین لرزه را به حداقل برساند درصورتیکه ارتعاشی بواسطه هریک از این دو عامل ایجاد گردد یک کویل الکتریکی میدانی مغناطیسی را بر روی این ماده هوشمند القا می‌کند و باعث می‌شود که از حالت مایع به حالت سخت تبدیل شود این کویل به دفعات زیادی در ثانیه عمل کرده تا بتواند میزان شوک را کاهش دهد و این ماده هوشمند مدت زسادی است که در نقش دمپر، روغن‌های ترمز و جاذب‌های شوک و لرزه به کار می رود [۷- ۱۱- ۴۶].

۵-۱-۲- مواد هوشمند برپایه کریستال مایع

کریستال‌های مایع، فاز واسطه‌ای بین جامدات کریستالی و مایعات ایزوتروپیک هستند. این مواد، مایعات منظم آرایش یافته‌ای هستند که خواص

[1] Oxidizing Agent

ناهمسانگرد[1] را نیز به همراه دارند. کریستال‌های مایع نسبت به میدان الکتریکی حساسند و بنابراین به صورت ویژه، قابل کاربرد در نمایشگرهای نوری هستند. نمایشگرهای کریستال مایع از دو ورقه از مواد قطبی کننده، همراه با یک محلول کریستال مایع که در بین این دو ورقه قرار دارد، بهره می‌برند[۴۷]. عبور جریان الکتریکی از بین مایع باعث ردیف شدن کریستال ها شده و بنابراین، نور نمی تواند از آنها عبور کند. هر کریستال مانند یک دیافراگم عمل می کند، یا به نور اجازه عبور می دهد یا مسیر آن را مسدود می سازد. [۴۸].

مارکستروم و همکاران(۱۹۹۰)، طیف جذبی مرئی برای یک تک لیف را با استفاده از یک مایکرواسپکتروفتومتر بر پایه یک فیلم تنظیم پذیر کریستال مایع ثبت کرده‌اند. این طیف با نتایج حاصل از یک ابزار مرسوم مقایسه شده است. مزایای این روش نسبت به روش وابسته به استخراج این واقعیت‌ها را در بر دارد که این روش برای نمونه‌هایِ به شدت کوچک قابل کاربرد است، به آثار ناشی از راندمان های متغیر استخراج حساس نمی باشد، همچنین غیر مخرب و بسیار ساده‌تر است[۴۸]. در پژوهشی دیگر، متیوس و همکارانش(۲۰۱۱)، عملکرد یک حسگر میدان الکتریکی تمام لیفی پلاریمتریک، بر پایه نماتیک کریستال مایع الیاف کریستالی فوتونیک، را تشریح نموده‌اند، که می‌تواندبه‌عنوان حسگری تمام لیفی و با محرک الکتریکیجهت محیط های با میدان الکتریکی قوی و یا ضعیف به‌کار رود اما باید در نظر داشت که انتخاب ماده کریستالی مایع باید براساس انتظارت از حسگر حاصله باشد [۴۹].

۲-۲- مواد هوشمند مبدل انرژی

میدان‌های انرژی، محیط اطراف تمام مواد را احاطه کرده اند. هنگامی که حالت (درجه) انرژی ماده ای برابر با حالت انرژی محیط اطرافش باشد، در این صورت گفته می‌شود که ماده در تعادل است (هیچ انرژی نمی‌تواند مبادله شود). وقتی ماده در حالت انرژی متفاوتی باشد، در این هنگام برای رسیدن به تعادل، تبادل انرژی اتفاق می‌افتد. تمام مواد مبدل انرژی دارای درجه‌های انرژی اتمی هستند. انرژی ورودی درجه را بالا می‌برد، انرژی خروجی درجه انرژی را به حالت پایه باز می‌گرداند. برای مثال، وقتی تابش‌های خورشیدی به یک ماده‌ی فتوولتائیک برخورد می‌کند، انرژی فوتون جذب می‌شود یا به صورت دقیق‌تر، به وسیله‌ی اتم‌های ماده جذب می-شود. چون انرژی باید حفظ شود، انرژی مازاد در اتم-ها، آنها را وادار به حرکت به یک درجه بالاتر انرژی می‌کند و اتم‌ها قادر به نگه داشتن این سطح نبوده و درنتیجه باید مقدار انرژی مربوطه را آزاد کنند. با

[1] Anisotropic

استفاده از مواد نیمه رسانا، فتوولتائیک‌ها قادر به گرفتن این انرژی آزاد شده هستند و بدین وسیله می-توانند الکتریسیته تولید کنند[۱۱, ۵۰]. در ادامه موادی که ذیل این دسته قرار می‌چیرند معرفی خواهند شد.

۱-۲-۲-مواد ساطع کننده نور

کرم‌های شب‌تاب جلوه‌ی زیبایی از واکن‌های بیوشیمی هستند که به‌واسطه آن نوری فسفری تولید می‌شود که فاقد تشعشعات مادون قرمز یا ماوراءبنفش است این پدیده درخشندگی جهت طراحی منسوجات درخشنده مورد استفاده قرار گرفته است که در آن‌ها سعی در تقلید از درخشندکی بیولوژیگی کرم شی‌تاب صورت پذیرفته است، این نور در نتیجه ارگان‌هایی از کرم شب‌تاب است که در شکم او قرار گرفته اند و در آن یک واکنش بیوشیمیایی بین پیگمنی به نام لوسیفرین، پروتئینی آنزیمی به نام لوسیفریاز و اکسیژن انجام می‌گیرد.

این مواد جامدهای غیرآلی هستند که با ناخالصی‌هایی دوپ شده اند. وقتی این مواد در معرض انرژی تابشی یا هرشکل دیگری از انرژی قرار می‌گیرند مقداری از آن را جذب می‌نمایند و بدین طریق به حالت برانگیخته در آمده و باعث انتقال الکترون‌ها به لایه‌های بالاتر می‌شوند. محتمل است که در این مسیر الکترون به‌واسطه تله‌های ایجاد شده توسط ناخالصی‌های دوپ شده در فضایی گیر کنند، این‌گونه الکترون‌ها می‌توانند پس از مدتی با بدست آوردن انرژی کافی از تله رهایی پیدا کرده و فوتون‌هایی را در محدوده طول موج مرئی ساطع نمایند، طول موج تابش نشری سرعت و مدت تابش بستگی به یون‌های ایجاد کننده تله یا همان دوپ (مانند: مس) دارد. پدیده لومینسنس می‌تواند توسط عوامل مختلفی نظیر محرک‌های الکتریکی، واکنش‌های شیمیایی یا حتی اصطکاک به‌وقوع بپیوندد، پدیده لومینوسنس یا نشر نور می‌تواند در اثر واکنش شیمیایی ایجاد شود که به آن درخشندگی شیمیایی[1] می‌گویند یا در اثر واکنشی آنزیمی[2] صورت می‌گیرد. واژه درخشندگی یا لومینوسنس یا شب‌تابی اصطلاحی عمومی است که برای توصیف پدیده‌های مختلفی که بر پایه ساطع کنندگی نور هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو واژه تخصصی در این بحث وجود دارند فلوئورسنس و فسفورسنس، فلوئورسنس نشر آنی نور در ناحیه مرئی به‌واسطه تابش یک منبع نوری (نظیر تابش مایکرویو) بر روی مورد نظر انجام می‌گیرد، فسفورسنس جذب انرژی دریافتی توسط ماده نگهداری آن و آزادسازی با تاخیر است به همین خاطر این‌گونه مواد برخلاف مواد فلوئورسنس حتی بعد از قطع تابش منبع نوری برای مدتی به درخشندگی خود ادامه می‌دهند [۱۱].

