کاربرد منسوجات در حوزه انرژی
با رویکرد فناوری نانو

نانو تکنولوژی

بخش اول

منتشر شده توسط ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

چکیده

دانش نساجی از کهن‌ترین علوم مورداستفاده بشر بوده است. در گذشته استفاده از این علم به رفع احتیاجات بشر به پوشش محدود بوده است. در دنیای امروز از فناوری نساجی در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، عمران، علوم نظامی و غیره استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر فناوری‌نانو به عنوان یک ابزار کاربردی در علوم مختلف مورداستفاده قرار گرفته که مهندسی نساجی از این اصل مستثنا نبوده است. استفاده از فناوری نانو در تولید منسوجات نانوساختار مورد استفاده در تبدیل، ذخیره و توزیع انرژی از جمله مواردی است که توجه محققان و صنعتگران را به خود معطوف داشته است.

مقدمه

استفاده از فناوری نانوتوان لازم را برای افزایش بازده انرژی در شاخه‌های مختلف صنعتی فراهم آورده و تولید انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی فناوری تولید انرژی را از طریق به کارگیری روش‌های نوین امکان‌پذیر ساخته است. در درازمدت، فناوری نانو نقش چشم‌گیری در تامین انرژی پایدار و حفاظت از محیط زیست ایفا خواهد نمود. در نمودار ۱ نقش فناوری نانو در بخش‌های مختلف زنجیره انرژی نشان داده شده است [۱].

۱- کاربرد فناوری نانو در برداشت و ذخیره انرژی

انرژی در دنیای متمدن امروز از اهمیت فراوانی برخوردار است. تامین میزان مصرف فزاینده انرژی، تنها با استفاده از سوخت‌های فسیلی برگشت‌ناپذیر امکان‌پذیر نخواهد بود. کاهش میزان مصرف انرژی با استفاده از فناوری‌های با کارایی بالا و تبدیل سایر انواع انرژی به انرژی الکتریکی پیشنهادهای موثری برای فائق آمدن بر بحران جهانی انرژی به نظر می‌رسد. در این راستا، استفاده از فناوری نانو برای حل برخی مشکلات یاد شده موثر می‌باشد. برای مثال ساختارهای نانولیفی در مقایسه با ساختارهایی با ابعاد بزرگ‌تر از توان تبدیل انرژی بالاتر و بازدهی بیشتری در ذخیره انرژی برخوردار هستند. در بخش‌های بعد نمونه‌هایی از کاربرد فناوری نانو در زمینه منسوجات مورد استفاده در حوزه انرژی بیان خواهد شد.

۱-۱- نانوالیاف رسانا

۱-٤-۱- الیاف نانولوله کربن: نانولوله‌های کربنی به دلیل خصوصیات ارزشمندی نظیر رسانش الکتریکی (۱۰۵ S/cm)، مدول یانگ (۰,۹ TPa)، استحکام کششی (۱۵۰ GPa)، رسانش حرارتی(۳۵۰۰ W/mK) و خواص نوری به صورت گسترده در تولید الکترود، محرک، فیلتر، ترانزیستور و محصولات با ساختار لیفی مورد استفاده در حوزه انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های مختلفی که برای تولید الیاف نانولوله کربن وجود دارد، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱-٤-۲- الیاف گرافن

گرافن به دلیل سطح مخصوص بالا در حدود ۲۶۳۰ m^2/g، جنبش ذاتی بالا (۲۰۰۰۰۰ cm^2/Vs)، مدول یانگ بالا (حدود 1TPa)، رسانش حرارتی بالا (۵۰۰۰ W/mK) و شفافیت نوری بالا (حدود ٪۹۷/۷) از قابلیت کاربرد فراوان در زمینه‌های مختلف برخوردار است. در پی موفقیت در تولید الیاف نانولوله کربنی، محققین در پی تولید الیاف یک بعدی حاوی صفحات گرافنی هستند. در میان روش‌ها تولید، روش تررسی که در آن کریستال مایع اکسید گرافن از طریق اکسترودر به حمام انعقاد وارد می‌شود، بیش از سایر روش‌ها مورد تائید قرار گرفته است [۲].

۱-۲- سلول‌های خورشیدی (Solar cells)

هرچند تلاش برای افزایش بازده سلول‌های فوتوولتائیک معدنی در حال انجام است، لیکن نفوذ این تجهیزات در بازار مصرف کماکان به دلیل قیمت زیاد در مقایسه با منابع انرژی تجدیدناپذیر به کندی صورت می‌گیرد. تحقیقات نشان می‌دهند که معمولاً در زمان محاسبه بهای تمام شده انرژی خورشیدی، از مزیت طول عمر زیاد سامانه‌های فوتوولتائیک صرف‌نظر می‌شود. زیرا بهای تمام شده برای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تقریباً ۰/۶۵-۰/۱۵ دلار می‌باشد. این قیمت تقریباً ۳ برابر قیمت الکتریسیته تهیه شده از سوخت‌های فسیلی است. علاوه بر قیمت زیاد سلول‌های خورشیدی معدنی، افزایش بالقوه تقاضا برای مصرف کریستال‌های سیلیکونی در صنایع الکترونیک، می‌تواند منجر به بالا رفتن بهای این مواد شود. به صورت تخمینی میزان سیلیکون موردنیاز برای تولید برق موردنیاز یک خانوار (با مصرف متوسط ۲۰ کیلووات ساعت در روز) با استفاده از سلول خورشیدی با بازده ۱۵٪ تقریباً ۱۰۰۰۰ برابر بیش از میزان سیلیکون موردنیاز در یک رایانه می‌باشد. بنابراین لزوم جایگزینی سامانه‌های نوین با سلول‌های خورشیدی معدنی احساس می‌شود [۴،۳]. در حال حاضر تحقیقات بر سلول‌های خورشیدی پلیمری به عنوان جایگزین سلول‌های سیلیکونی در حال انجام است. قیمت

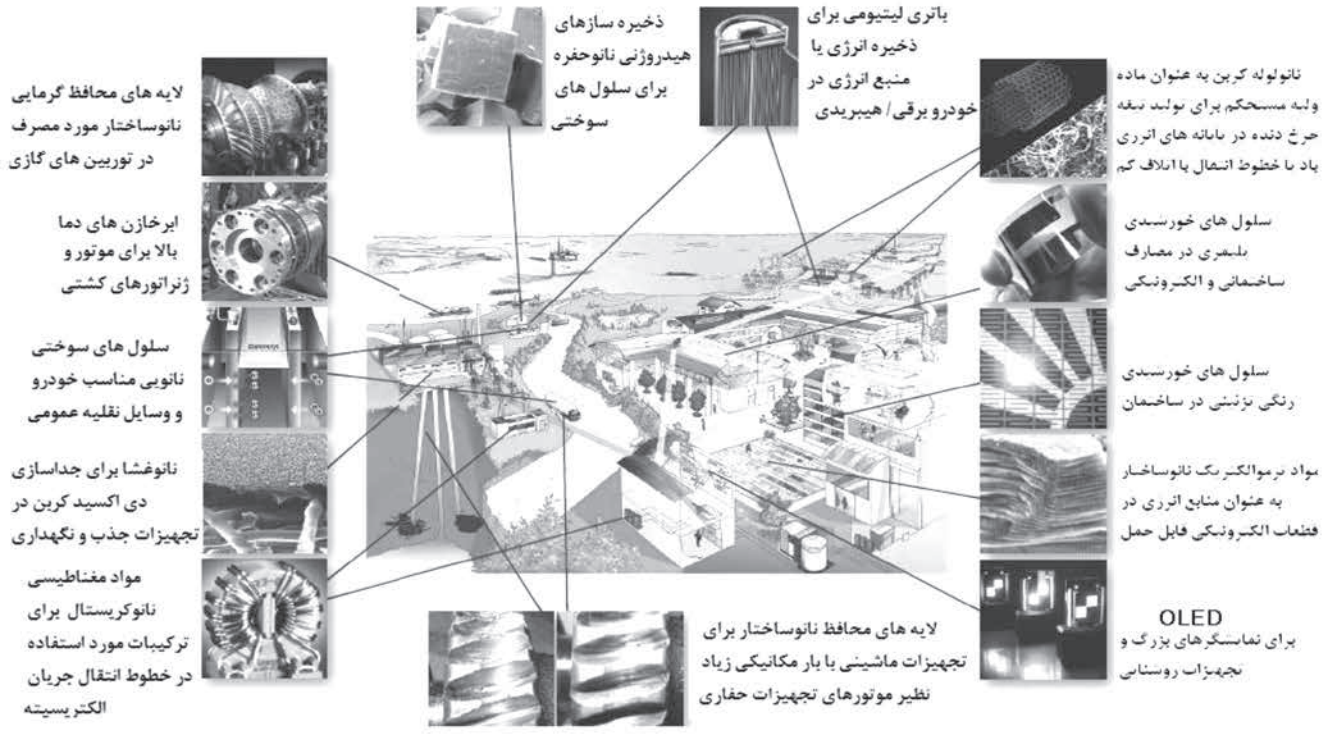
سامانه‌های پلیمری به دلیل امکان تولید انبوه با روش‌های ارزان نظیر فرایندهای تولید از طریق محلول نظیر اسپری، نقاشی و چاپ غلتک به غلتک در مقایسه با سامانه‌های سیلیکونی کمتر است. به نحوی که قیمت این سامانه‌ها در یک سال به سرعت کاهش یافته است (از ۳۵ یورو به ۸ یورو به ازای هر وات انرژی). هرچند طول عمر سلول‌های خورشیدی پلیمری در مقایسه با انواع سیلیکونی به مراتب کمتر است، لیکن قیمت کمتر، سبک‌تر بودن موادپلیمری نسبت به مواد سیلیکونی، انعطاف بیشتر و قابلیت تولید مستقیم بر سطوح مختلف نظیر پلاستیک از جمله مزایای قابل توجه این سامانه‌ها به‌شمار می‌روند [۵].