[1] chemiluminescence

[2] bioluminescence

طی پژوهشی در سال ۲۰۱۳، الیاف کامپوزیتی یک بعدیِ $PLA/Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}, Dy^{3+}$، متشکل از نانو ذرات لومینسانس $Sr_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ و پلی لاکتیک اسید، از طریق الکتروریسی سنتز شدند. الیاف تولید شده در این پژوهش هر دوخاصیت فسفرسانسیو فلوئورسانسی را همزمان نشان داددند حالی‌که توانستند به مقدار زیادی خصوصیات پلاستیسیتی و الاستیسیتی الیاف PLA خالص را حفظ کنند. در سال ۲۰۱۵ الیاف کامپوزیتی Long-persistent luminescence /polymer ($Ca_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}$, Dy^{3+}/PLA) از طریق الکتروریسی تولید گردیدند ادعا شده است که الیاف حاصله می‌توانند در صنعت نساجی صفحه‌های نمایش، آشکارسازهای نوری و اندیکاتورهای فعال در تاریکی بدون نیاز به انرژی الکتریکی به‌کار بروند [۵۱, ۵۲].

سانتوز و همکارانش از طریق فرایند ناحیه شناوری لیزری[1] توانستند، الیاف مکعبی $ZnGa_2O_4$، رشد بدهند. هنگامی که این الیاف با یون های منگنز فعال شوند تابش نشری از نوع فتو و یونو لومینسانس را در دمای اتاق از خود نشان می‌دهند که به شکل انتشار نورسبز قوی قابل مشاهده با چشم غیر مسلح [۵۳]. الیاف سیلیکا دوپ شده با ایتربیم (Yb^{3+}) و هولمیم (Ho^{3+}) توسطکریانوف و همکاران تولید شده است و خواص لومینسانس آن‌ها در محدوده‌ی طیف مرئی و نزدیک به IR توسط مورد مطالعه قرار گرفته اند. ادعا شده است که الیاف تولیدی می‌توانند به‌عنوان الیاف نوری با قابلیت لیزرینگ و تقویت کنندگی مورد استفاده قرار گیرند. [۵۴]. در تحقیق دیگری، ساخت حسگر جامد اکسیژن- فسفرسنت که به وسیله ی لکه گذاری حلال بر الیاف هیدروفیلیک پلی الفین به دست آمده، توسط کلی و همکارانش گزارش شده است. این حسگرها دارای شدت روشنایی بالا، سیگنال‌هایی با طول عمر مطلوب و وابستگی دمایی را فراهم کردند که در مقایسه با حسگرهای مرسوم O_2، عملکرد، مقاومت ترشوندگی و پاسخ گویی سریعی را نشان دادند[۵۵].

سانتوز و همکاران، سرامیک بریلیم اکساید (BeO) را به عنوان رادیولومینسانس (RL) و فوتو لومینسانس (OSL) به عنوان پروب دوزیمتر الیافی لومینسانس مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید که سرامیک BeO می‌تواند در فرم پروب الیافی قابلیت کارایی بالایی داشته باشد[۵۶].

کلین و همکارانش نیز یک پروب دوزیمتر الیافی لومینسنت کوپل شده با $Al_2O_3:C$ دارای قدرت تفکیک مکانی بالا را ارائه نمودند. این پروب بر پایه لایه‌ی نازکی از پودر کریستالی $Al_2O_3:C$ و منومری ترکیبی از اکریلات پخت شده با ماوراءبنفش سنتز

[1] Laser Floating Zone

گردید[۵۷]. گارسیا و همکاران در تحقیقی دیگر الیاف نوری جهت طراحی ابزاری برای نظارت همزمان غلظت اکسیژن‌های حل شده در مکان‌های مختلف آب استفاده کردند. [۵۸].

الکترولومینسانس‌ها نوع دیگری از دیگر مواد هوشمند ساطع کننده نور هستند که به‌واسطه محرک ولتاژ یا میدان الکتریکی فعال می‌شوند. فعالیت این ماده به دو طریق انجام می‌گیرد در حالت اول که متداول است ناخالصی‌هایی در فسفر پایه پراکنده می‌شود با اعمال میدان الکتریکی الکترون‌ها در فسفر به حرکت در آمده و به ناخالصی‌های پراکنده شده برخورد می‌کنند ماحصل این تصادم حرکت‌های الکترونی در ناخالصی-ها و تابش‌نور شب‌تابی است. در حالت دوم حرکت و جنبش کلی الکترون‌ها و حفره‌ها، رخ می‌دهد کهاین حرکت صرفاً در مواد نیمه رسانا انجام پذیر است.

مواد الکترو لومینسانس به‌صورت گسترده ای جهت تولید نوارها و پنل‌های نوری و تصویری مورد استفاده قرار گرفته اند. این‌گونه پنل‌ها که به آن‌ها پنل‌های نوری/ جعبه‌های نوری/ پنل‌های لومینوسنت گفته می‌شوند نوعی پنل لمینیت شده کاغذی نازک هستند که از مواد فسفری یا الکتروفسفری ساخته شده اند، هنگامی‌که به این پنل‌ها جریان الکتریکی اعمال شود درخشندگی فوق العادهای از خود نشان می‌دهند با توجه به شکل و فرم فیزیکی آن‌ها که خلاف دیگر منابع نوری است از طول عمر بالاییی برخوردارند و امکان شکستگی آن‌ها بسیار کم است، جالب است که این پنل ها حتی قابلیت برش نیز دارند و آن‌ها را می-توان به ابعاد مناسب برش داد، معمولا رنگ طبیعی این پنل ها سبز یا آبی است و حتی از آن‌ها سیم ها و الیافی را تهیه می کنند که دارای رنگ سفید، سبز لیمویی و آبی روشن هستند رنگ های دیگر آن نظیر قرمز و بنفش به‌واسطه اعمال فیلتر رنگی جهت تولید این رنگ‌ها از شفافیت کمتری برخوردارند [۹, ۱۱]. در سال ۲۰۱۴ تحقیقی انجام گرفت تا بتوانند یک لامپ الکترولومینسانس (EL) مسطح را بر روی پارچه‌ی پلی استر-پنبه ایجاد نمایند،جهت این کار از روش چاپ تخت مستقیم استفاده گردید. لامپ EL تولیدی شامل شش لایه‌ی چاپی و در رنگ‌های آبی کم رنگ، آبی تیره و نارنجی بود. پارچه‌ی چاپ شده توانست به مقدار زیادی انعطاف پذیری و خواص تنفسی خود را حفظ کند و از دوام نسبتا بالایی نیز برخوردار بود[۵۹].

۲-۲-۲- مواد هوشمند نیمه رسانا[1]

فتوولتائیک‌ها[2]، ال ای دی‌ها، ترانزیستورها و ترموالکتریک‌ها در این دسته قرار می‌گیرند، هنگامی که به ماده نیمه رسانا یک ناخالصی به نام دوپانت

[1] Basic Semiconductor Phenomena

[2] Photovoltaic

افزوده شود می‌تواند تحت شرایطی خاص خواص الکتریکی جالبی را از خود نشان دهند. افزوده شدن ناخالصی باعث تجمع بارهای الکتریکی در مناطقی خاص از شبکه نیمه رسانا می‌گردد که تمرکز بار و حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد

برخلاف اکثر فلزات که در آن‌ها افزایش دما منجر به بالا رفتن مقاومت الکتریکی می‌گردد افزایش دما در نیمه رسانا باعث ارتقای هدایت الکتریکی می‌شود و همین ویژگی آنقدر پر اهمیت است که باعث می‌شود در کاربردهای فراوانی از آن استفاده شود. این خاصیت به‌واسطه‌ی گپ یا شکافی است که بین لایه ظرفیت و هدایت ماده‌ی نیمه رسانا وجود دارد. به‌واسطه تامین انرژی کافی معمولاً از نوع الکتریکی یا گرمایی الکترون توانایی فائق آمدن بر سد انرژی در حالت پایه را پیدا کرده می_تواند حرکت نماید و از لایه ظرفیت به لایه هدایت منتقل شود که به‌واسطه این انتقال ماده نیمه رسانا به ماده رسانا تبدیل می‌شود [۶۰و ۶۱].