در میان روش‌های موجود، تولید نانوالیاف به روش الکتروریسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش برای کشیدن محلول پلیمری و تبدیل آن به الیاف، انرژی مکانیکی با انرژی الکتریکی جایگزین شده است. از آنجایی‌که از این روش می‌توان برای تولید الیاف میکرو و نانومتری بهره برد، امکان توسعه فوتوولتائیک‌های آلی به این طریق امکان‌پذیر می‌باشد. ابعاد کوچک این تجهیزات منجر به افزایش بازده جمع‌آوری الیاف و کاهش اتلاف انرژی در آن‌ها می‌شود [۶].

به‌طورکلی دو نوع ساختار نانویی تک‌بعدی با استفاده از روش الکتروریسی تولید می‌شود:

- نانوالیاف غیرآرایش‌مند: الکتروریسی با روش معمول سبب ایجاد یک بستر منسوج بی‌بافت متشکل از نانوالیاف می‌شود که این نوع منسوجات در مصارفی نظیر فیلتراسیون، داربست‌های پزشکی و فیلم‌های پوشش‌دهنده ایمپلنت (مواد قابل کاشت در بدن) مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل۳(a)).

- نانوالیاف آرایش‌مند: الکتروریسی با طراحی و تجهیزات پیشرفته‌تر نظیر صفحات جمع‌آوری الیاف دوار و یا سیلندری که سبب ایجاد نانوالیاف آرایش‌مند یا دسته الیاف تک‌محوره می‌شود، که از این

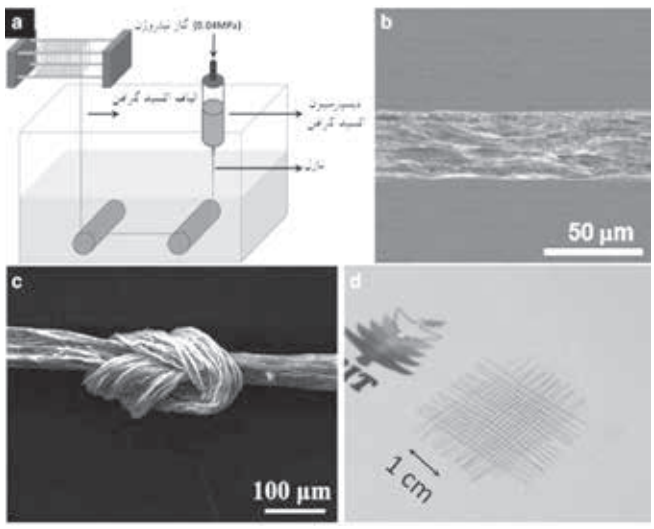


شکل ۱. مثال‌هایی از کاربردهای بالقوه فناوری نانو در بخش انرژی [۱].

الیاف در تجهیزات مبدل انرژی بهره‌برداری می‌شود. (شکل ۴ (b,c)) ساختار تک‌بعدی الیاف اکسید فلزی به منظور هدایت بهتر بار الکتریکی و پلیمرهایی نظیر پلی‌استایرن (PS)، پلی متیل‌متاکریلات (PMMA)، پلی وینیل‌پیرولیدن (PVP) و پلی وینیل‌استات (PVAc) برای تولید این نانوالیاف در نظر گرفته می‌شوند.

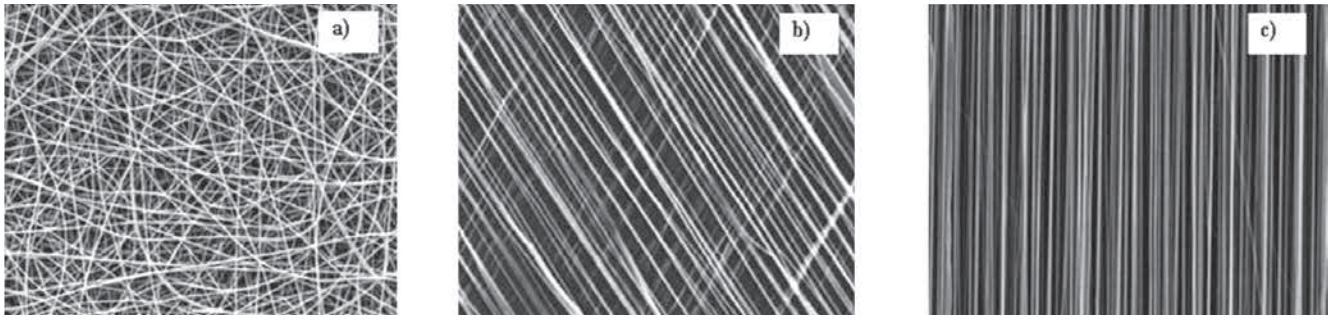
در مقایسه با سایر پلیمرها، PVP در حلال‌های بی‌زیانی نظیر آب انحلال‌پذیر است و به این ترتیب محلول ریسندگی مناسبی برای الکتروریسی فراهم می‌شود و این پلیمر برای تولید الیاف سرامیکی در مقیاس انبوه پیشنهاد می‌شود. با جایگزین شدن الکترولیت‌های مایع با انواع جامد و شبه جامد، امکان تولید سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر فراهم می‌شود. ساختارهای نانولیفی اکسیدفلزی که به روش الکتروریسی تولید می‌شوند در مقایسه با نانوذرات اکسید فلزی از تخلخل بیشتری برخوردار هستند، که این امر قابلیت نفوذ پلیمرهای با گرانروی زیاد (الکترولیت ژل) را فراهم می‌سازد.

در حال حاضر، مهم‌ترین مشکل استفاده از نانوالیاف معدنی در سلول‌های خورشیدی، میزان چسبندگی اندک این الیاف به ماده زمینه پس از تکلیس است. به دلیل استفاده از دمای زیاد در این فرایند که به منظور زدودن پلیمرهای اتصال‌دهنده استفاده می‌شود، تنش زیاد ایجاد شده که سبب جمع‌شدگی بستر نانولیفی و جدا شدن الیاف از ماده زمینه می‌شود [۷].



شکل ۳. تولید الیاف اکسیدگرافن به روش تر ریسی (a)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الیاف (b,c)، پارچه بافته شده از الیاف گرافن (d)

شکل ۲. روش‌های تولید الیاف نانولوله کربن



شکل ٤. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوالیاف الکتروریسی شده به صورت تصادفی (a)، آرایش‌مند تحت زاویه مشخص (b) و آرایش‌مند (c)

۱-۳- سلول‌های سوختی (Fuel cells)

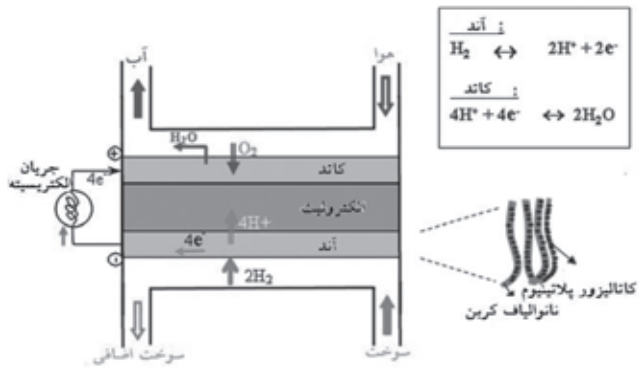
سلول‌های سوختی تجهیزاتی برای تبدیل انرژی حاصل از اکسیدشدن الکتروشیمیایی سوخت‌های هیدروژنی (در حضور یک کاتالیزور فلزی) به جریان الکتریکی است. این تجهیزات نیازمند شارژ مجدد یا تعویض نیستند، از این رو در سال‌های اخیر تحقیقات به افزایش بازده و ظرفیت تولید آنها معطوف شده است. سلول سوختی متشکل از یک الکترولیت است که میان آند (قطب منفی) و کاتد (قطب مثبت) قرار می‌گیرد. نوع الکترولیت تعیین کننده نوع سلول سوختی است. غشاءهای الکترولیتی پلیمری (PEM) و سلول‌های سوختی متانولی برای حرکت خودرو و تجهیزات الکترونیکی قابل حمل نظیر دستیارهای دیجیتال شخصی (PDAs)، تلفن همراه و رایانه‌های دستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سلول‌های سوختی متانولی به دلیل قابلیت کار در دمای محیط از مقبولیت زیادی برخوردار هستند. در این سلول‌های سوختی متانول به عنوان سوخت مایع در حضور کاتالیزورهای فلزی (پلاتینیوم یا پلاتینویم/روبیدیوم) الکترواکسید شده و به این ترتیب جریان الکتریسیته تولید می‌شود. طرح‌واره نحوه عملکرد این سلول‌های سوختی در شکل نشان داده شده است.