طی تحقیقی در سال ۲۰۱۴، پارچه‌ای تکمیل شده با رنگ VO_2 (آبی تیره) به‌عنوان ماده نیمه‌رسانا دوپ شده با W ارائه نمودند که قابلیت استتار در برابر دوربین‌های مادون قرمز را از خود نشان می‌داد و می-توانست در محیط اطراف مخفی بماند[۶۰- ۶۲].

کاربرد دیگر مواد نیمه رسانا در سلول‌های خورشیدی است[۶۳و ۶۴]. در سلول‌های خورشیدی معمولی، لایه‌ی n (لایه غنی الکترون) بالای لایه‌ی p (غنی حفره) قرار گرفته است. انرژی تابشی نور خورشید که به لایه‌ی n برخورد می‌کند باعث افزایش انرژی الکترون‌ها شده و منجر به حرکت آن‌ها به سمت لایه حفره می‌گردد در نتیجه این حرکت جریان الکتریکی فراهم می‌شود. نیاز به سلول‌های خورشیدی منسوجی در زمان فعلی کاملا محسوس و ثابت شده است این موضوع به دلیل ویژگی های منسوج نظیر انعطاف، قابلیت پوشش و سبکی آن است[۶۵, ۶۶].این‌گونه منسوجات که به منسوجات فتوولتائیک نیز معروف هستند در صنایع نظامی و همچنین تولید البسه تامین کننده انرژی تجهیزات الکترونیکی و پوشیدنی و یا تنظیم کننده درجه حرارت بسیار مورد استقبال قرار گرفته اند و شیب توسعه فزاینده ای دارند [۱۱- ۵۰]. در تحقیقی دیگر کایلبرگ و همکارانش، الکترودهای بافته شده‌ای را به‌عنوان سلول‌های فتوولتائیک آلی معرفی نمودند، آن‌ها با کمک بافتن سیم‌های فلزی و الیاف پلیمری به یکدیگر توانستند الکترودی مشی را تولید کنند که ماژول‌های سلول-های خورشیدی بتوانند روی آن‌ها سوار بشوند [۶۷].

ترانزیستورها نیز برمبنای خواص نیمه رساناها معرفی شده‌اند. اساساً، یک ترانزیستور می‌تواند در نقش تقویت کننده یا قطع و وصل کننده در مدار الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد. در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۵، ساخت یک ترانزیستور اثر میدانی

(FET)[1] با استفاده از الیاف پلی (۳-هگزیل تیوفن-۲،۵-دیل) انجام گرفت. در این تحقیق، الکتروریسی به عنوان یک فرآیند ساده و یک مرحله‌ای برای ساخت پلیمرهای یک بعدی FET به کار گرفته شده است[۶۸]. کاسترو و همکارانش نیز طی مطالعه‌ای فیلم-های نازک ترانزیستوری آلی (OTFT)[2] را تولید نمودند و تاثیر عملیات‌های خاص مکانیکی، شیمیایی و حرارتی در عملکرد الکترونیکی این پارچه که بر روی آن ترانزیستور آلی از طریق چاپ جوهرافشان انجام شده بود مورد ارزیابی قرار گرفت. انجام عملیات متداول نساجی نظیر کالندر کردن‌های صنعتی، رنگرزی، شست و شو و استنتر کردن، ترانزیستور را از کار نینداخت ولیکن عملکرد آن را تحت الشعاع قرار داد[۶۹].

سردکننده‌های ترموالکتریک برپایه اثر پلتیر کار می-کنند در این اثر اختلاف درجه حرارت مابین دو سمت قطعه خنک کننده باعث ایجاد جریان الکتریکی و بالعکس می‌شود و دستگاه‌های خنک کننده ای که برپایه این اثر قرار گرفته‌اند را خنک کننده‌های پلتیری می‌نامند. خنک‌کننده یا بخاری پلتیر که به آن پمپ حرارتی ترموالکتریک گفته می‌شود ماده جامدی است که به‌واسطه اعمال جریان الکتریکی در یک سمت آن گرما و در سمت دیگر سرما تولید می‌شود [۱۱].

ونگ و همکارانش(۲۰۱۵)، کامپوزیت‌های ترموالکتریکی P_3OT [3]/ الیاف کربن تولید نمودند. در این کامپوزیت ورقه‌های الیاف کربن با رسانایی الکتریکی بالا به‌عنوان فاز غیرآلی انتخاب شدند و کامپوزیت مورد نظربه‌واسطه افزودن محلول پلی (۳-اوکتیل تیوفن) بر روی ورقه‌های الیاف کربن ساخته شد. در این کامپوزیت ورقه‌های الیاف کربن به‌عنوان رسانای الکتریکی و P_3OT در نقش تامین کننده تاثیر سیبک مورد استفاده قرار گرفتند و کامپوزیت حاصله خواص مورد قبول ترموالکتریک را از خود نشان داد [۷۰].

۳-۲-۲- پیزوالکتریک‌ها

در مواد پیزوالکتریک اعمال یک نیروی مکانیکی، باعث تغییر حالت می‌شود و به نوبه‌ی خود یک ولتاژ الکتریکی تولید می‌نماید یا برعکس اعمال یک ولتاژ باعث یک تغییر حالت مکانیکی در ماده می‌شود که می‌تواند برای تولید یک نیرو مورد استفاده قرار گیرد. این پدیده‌ی کلی، اثر پیزوالکتریک نامیده می‌شود. پدیده پیزوالکتریک (پیزو به معنای فشار در زبان یونانی است) در سال ۱۸۸۰ مشاهده شد. در مواد پیزوالکتریک، هر سلول یا مولکول یک دوقطبی با بارهای مثبت و منفی در هر دو انتهاست. یک هم-راستایی[4] از دوقطبی‌های الکتریکی داخلی وجود

[1] Field Effect Transistor
[2] Organic Thin-Film Transistor
[3] Poly(3-octylthiophene)
[2] Alignment

دارد[۷۱-۷۳]. این هم راستایی می‌تواند باعث یک بار سطحی شود ولی این بار به وسیله‌ی بارهای آزاد حاضر در اتمسفر اطراف خنثی شده است. اعمال یک نیرو به مواد پیزوالکتریک باعث رخداد تغییرات شکلی می‌شود که به نوبه‌ی خود، حالت خنثیِ سطحی را به وسیله ی تغییر آرایشِ دوقطبی‌ها، دگرگون می‌سازد. معکوس این عمل نیز قابل دستیابی می‌باشد. اعمال یک ولتاژ باعث می‌شود که مولکول های قطبی شده خودشان را با میدان الکتریکی هم راستا سازند که به نوبه ی خود، باعث گسترش تغییر شکل می‌شود [۱۱, ۷۴, ۷۵].