معمولاً سلول‌های سوختی دارای مقادیر قابل توجهی پلاتینیوم (۶۰-۲۰ درصد وزنی) به عنوان کاتالیزور آند و لایه نازک کاهنده مقاومت الکتریکی می‌باشند. به دلیل قیمت بالای کاتالیزورهای فلزی، تحقیقات در این حوزه با هدف کاهش میزان کاتالیزور مورد نیاز (در حدود ۰/۱ میلی گرم در هر سانتی‌متر مربع) صورت گرفته است. به منظور بهبود عملکرد کاتالیزورهای آند، مواد نگه‌دارنده کاتالیزور باید پایدار بوده و از توزیع یکنواخت برخوردار باشند. به این سبب استفاده از نانومواد متخلخل با نسبت سطح جانبی بیشتر به عنوان الکترود پیشنهاد شده است. نانوالیاف پلی آنیلین (PANI) به عنوان موثرترین بستر ماتریسی برای توزیع نانوذرات پلاتینیوم معرفی شده است. ساختار منفذدار نانوالیاف PANI، منجر به دسترسی آسان‌تر پیش‌ماده سوختی به کاتالیزور می شود و همچنین این الیاف از هدایت الکتریکی بسیار خوبی بهره‌مند می‌باشند. از سوی دیگر با استفاده از روش الکتروریسی امکان تولید نانوالیاف حاوی نانوذرات کاتالیزور وجود دارد که به صورت یکنواخت و بدون استفاده از یک عامل سطح فعال و یا الگوی خاص در بستر الیاف توزیع شده‌اند.

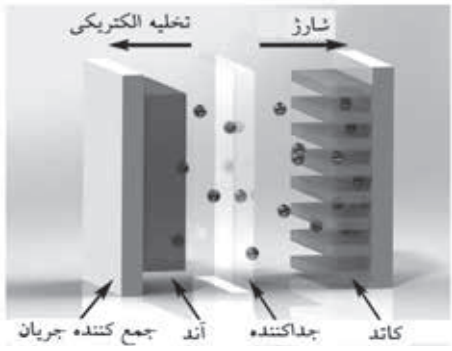
سایز منافذ میان نانوالیاف با کنترل پارامترهای فرایند نظیر پتانسیل الکتریکی اعمال شده یا نرخ کشش در طی الکتروریسی قابل تنظیم می‌باشد. برای مثال در سلول‌های سوختی متشکل از نانوالیاف کربن تابیده شده به عنوان آند، نتایج بهتری نسبت به نانوالیاف کربن صاف فراهم آمده است که این امر ناشی از بهبود قابلیت توزیع یکنواخت پلاتینیوم در ساختار اول می‌باشد. از نانوالیاف حاوی نانولوله‌های کربن تک دیواره (SWCNTs) و چند دیواره (MWCNTs) نیز برای تولید آند سلول‌های سوختی استفاده می‌شود.

۱-٤- باتری‌های یون لیتیوم (Lithium ion batteries)

تولید باتری‌های یون لیتیوم لیفی به منزله منبع انرژی تجهیزات الکترونیکی با قابلیت پوشیدن از اهمیت زیادی برخوردار است. در سال ۲۰۰۵، گُردُن والاس و همکارانش موفق به تولید نخستین نوع از این باتری‌ها شدند. در این باتری پلی پیرول-هگزا فلوروفسفات به عنوان کاتد و پلی پیرول-پلی‌استایرن سولفونات به عنوان آند در نظر گرفته می‌شود. مشاهدات انجام شده به منظور آزمون میزان انعطاف‌پذیری این باتری نشان داد که ایجاد گره در این ساختار، ظرفیت باتری را تغییر نمی‌دهد. امروزه، باتری‌های لیتیومی لیفی متشکل از نانولوله‌های کربن آرایش‌مند و الکترودهای فلزی با ظرفیت تخلیه انرژی زیاد تولید شده‌اند [۷].



شکل ۵- طرح‌واره سلول سوختی متانولی. غشاء مبادله‌کننده پروتون به عنوان الکترولیت فقط به یون‌های مثبت اجازه عبور می‌دهد و الکترون‌های دارای بار منفی در مدار خارجی به عنوان جریان الکتریسیته حرکت می‌کنند. الکترودهای متشکل از نانوالیاف کربن حاوی کاتالیزور در شکل نشان داده شده است.

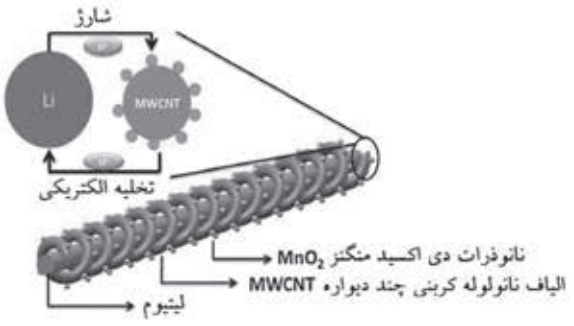


شکل ٦- طرح‌واره باتری یون لیتیوم

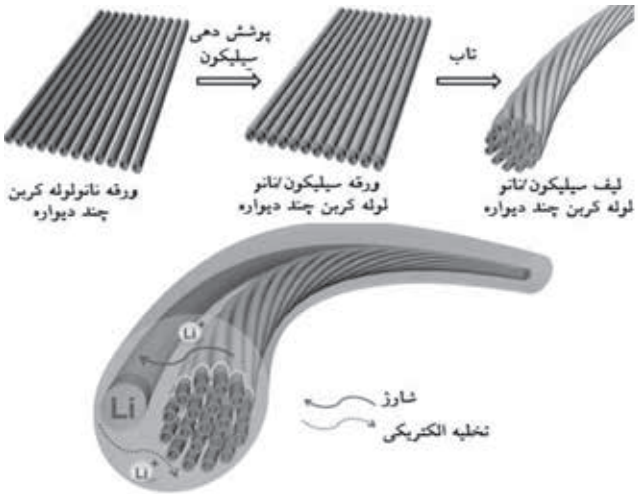
باتری‌هـای یـون لیتیـوم لیفـی کـه بـا الکترودهـای لیفـی متشـکل از نانولوله‌هـای کربـن آرایش‌منـد عمـل می‌کننـد، نسـل جدیـدی از ایـن باتری‌هـای بـه شـمار می‌آینـد. در ایـن میـان بـه برخـی از انـواع باتری‌هـای لیتیـوم لیفـی بـه اختصـار اشـاره می‌شـود.

- باتری‌هـای لیفـی دارای کاتـددی اکسیدمنـگنز/نانولوله کربـن: در ایـن باتـری‌ها الیـاف نانولولـه کربنـی (CNT) آرایش‌منـد حـاوی نانـوذرات دی اکسـید منگنـز (MnO_2) بـه عنـوان کاتـد مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرنـد. الیـاف CNT از آرایـه CNT بـا قابلیـت ریسـندگی بـا قطـر کنتـرل شـده ۳۰-۲۰ میکـرون تهیـه می‌شـود. نانـوذرات MnO_2 طـی رسـوب‌دهی الکتروشـیمیایی در محلـول آبـی در الیـاف CNT قـرار داده می‌شـوند. میـزان نانـوذرات از طریـق دفعـات رسـوب‌دهی (۰/۵ تـا ۸/۶ درصـد وزنـی) قابـل تغییـر اسـت. در ایـن باتـری سـیم لیتیومـی بـه عنـوان آنـد در نظـر گرفتـه می‌شـود. طـرح‌واره ایـن نـوع باتـری لیتیـوم لیفـی در شـکل ۷ نشـان داده شـده اسـت.

در ایـن نـوع باتـری از اسـتفاده از هرگونـه جمع‌کننـده جریـان سـیمی اضافـی پرهیـز شـده اسـت. باتری‌هـای لیفـی دارای آنـد نانولولـه کربـن/ سـیلیکون: برخـلاف نـوع قبـل، در ایـن نـوع از باتری‌هـای لیتیومـی، سـیلیکون در الیاف نانولولـه کربنـی وارد نمی‌شـود. در ایـن نـوع باتـری از فنـاوری تبخیـر بـا اسـتفاده از پرتـو الکترونـی بـه منظـور تبخیـر سـیلیکون و رسـوب‌دهی آن بـر ورقـه نانولولـه کربنـی اسـتفاده می‌شـود. ایـن فیلـم دوبعـدی آرایش‌منـد از کشـیدن آرایـه CNT و قـرار دادن آن روی مـاده زمینـه تهیـه مـی گـردد. میـزان سـیلیکون بـا تغییـر زمـان کندوپـاش الکترونـی قابـل تنظیم اسـت. در



شکل ۷- طرح‌واره باتری یون لیتیوم لیفی متشکل از سیم لیتیوم (آند) و کامپوزیت لیفی CNT/MnO_2 (کاتد).



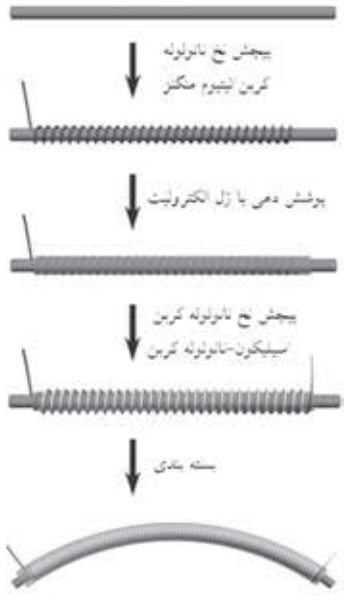
شکل ۸- فرایند تولید الیاف هیبرید Si/CNT [۸].

انتهـا فیلـم کامپوزیتـی بـا سـرعت ۱۸۰ دور بـر دقیقـه تـاب داده می‌شـود و بـه لیـف کامپوزیتـی CNT/Si تبدیـل می‌شـود. در شـکل ۸ فراینـد تهیـه ایـن الیـاف بـه صـورت طـرح‌واره نشـان داده شـده اسـت.