مواد زیادی، هم طبیعی و هم بشر ساخت، اثر پیزو الکتریک را نشان می‌دهند. در نساجی پلیمری با نام PVDF (پلی وینیلیدین دی فلورید) کاربردهای فراوان یافته است. در PVDF پیزوالکتریک، هنگامی که یک میدان الکتریکی اعمال شود یا ماده به صورت مکانیکی منحرف شود، مولکول‌های بلند زنجیر در هم پیچیده شده همدیگر را جذب و دفع می‌کنند[۷۶, ۷۷]. PVDF به شکل فیلم، در سایزها و ضخامت‌های انتخابی در دسترس می‌باشد و می‌تواند در بین دو لایه‌ی رسانا، به عنوان الکترودها، لمینیت شده و سیگنال لازم از دو الکترود به دست می آید. این ساختارها می توانند به عنوان ساختارهای حسگریِ کششی و همچنین یک ساختار فشاری حسگری مورد استفاده قرار بگیرند. ساختارهای پیزوالکتریک همچنین نسبت به فشاری به کوچکی امواج صدا حساس هستند. بسته به لمینیت دستگاه، که عمدتاً مرتبط با کیفیت پارچه است، این ساختارها قابلیت ضبط صدا را دارند[۹, ۷۸, ۷۹].

گزارش دیگری در سال ۲۰۱۳ مبنی بر قطبش و تعیین مشخصات یک لیف دوجزئی پیزوالکتریک ذوب ریسی شدهبا PVDF به عنوان جزء پوسته و یک کامپوزیت رسانا با کربن سیاه (CB) و پلی اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) به عنوان جزء مغزی، شده است. برای نشان دادن خواص حسگری الیاف، آنها در یک منسوج پارچه ای بافته شده‌اند که یک حسگر نیرو ساخته شده و برای تشخیص ضربان قلب مورد استفاده قرار گرفته است [۸۰]. خواص برداشت انرژی یک منسوج پیزوالکتریک الیاف دوجزئی نیز توسط نیلسون و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۸۱].

کونکا و همکارانش تحقیقی در مورد ویژگی‌های حسگری برپایه الیاف کامپوزیتی پیزوالکتریک (PFCTs)[1] انجام دادند تا بتوانند از آن‌ها به‌عنوان حسگری در داخل ساختارهای کامپوزیتی برای نظارت بر تمرکز درجات تنش/کرنش در موقعیت‌های بحرانی استفاده نمایند[۸۲]. الیاف پیزوالکتریک هسته فلزی (MCPFs) نوع دیگری از این گونه بوده که توانایی های بالقوه‌ای از خود نشان می‌دهد،توسعه‌ی این الیاف

[1] Piezoelectric Fiber Composite Transducers

به دلیل سختی تولید آن‌ها،هنوز به رشد کافی و مرحله بلوغ نرسیده است در این رابطه، دولای و همکارانش، لیف هسته فلزی پیزوالکتریکی را با فرایند پوشش چندگانه بر روی سیم های پلاتینی تولید نمودند[۸۳].

نانو ژنراتورهای پوشیدنی اهمیتی حیاتی برای دستگاه‌های پوشیدنی و الکترونیکی پرتابل دارند[۸۴, ۸۵]. در تحقیقی، زنگ و همکارانش یک لیف پیزوالکتریک هیبریدی انعطاف پذیر برپایه ی ژنراتورهای پارچه ای دوبعدی را گزارش کرده‌اند که می‌تواند به طور امیدوارکننده‌ای به راحتی قابلیت ادغام با البسه را داشته باشد و انرژی مکانیکی حرکات بدن انسان را به الکتریسیته تبدیل کند[۸۶]. در پژوهش دیگری، نانو سیم‌های ZnO-ZnSe پین شکل، آرایش یافته بر سطح یک لیف کربنی (CF/ ZnO-ZnSe) سنتز شدند. این نوع از ساختارهای CF/ ZnO-ZnSe، دارای پتانسیل بالایی برای نانو ژنراتورها هستند [۸۷]. کامپوزیت ها بر پایه‌ی منسوجات سه بعدی درطیف کاربردی وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند . در مقاله‌ای تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های کاربردی که با استفاده از الیاف پیزوسرامیک به شکلی سه بعدی بافته شده‌اند ارائه گردیده است. [۸۸].

کچیچه و همکارانش، فیلامنت‌هایی را بر پایه‌ی پلی (وینیلیدین فلورید-کو-تری فلوئورو اتیلن) و برپایه مس تولید نمودند سپس خواص مکانیکی آنها را مشخص کردند و در نهایت توانستند برمبنای این دو فیلامت ساختاری منسوجی را تولید کنند تا دارای قابلیت تشخیصی یا حسگری باشد. با استفاده از این پارچه تنش و کرنش اعمالی در آزمایشگاه را از طریق اندازه گیری سیگنال الکتریکی تولیدی پارچه اندازه گرفتند[۸۹].

۴-۲-۲- آلیاژها/پلیمرها با حافظه شکلی[1]

قاب‌های عینک‌هایی که به طور شگفت انگیزی قابلیت خمش دارند، استنت‌های پزشکی که برای باز کردن عروق هستند و تعدادی از ابزارهای دیگر، تماماً نماد یک فناوری رایج و جاافتاده هستند. رفتار جالب هر یک از این ابزار متکی بر پدیده‌ای به نام اثر حافظه شکلی است که در اثر بازآرایش یافتگی مولکولی در موادی که قابلیت حافظه شکلی دارند پس از تغییر شکل با محرک‌هایی نظیر دما و یا جریان الکتریکی انجام می‌پذیرد [۹۰]. برای مثال، ماده می‌تواند به یک شکل قرارگیری در دمای بالا برسد و در دمای پایین به طور چشمگیری تغییر حالت دهد و سپس با استفاده از گرما (گرما از هر نوعی) و یک جریان الکتریکی به حالت اصلی‌اش برگردد. پدیده‌ی

[1]Shape Memory Alloys

سوپرالاستیسیته (قابلیتی از مواد که متحمل الاستیک بسیار بزرگ یا تغییر حالت برگشت پذیر می‌شود)، نیز به آلیاژهای دارای حافظه‌ی شکلی مرتبط است. آلیاژهای نیکل-تیتانیوم (NiTi) در استفاده از کاربرد اثر حافظه شکلی رایج هستند. این آلیاژها می‌توانند در فرم نهایی محصول در دو حالت یا فاز کریستالی متفاوت وابسته به دما، وجود داشته باشند. فاز اولیه و با دمای بالاتر حالت آستنایت نامیده می‌شود. فاز با دمای پایین‌تر، حالت مارتنزایت نامیده می شود. ماده در حالت آستنایت کاملا قوی و سخت است در حالی که در فاز مارتنزایت، نرم وانعطاف پذیر است. ساختار کریستالی آستنایت، ساختار ساده‌ی مکعبی مرکز پر است در حالی که، مارتنزایت ساختار پیچیده‌تر رومبیک را دارد. ماده در آستنایت دما بالا، شبیه به بیش تر فلزات رفتار می‌کند و در دمای پایین یعنی حالت مارتنزایت، ساختار کریستالی دوقلو دارد که شامل جابه جایی متقارن آینه‌ای اتم‌ها در سرتاسر یک صفحه ی خاص می‌باشد. باندهایی دو گانه شکل می گیرند که می‌توانند به راحتی و بدون ایجاد نقص‌هایی مانند جا به جا شدگی، منتقل شوند و تغییر حالت های بزرگ می‌توانند با نیروی کم اتفاق بیافتند. در این حالت، ماده مانند قلع خالص رفتار می‌کند که می تواند (تاحدی) به عقب و جلو، بدون اعمال کرنش شدید که می تواند باعث شکستن شود، به صورت مکرر خم شود[۱۱].

هر دو پدیده‌ی اولیه‌ی مرتبط با اثرات حافظه شکلی- اثرات حرارتی و اثرات مکانیکی – کاربردهای مستقیمی دارند. در اثر حافظه شکلیِ مرتبط با حرارت محیط، یک ماده، حالتی اولیه در فاز آستنایت که در دمای بالاست، دارد و می‌تواند متعاقباً در فاز مارتنزایت که در دمای پایین است، تغییر حالت یابد. وقتی تا دمای بالای فاز آستنایت به وسیله‌ی محرک گرمایی، مانند یک جریان الکتریکی (که البته هر نوع منبع گرمایی کار خواهد کرد)، آلیاژ به حالت اولیه‌ی خود باز می‌گردد. در طول این پروسه، نیروی زیادی به وسیله‌ی مواد تغییر دهنده‌ی فاز ایجاد می‌شود. بنابراین این ماده می‌تواند به عنوان یک فعال کننده (محرک) در کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار بگیرد. در، اثر حافظه‌ی شکلی مرتبط با محیط‌های مکانیکی یا سوپرالاستیسیتی، ماده می‌تواند متحمل یک تغییر حالت الاستیک (به وسیله‌ی یک نیروی خارجی) شود که می‌تواند به اندازه‌ی بیست بار یا بیش‌تر از کرنش الاستیک استیل معمولی باشد. بنابراین، مواد سوپرالاستیک توانایی‌های باورنکردنی در تغییر شکل و بازگشت جهشی (فنری مانند) به حالت اصلی شان دارند[۱۱].

در سال ۲۰۰۷، کامپوزیت‌های رزین اپوکسی با الیاف کوتاه آلیاژهای Ni-Ti توسعه داده شدند. خصوصیات ارتعاشی کامپوزیت‌های SMA می‌تواند به وسیله‌ی افزودن مقدار کمی از الیاف کوتاه SMA بهبود یابد

[۴۹]. یک محرک Strain-Fiber با استفاده از فنرآلیاژهای دارای حافظه شکلی به وسیله‌ی چن و همکارانش پیشنهاد شده و به طور آزمایشی مورد مطالعه قرار گرفته است[۹۱]. پتانسیل سوپر الاستیک الیاف آلیاژهای دارای حافظه‌ی شکلی (SMA) برای افزایش توانایی دمپینگ و سختی ماتریکس پلیمر ترموست، توسط راقاوان و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. اصلاحات قابل ملاحظه‌ای در خواص دمپینگ، کششی و ضربه‌ای ماتریکس پلیمری به علت تقویت کردن آن‌ها با الیاف SMA انجام گرفت که حاکی از مزایای کاربرد این الیاف درکامپوزیت‌های پلیمری است[۹۲].

کشف اثر حافظه شکلی توسط چنگ و ریاد در سال ۱۹۳۲، یکی از نقاط عطف در زمینه‌ی مواد فعال به حساب می‌آید. آلیاژهای دارای حافظه شکلی با داشتن خواص برجسته از جمله اندازه کوچک و استحکام زیاد، کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند. با این حال آن‌ها معایب آشکاری مانند هزینه‌ی زیاد تولید، محدودیت بازیابی تغییر شکل و سمیت قابل ملاحظه دارند. توجه روزافزون به پلیمرهای دارای حافظه شکلی (SMPs) به دلیل مزایای کاربردی و فنی این مواد است. قابلیت تغییر شکلی زیاد و همچنین دارا بودن بازه وسیع‌تری برای تغییر خواص مکانیکی در مقایسه با آلیاژهای دارای حافظه شکلی فلزات و سرامیک ها، علاوه بر ارزانی، وزن کم و فرآیند پذیری آسان و قابلیت تنظیم دمای تغییر شکل، از مزایای دیگر پلیمرهای دارای حافظه شکلی به شمار می‌رود. افزون براین زیست سازگای، غیر سمی بودن و زیست تخریب پذیری را نیز می‌توان بر مزایای SMPها افزود[۹۳]. لی و زنگ، یک کامپوزیت ذرات معلق دیسپرس شده با ذرات ترموپلاستیک و الیاف کوتاه پلیمرهای دارای حافظه شکلی تولید کردند و توانایی آن ها برای ترمیم شکاف های بسیار باز به طور تکرار پذیر در هر دو مرحله ی close-then-heal (CTH) در طرح خود ترمیم پذیری را مورد ارزیابی قرار دادند. مشخص گردید که کامپوزیت قادر به ترمیم کردن ترک‌های باز به دفعات زیاد است و راندمان ترمیمی قابل توجهی نیز دارد[۹۴]. در تحقیقی دیگر نیز الیاف دارای حافظه شکلی(SMPFs)[1] برای ترمیم شکاف‌های ماکروسکوپی، مورد استفاده قرار گرفتند و پس از بررسی مشخص گردید که این کامپوزیت نیز قابلیت ترمیم مکرر شکاف‌های مکروسکوپی را دارد[۹۵].

پلی‌یورتان دارای حافظه‌ی شکلی (SMPU[2]) قابلیت ترکیب شدن با منسوجات را داشته و خواص جدیدی به آن‌ها می‌افزاید. هنگامی که یک SMPU با منسوجات لمینیت شود، یک منسوج هوشمند (ضد آب یا ضد باد یا منسوجی با قابلیت تنفس) شکل می-گیرد. این پلیمر می‌تواند بر روی پارچه پوشش داده

[1] Shape Memory Polymer Fibers

[2] Shape Memory Polyurethane

شود و نفوذپذیری پارچه را با تغییر دمای بدن یا محیط اطراف پوشنده‌ی لباس تطبیق دهدکه می‌تواند از حالت عایق حرارتی کامل تا حالت نفوذپذیری کامل هوا و بخار آب تغییر کند. هنگامی که دمای بدن پایین است، پارچه با نفوذپذیری کم باقی می‌ماند و گرمای بدن را نگه می‌دارد. با افزایش دمای بدن، نفوذ پذیری رطوبتی پارچه افزایش یافته و بخار آب به هوای بیرون می‌رود. برخی از کاربردهای پلی‌یورتان دارای حافظه‌ی شکلی در منسوجات عبارتند از: البسه محافظ حرارتی، لباس‌های ورزشی، لباس زیر، لباس روپوش، دستکش، جوراب، الیاف با حافظه شکلی، البسه هوشمند و غیره [۹۶].

۳- نتیجه گیری

در این مطالعه مروری مواد هوشمند براساس مدلی نوین تحت نام مدل کاربردی تقسیم بندی شدند، این مدل با توجه به آن‌که تفکیک پذیری منسوجات در سه دسته تعریف شده کلاسیک مواد هوشمند یعنی حسگر، عملگرا و پردازشگر به‌خوبی صورت نمی‌گیرد می‌تواند کارامدتر باشد. علت این موضوع آن‌است که تعامل منسوجات و موادهوشمند با آن‌که دارای رشد فزاینده ای است و بسیار چشمگیر بوده است ولیکن هنوز به مرحله بلوغ نرسیده و نیاز به توسعه بیشتر دارد، البته این موضوع شاید برای کلیه مصنوعات هوشمند دیگرکه بخواهند فراتر از مرزهای آزمایشگاه بروند و خود را به قابلیت کاربری در جامعه برسانند نیز صدق می‌کند به‌عنوان مثال در حوزه‌هایی نظیر مواد هوشمند با قابلیت تغییر رفتار رئولوژیکی و یا مکانوکرومیکی و یا حتی مواد هوشمند با حافظه شکلی این موضوع مشهود است.