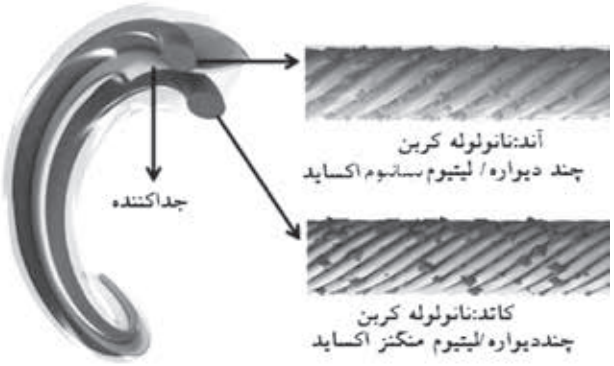
- باتـری لیفـی سـیلیکون/لیتیوم منگنـز اکسـاید ($LiMn_2O_4$): موفقیـت در تولیـد الیـاف هیبریـد نانولولـه کربـن/ سـیلیکون بـه عنـوان الکتـرود سـبب فائـق آمـدن برمشـکل آسـیب‌پذیری باتری‌هـای لیتیـوم فلـزی شـد. بنابرایـن تولیـد باتری‌هـای متشـکل از کاتـد لیفـی و آنـد لیتیومـی بـه منظور تولیـد یـک باتـری کامـلاً لیفـی در دسـتور کار محققـان قـرار گرفـت.

لیتیـوم منگنـز اکسـاید (LMO) بـه دلیـل ولتـاژ عملکرد بـالا (حـدود ۴ ولت) و ثبـات سـاختاری (تغییـر ابعـادی کمتـر از ۱۰٪) در باتری‌هـای لیتیومـی بـه عنـوان کاتـد مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرنـد.

در تولیـد ایـن نـوع کاتـد، ذرات (LMO) از یـک محلـول مسـتقیماً بـر ورقـه نانولولـه کربنـی قـرار داده شـده و در انتهـا بـا تـاب دادن بـه الیـاف هیبریـدی



شکل ۹- تولید باتری لیتیومی لیفی بر مبنای لیف پنبه‌ای

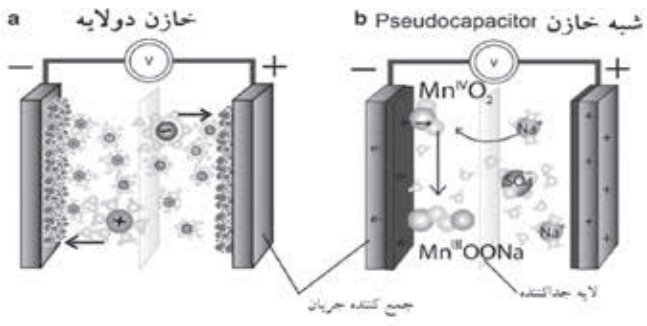


شکل ۱۰- طرح‌واره ای از یک باتری لیتیوم لیفی [۹].

تبدیل می‌شوند. باتری لیفی یون لیتیوم از طریق پیچش دو لیف هیبریدی نانولوله کربن به دور یک لیف پنبه‌ای تهیه شده و در انتها با ژل الکترولیت پوشش داده می‌شوند. - باتری لیفی $LiMn_2O_4$–Li-$4Ti_5O_{12}$: جایگزین کردن لیتیوم با آندهای آلیاژی از جمله پیشرفت‌های اخیر در عرصه باتری‌های لیتیومی به شمار می‌رود. به منظور تولید این نوع باتری، ابتدا نانوذرات لیتیوم منگنز اکساید از طریق فرایند گرمابی و نانوذرات $Li_4Ti_5O_{12}$ به روش حالت جامدبا استفاده از آسیای گلوله‌ای تهیه می‌شوند. نانوذرات ذکر شده از طریق فرایند ریسندگی همزمان درون ساختار الیاف نانولوله کربنی قرار داده می‌شوند.
در این فرایند دو ورقه نانولوله کربنی کشیده و روی یکدیگر فشرده شده و از درون محلول حاوی نانوذرات تازه تهیه شده عبور داده می‌شوند. الیاف هیبریدی تهیه شده با لایه نازکی از اکسید گرافن برای ایجاد پایداری بیشتر پوشش داده می‌شوند.

۱-۵- اَبَر خازن‌های لیفی (Fiber-ShapedSuper capacitors)

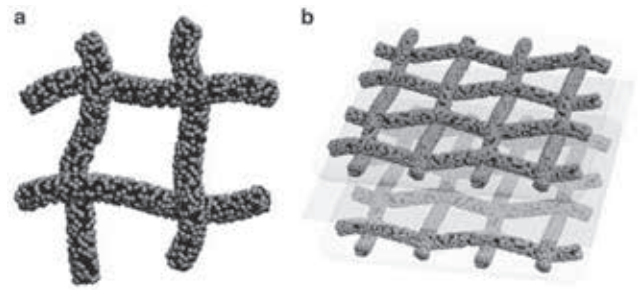
اَبَرخازن‌ها که خازن‌های الکتروشیمیایی نیز نامیده می‌شوند در موارد متعددی نظیر تجهیزات الکترونیکی، خودروهای هیبریدی، تجهیزات تولید انرژی تجدیدپذیر، منابع انرژی پشتیبان و تجهیزات قابل حمل مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس سازوکار انبارشدن انرژی، اَبَرخازن‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:
۱) خازن دولایه و
۲) شبه خازن (شکل۱۱).