از طرف دیگر با توجه به نیازهای جوامع امروزی که هرروز وابستگی آن‌ها را به تجهیزات الکترونیکی همراه افزایش می‌دهد نیاز به توسعه و رشد قابل ملاحضه در زمینه منسوجات هوشمند کاملاً مشهود و اجتناب-ناپذیر است، علت این موضوع می‌تواند لاینفک بودن منسوجات به‌عنوان جزء پوششی انسان باشد که باید بتواند نیازهایی نظیر تامین انرژی الکتریکی برای تجهیزات الکترونیکی، کنترل سلامت و علائم حیاتی انسان و سبک نمودن تجهیزات الکترونیکی همراه و ملزوم به‌واسطه بهره‌مندی از ویژگی‌های ذاتی منسوج تامین نماید. در هر صورت ملاحظه می‌شود که هنوز راه بسیار زیادی برای معرفی و ارتقای منسوجات هوشمند باید پیموده شود تا بتوان از بیشتر ظرفیت‌های مواد هوشمند و تنوع آن‌ها جهت منسوجات استفاده نمود.

۴-مراجع

[۱] N. Rafizadeh Zaeem and K. Karami, "An Investigation on Blood Barrier and Antibacterial Properties of Fluorocarbon and Gentamicin Coated Textiles," Applied Nanomaterials and Smart Polymers, vol. 1, pp. 1-11, 2023.

[۲] R. Khajavi, N. Rafizadeh Zaeem, Z . Assgharpour, and M. K. Rahimi, "Polypropylene non-woven coating with lipid/carboxymethyl cellulose/nanosilver nanomulsion for wound dressese application," Journal of Textile Science and Technology, vol. 6, pp. 23-29, 2017.

[۳] M. Abbasipour, M. Mirjalili ,R. Khajavi, and M. M. Majidi, "Coated cotton gauze with Ag/ZnO/chitosan nanocomposite as a modern wound dressing," Journal of Engineered Fibers and Fabrics, vol. 9, p. 155892501400900114, 2014.

[۴] M. Ahrari, R. Khajavi, M. K. Dolatabadi, T. Toliyat, and A. Rashidi, "A review on application of phase change materials in textiles finishing," International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, vol. 11, pp. 400-405, 2017.

[۵] A. Berendjchi, R. Khajavi, A. A. Yousefi, and M. E. Yazdanshenas, "Improved continuity of reduced graphene oxide on polyester fabric by use of polypyrrole to achieve a highly electro-conductive and flexible substrate," Applied Surface Science, vol. 363, pp. 264-272, 2016.

[۶] N. Goddard, R. Kemp, and R. Lane, "An overview of smart technology," Packaging Technology and Science: An International Journal, vol. 10, pp. 129-143, 1997.

[۷] J. A. Harvey, "Smart materials," M. KUTZ, Hg. Handbook of Materials Selection. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc, pp. 401-418, 2002.

[۸] C. M. Hussain and P. Di Sia, Handbook of smart materials, technologies, and devices: applications of industry 4.0: Springer Nature, 2022.

[۹] L. Berglin, "Interactive Textile Structures Creating Multifunctional Textiles based on Smart Materials [Electronic resource]," PhD Thesis/LTH Berglin.– Gothenburg, Sweden: Department of Computer Science.…

[۱۰] M. Abbasipour and R. Khajavi, "Electrospun Nanofibers for Energy Harvesting," in Electrospun Nanofibers: Principles, Technology and Novel Applications, ed :Springer, 2022, pp. 721-736.

[۱۱] M. Addington and D. Schodek, "Smart materials and new technologies. Burlington, MA," ed: USA: Elsevier, 2005.

[۱۲] I. N. Qader, K. Mediha, F. Dagdelen, and Y. AYDOĞDU, "A review of smart materials: researches and applications," El-Cezeri, vol. 6, pp. 755-788, 2019.

[۱۳] N. Chamankar, R. Khajavi, A. A. Yousefi, A. Rashidi, and F. Golestanifard, "A flexible piezoelectric pressure sensor based on PVDF nanocomposite fibers doped with PZT particles for energy harvesting applications," Ceramics International, vol. 46, pp. 19669-19681, 2020.

[۱۴] T. A. Khattab and M. S. Abdelrahman, "From smart materials to chromic textiles," Advances in functional finishing of textiles, pp. 257-274, 2020.

[۱۵] R. Christie, "Chromic materials for technical textile applications," in Advances in the dyeing and finishing of technical textiles, ed: Elsevier, 2013, pp. 3-36.

[۱۶] M. Viková, "Type of chromic materials," in Chromic Materials, ed: Apple Academic Press, 2018, pp. 53-126.

[۱۷] Y. Yang, M .Li, and S. Fu, "Screen-printed photochromic textiles with high fastness prepared by self-adhesive polymer latex particles," Progress in Organic Coatings, vol. 158, p. 106348, 2021.

[۱۸] J. Zhang, Q. Zou, and H. Tian, "Photochromic materials: more than meets the eye," Advanced Materials, vol. 25, pp. 378-399, 2013.

[۱۹] A. P. Periyasamy, M. Vikova, and M. Vik, "A review of photochromism in textiles and its measurement," Textile Progress, vol. 49, pp. 53-136, 2017.

[۲۰] T. Cheng, T. Lin, J. Fang, and R. Brady, "Photochromic wool fabrics from a hybrid silica coating," Textile Research Journal, vol. 77, pp. 923-928, 2007.

[۲۱] Z. He, B. Bao, J. Fan, W. Wang, and D. Yu, "Photochromic cotton fabric based on microcapsule technology with anti-fouling properties ",Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 594, p. 124661, 2020.

[۲۲] E. Refaat, M. Mohamed, A. Youssif, S. Ali, A. Fathallah, D. Maamoun, et al., "Uv protection and water repellent finishing of polyester fabric printed with photochromic dyes," Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science, 2023.

[۲۳] A. Hakami, S. S. Srinivasan, P. K. Biswas, A. Krishnegowda, S. L. Wallen, and E. K. Stefanakos, "Review on thermochromic materials: development, characterization, and applications," Journal of Coatings Technology and Research, vol. 19, pp. 377-402, 2022.

[۲۴] X. Ji, W. Liu, Y. Yin, C. Wang, and F. Torrisi, "A graphene-based electro-thermochromic textile display," Journal of Materials Chemistry C, vol. 8, pp. 15788-15794, 2.۰۲۰

[۲۵] S. Khamseh and M. Sadeghi Kiakhani, "Application of Emerging Technologies using for Fabrication of Smart Surfaces on Textiles," Journal of Textile Science and Technology, vol. 7, pp. 29-38, 2018.

[۲۶] A. Dybko, W. Wroblewski, E. Roźniecka, J. Maciejewski, and Z. Brzozka, "Comparison of two thermochromic solutions for fibre optic temperature probes," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 76, pp. 203-207, 1999.

[۲۷] I. S. Lopez, A. L. Mendonça, M. Fernandes, V. de Zea Bermudez, J. Morgado, G. Del Pozo, et al., "Europium complex-based thermochromic sensor for integration in plastic optical fibres," Optical Materials, vol. 34, pp. 1447-1450, 2012.

[۲۸] C. Fernández-Valdivielso, I. Matıas, and F. Arregui, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 101, pp. 107-116, 2002.

[۲۹] D. Xue and T. Zhao, "The electrothermal color-changing fabric based on high-sensitivity thermochromic microcapsules ",Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 678, p. 132458, 2023.

[۳۰] C. Calvino, L. Neumann, C. Weder, and S. Schrettl, "Approaches to polymeric mechanochromic materials," Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry , vol. 55, pp. 640-652, 2017.

[۳۱] Z. Wang and R. Liu, "PEDOT: PSS-based electrochromic materials for flexible and stretchable devices," Materials Today Electronics, vol. 4, p. 100036, 2023.

[۳۲] M. Gicevicius, I. A. Cechanaviciute, and A. Ramanavicius, "Electrochromic textile composites based on polyaniline-coated metallized conductive fabrics," Journal of the electrochemical society, vol. 167, p. 155515, 2020.

[۳۳] P. Yang, P. Sun, and W. Mai, "Electrochromic energy storage devices," Materials today, vol ,۱۹ .pp. 394-402, 2016.

[۳۴] S. Sinha, R. Daniels, O. Yassin, M. Baczkowski, M. Tefferi, A. Deshmukh, et al., "Electrochromic fabric displays from a robust, open-air fabrication technique," Advanced Materials Technologies, vol. 7, p. 2100548, 2022.

[۳۵] S .Raoux, "Phase change materials," Annual Review of Materials Research, vol. 39, pp. 25-48, 2009.

[۳۶] S. Raoux, F. Xiong, M. Wuttig, and E. Pop, "Phase change materials and phase change memory," MRS bulletin, vol. 39, pp. 703-710, 2014.

[۳۷] X. Tao, Smart fibres, fabrics and clothing: fundamentals and applications: Elsevier, 2001.

[۳۸] S. Mondal, "Phase change materials for smart textiles–An overview," Applied thermal engineering, vol. 28, pp. 1536-1550, 2008.

[۳۹] F. Salaün, "Phase change materials for textile application," Textile Industry and Environment, pp. 1-27, 2019.

[۴۰] A. Berendjchi, R. Khajavi, A. A. Yousefi, and M. E. Yazdanshenas, "Surface characteristics of coated polyester fabric with reduced graphene oxide and polypyrrole," Applied Surface Science, vol. 367, pp. 36-42, 2016.

[۴۱] I.-A. Pavel, S. Lakard, and B. Lakard, "Flexible sensors based on conductive polymers," Chemosensors, vol. 10, p. 97, 2022.

[۴۲] C. Cochrane, V. Koncar, M. Lewandowski, and C. Dufour, "Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite," Sensors, vol. 7, pp. 473-492, 2007.

[۴۳] S. Golabzaei, R. Khajavi, H. A. Shayanfar, M. E. Yazdanshenas, and N. Talebi, "Fabrication and characterization of a flexible capacitive sensor on PET fabric," International Journal of Clothing Science and Technology, vol. 30, pp. 687-697, 2018.

[۴۴] E. Hakansson, A. Kaynak, T. Lin, S. Nahavandi, T. Jones, and E. Hu, "Characterization of conducting polymer coated synthetic fabrics for heat generation," Synthetic Metals, vol. 144, pp. 21-28, 2004.

[۴۵] J. Wu, D. Zhou, C. O. Too, and G. G. Wallace, "Conducting polymer coated lycra," Synthetic Metals, vol. 155, pp. 698-701, 2005.

[۴۶] M. Addington, "Smart Materials and Sustainability," Austin: Center for Sustainable Development-The University of Texas at Austin, 2010.

[۴۷] J. Uchida, B. Soberats, M. Gupta, and T. Kato, "Advanced functional liquid crystals," Advanced Materials, vol. 34, p. 2109063, 2022.

[۴۸] B. Bahadur, Liquid Crystal-Applications And Uses (Volume 1) vol. 1: World scientific, 1990.

[۴۹] S. Mathews, G. Farrell, and Y. Semenova, "All-fiber polarimetric electric field sensing using liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers," Sensors and Actuators A: Physical ,vol. 167, pp. 54-59, 2011.

[۵۰] M. K. Singh, "Flexible photovoltaic textiles for smart applications," Sol. Cells New Asp. Solut, pp. 43-68, 2011.

[۵۱] F. Ye, S. Dong, Z. Tian, S. Yao, Z. Zhou, and S. Wang, "Fabrication of the PLA/Sr2MgSi2O7: Eu2+, Dy3 +long-persistent luminescence composite fibers by electrospinning," Optical Materials, vol. 36, pp. 463-466, 2013.

[۵۲] F. Ye, S. Dong, Z. Tian, S. Yao, Z. Zhou, and S. Wang, "Fabrication and

characterization of long-persistent luminescence/polymer (Ca2MgSi2O7: Eu2+, Dy3+/PLA) composite fibers by electrospinning," Optical Materials, vol. 45, pp. 64-68, 2015.

[۵۳] N. Santos, A. Fernandes, L. Alves, N. Sobolev, E. Alves, K. Lorenz, et al., "Microprobe analysis, iono-and photo-luminescence of Mn2+ activated ZnGa2O4 fibres," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 306, pp. 195-200, 2013.

[۵۴] A. Kir'yanov, V. Minkovich, Y. O. Barmenkov, M. M. Gamez, and A. Martinez-Rios, "Multi-wavelength visible up-converted luminescence in novel heavily doped Ytterbium–Holmium silica fiber under low-power IR diode pumping," Journal of luminescence, vol. 111, pp. 1-8, 2005.

[۵۵] C. A. Kelly, C. Toncelli, J. P. Kerry, and D. B. Papkovsky, "Discrete O2 sensors produced by a spotting method on polyolefin fabric substrates," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 203, pp. 935-940, 2014.

[۵۶] A. M. C. Santos, M. Mohammadi, and S. Afshar, "Investigation of a fibre-coupled beryllium oxide (BeO) ceramic luminescence dosimetry system," Radiation measurements, vol. 70, pp. 52-58, 2014.

[۵۷] F. Klein, S. Greilich, C. E. Andersen, L. R. Lindvold, and O. Jäkel, "A thin layer fiber-coupled luminescence dosimeter based on Al2O3: C," Radiation measurements, vol. 46, pp.۲۰۱۱ ,۱۶۰۹-۱۶۰۷ .

[۵۸] J. Díaz-García, J. M. Costa-Fernández, N. Bordel-García, and A. Sanz-Medel, "Room-temperature phosphorescence fiber-optic instrumentation for simultaneous multiposition analysis of dissolved oxygen," Analytica chimica acta, vol ,۴۲۹ .pp. 55-64, 2001.

[۵۹] M. de Vos, R. Torah, S. Beeby, and J. Tudor, "Functional electronic screen-printing–electroluminescent lamps on fabric," Procedia Engineering, vol. 87, pp. 1513-1516, 2014.

[۶۰] L. I. Berger, Semiconductor materials: CRC press.۲۰۲۰ ,

[۶۱] A. Chaves, J. G. Azadani, H. Alsalman, D. Da Costa, R. Frisenda, A. Chaves, et al., "Bandgap engineering of two-dimensional semiconductor materials," npj 2D Materials and Applications, vol. 4, p. 29, 2020.

[۶۲] Z. Mao, W. Wang, Y. Liu, L. Zhang , H. Xu, and Y. Zhong, "Infrared stealth property based on semiconductor (M)-to-metallic (R) phase transition characteristics of W-doped VO2 thin films coated on cotton fabrics," Thin solid films, vol. 558, pp. 208-214, 2014.

[۶۳] X. Huang, D. Ji, H. Fuchs, W. Hu, and T. Li, "Recent progress in organic phototransistors: Semiconductor materials, device structures and optoelectronic applications," ChemPhotoChem, vol. 4, pp. 9-38, 2020.

[۶۴] D. K. Schroder, Semiconductor material and device characterization :John Wiley & Sons, 2015.

[۶۵] M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, and R. N. Bhattacharya, Semiconductor materials for solar photovoltaic cells vol. 218: Springer, 2016.

[۶۶] A. Ehrmann and T. Blachowicz, "Recent coating materials for textile-based solar cells ",AIMS Materials Science, vol. 6, 2019.

[۶۷] W. Kylberg, F. A. De Castro, P. Chabrecek, U. Sonderegger, B. T. T. Chu, F. Nüesch, et al., "Woven electrodes for flexible organic photovoltaic cells," Advanced Materials, vol. 23, pp. 1015-1019, 2011.

[۶۸] R .González and N. J. Pinto, "Electrospun poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) fiber field effect transistor," Synthetic Metals, vol. 151, pp. 275-278, 2005.

[۶۹] H. Castro, E. Sowade, J. Rocha, P. Alpuim, A. Machado, R. Baumann, et al., "Degradation of all-inkjet-printed organic thin-film transistors with TIPS-pentacene under processes applied in textile manufacturing," Organic Electronics, vol. 22, pp. 12-19, 2015.

[۷۰] D. Wang, Y. Su, D. Chen, L. Wang, X. Xiang, and D. Zhu, "Preparation and characterization of poly (3-octylthiophene)/carbon fiber thermoelectric composite materials," Composites Part B: Engineering, vol. 69, pp. 467-471, 2015.

[۷۱] P. Dineva, D. Gross, R. Müller, T. Rangelov, P. Dineva, D. Gross, et al., Piezoelectric materials: Springer, 201.۴

[۷۲] M. Abbasipour, R. Khajavi, and A. H. Akbarzadeh, "A comprehensive review on piezoelectric polymeric and ceramic nanogenerators," Advanced Engineering Materials, vol. 24, p. 2101312, 2022.

[۷۳] N. Chamankar, R. Khajavi, A. Yousefy, A. Rashidi, and F. Golestanifard, "PZT ELECTROSPUN NANOFIBERS FOR ENERGY HARVESTING STRATEGIES".

[۷۴] M. Habib, I. Lantgios, and K. Hornbostel, "A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials," Journal of Physics D: Applied Physics, 2022.

[۷۵] N. Chamankar, R. Khajavi, A. A. Yousefi, A. s. Rashidi, and F. Golestanifard, "Comparing the piezo, pyro and dielectric properties of PZT particles synthesized by sol–gel and electrospinning methods," Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol ,۳۰ .pp. 8721-8735, 2019.

[۷۶] M. Abbasipour, R. Khajavi, A. A. Yousefi, M. E. Yazdanshenas, and F. Razaghian, "The piezoelectric response of electrospun PVDF nanofibers with graphene oxide, graphene, and halloysite nanofillers: a comparative study," Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 28, pp. 15942-15952, 2017.

[۷۷] R. Khajavi and M. Abbasipour, "Piezoelectric PVDF polymeric films and fibers: polymorphisms, measurements, and applications," Industrial applications for intelligent polymers and coatings, pp. 313-336, 2016.

[۷۸] M. C. Sekhar, E. Veena, N. S. Kumar, K. C. B. Naidu, A. Mallikarjuna, and D. B. Basha, "A review on piezoelectric materials and their applications," Crystal Research and Technology, vol. 58, p. 2200130, 2023.

[۷۹] M. Abbasipour, R. Khajavi, A. A. Yousefi, M. E. Yazdanshenas, F. Razaghian, and A. Akbarzadeh, "Improving piezoelectric and pyroelectric properties of electrospun PVDF nanofibers using nanofillers for energy harvesting application," Polymers for Advanced Technologies, vol. 30, pp. 279-291, 2019.

[۸۰] E. Nilsson, A. Lund, C. Jonasson, C. Johansson, and B. Hagström, "Poling and characterization of piezoelectric polymer fibers for use in textile sensors," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 201, pp ,۴۸۶-۴۷۷ . .۲۰۱۳

[۸۱] E. Nilsson, L. Mateu, P. Spies, and B. Hagström, "Energy harvesting from piezoelectric textile fibers," Procedia Engineering, vol. 87, pp. 1569-1572, 2014.

[۸۲] H. P. Konka, M. Wahab, and K. Lian, "Piezoelectric fiber composite transducers for health monitoring in composite structures,"

Sensors and Actuators A: Physical, vol. 194, pp. 84-94, 2013.

[۸۳] A. Dolay, C. Courtois, S. d'Astorg, M. Rguiti, J.-L. Petitniot, and A. Leriche, "Fabrication and characterization of metal core piezoelectric fibres by dip coating process," Journal of the European Ceramic Society, vol. 34, pp. 2951-2957, 2014.

[۸۴] D. G. Dassanayaka, T. M. Alves, N. D. Wanasekara, I. G. Dharmasena, and J. Ventura, "Recent progresses in wearable triboelectric nanogenerators," Advanced Functional Materials, vol. 32, p. 2205438, 2022.

[۸۵] F. Karimdehnavi, A. Valipouri, and A. Karimian, "Evaluating the Triboelectric Performance of wearable Textiles in the conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy," Journal of Textile Science and Technology, vol. 9, pp. 51-57, 2020.

[۸۶] M. Zhang, T. Gao, J. Wang, J. Liao, Y. Qiu, Q. Yang, et al., "A hybrid fibers based wearable fabric piezoelectric nanogenerator for energy harvesting application," Nano Energy, vol. 13, pp. 298.۲۰۱۵ ,۳۰۵-

[۸۷] C. Liu, W. Zhang, J. Sun, J. Wen, Q. Yang, H. Cuo, et al., "Piezoelectric nanogenerator based on a flexible carbon-fiber/ZnO–ZnSe bilayer structure wire," Applied surface science, vol. 322, pp. 95-100, 2014.

[۸۸] X. Ruan, A. Safari, and T-.W. Chou, "Effective elastic, piezoelectric and dielectric properties of braided fabric composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 30, pp. 1435-1444, 1999.

[۸۹] M. Kechiche, F. Bauer, O. Harzallah, and J.-Y. Drean, "Development of piezoelectric coaxial filament sensors P (VDF-TrFE)/copper for textile structure instrumentation," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 204, pp. 122-130, 2013.

[۹۰] G. Bartkowiak, A. Dąbrowska, and A. Greszta, "Development of smart textile materials with shape memory alloys for application in protective clothing," Materials, vol. 13, p. 689, 2020.

[۹۱] C.-F. Chen, R.-T. Zheng, T.-T. Kung, C.-N. Shauo, and H.-J. Shy, "A strain-fiber actuator by use of shape memory alloy spring," Optik, vol. 120, pp.۲۰۰۹ ,۸۲۳-۸۱۸ .

[۹۲] J. Raghavan, T. Bartkiewicz, S. Boyko, M. Kupriyanov, N. Rajapakse, and B. Yu, "Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites," Composites Part B: Engineering, vol. 41, pp. 214-222, 2010.

[۹۳] J. Leng, X. Lan, and S. Du, "Shape-memory polymer composites," Shape-Memory Polymers and Multifunctional Composites, p. 203, 2010.

[۹۴] G. Li and P. Zhang, "A self-healing particulate composite reinforced with strain hardened short shape memory polymer fibers," Polymer, vol. 54, pp. 5075-5086, 2013.

[۹۵] G. Li, O. Ajisafe, and H. Meng, "Effect of strain hardening of shape memory polymer fibers on healing efficiency of thermosetting polymer composites," Polymer, vol. 54, pp.۲۰۱۳ ,۹۲۸-۹۲۰ .

[۹۶] S. Mondal, J. Hu, Z. Yang, Y. Liu, and Y.-s. Szeto, "Shape memory polyurethane for smart garment," Research Journal of Textile and Apparel, vol. 6, pp. 75-83, 2002.