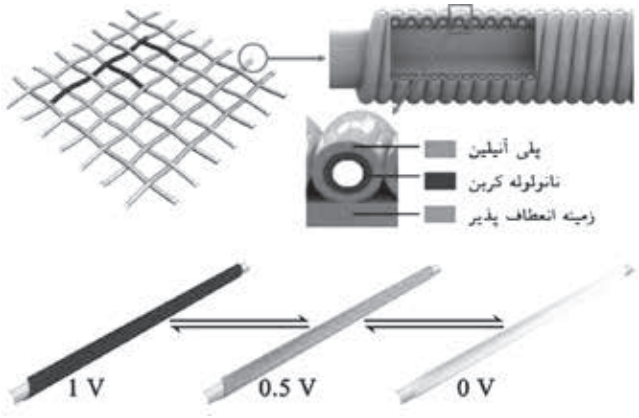
شکل ۱۱. طرح‌واره دو نوع ابرخازن با سازوکار متفاوت.

شکل۱۲. عوامل موثر بر چگالی انرژی در ابرخازن‌ها [۱۰]

همانطورکه در شکل ۱۲ نشان داده شده است، چگالی انرژی در ابرخازن‌ها با افزایش مساحت جانبی، بهبود رسانش الکتریکی و افزایش ولتاژ بهبود می‌یابد. نخستین انباره انرژی لیفی توسط باگمن و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با بهره‌گیری از الیاف متشکل از نانولوله‌های کربنی تک دیواره به عنوان الکترود تولید شد. اَبَرخازن تهیه شده از توان الکتریکی ۵ F/g و چگالی ذخیره انرژی ۰/۶ Wh/g و طول عمر بیش از ۱۲۰۰ چرخه برخوردار بود. اَبَرخازن‌های لیفی سپس به عنوان نمونه به صورت یک منسوج تاری-پودی بافته شد. ابرخازن‌های لیفی از مزایایی نظیر انعطاف‌پذیری، استحکام و رسانش الکتریکی مناسب، چگالی توان الکتریکی زیاد (۱۰ kW/kg)، شارژ و تخلیه سریع و طول عمر طولانی (بیش از ۱۰۵ چرخه) برخوردار هستند [۱۱].
از پلیمرهای فعال از نظر الکتروشیمیایی می‌توان به پلی آنیلین، پلی پیرول، پلی (۳،۴- اتیلن‌دی‌اکسی‌تایوفن) (PEDOT)، پلی تایوفن (PTh) و مشتقات آن‌ها اشاره کرد [۱۲].
از الکترودهای لیفی تابیده شده در تجهیزات الکترونیکی ساخته شده از الیاف استفاده می‌شود. در شکل ۱۴به نمونه‌ای از ابرخازن‌های تهیه شده از این مواد اشاره شده است. از اکسیدهای فلزی و پلیمرهای رسانا در تولید الیاف استفاده می‌شود. ابرخازن نهایی دارای یک ساختار تک بعدی است که می‌توان از آنها در ساختار پارچه‌های گردباف یا تاری-پودی استفاده نمود. الکترولیتی که در فواصل میان الکترودها وارد می‌شود، مانع ایجاد اتصال کوتاه می‌شود.
برای مثال از نانوسیم‌های اکسید روی با سطح مخصوص بالا و قابلیت ذخیره بار الکتریکی زیاد، که در دمای کمتر از $90^{\circ}C$ سنتز می‌شود،



شکل ۱۳- طرح‌واره پارچه نانولوله کربنی با رسوب سطحی دی‌اکسید منگنز (a) ابرخازن متقارن متشکل از پارچه نانولوله کربن/دی اکسیدمنگنز. الکترود مثبت (پایین) دی اکسید منگنز و الکترود منفی (بالا) دی اکسید منگنز احیا شده می‌باشد



شکل ۱۵- طرح‌واره ابرخازن لیفی با قابلیت ایجاد رنگ‌های متفاوت [۱۴].

ابرخازن‌ها، چگالی اندک انرژی و توان کمتر در مقایسه با ابرخازن‌های کربنی است. از آنجایی که الکترودهای لیفی تابیده شده می‌باید به صورت مجزا تهیه و سپس تابیده شوند، تولید ابرخازن‌های هیبریدی (ابرخازن‌های نامتقارن) پیشنهاد مناسبی برای تسهیل روند تولید بوده است. برای مثال از الیاف نانولوله کربنی آرایش‌مند به صورت تابیده شده پیرامون سیم تیتانیوم استفاده می‌شود.

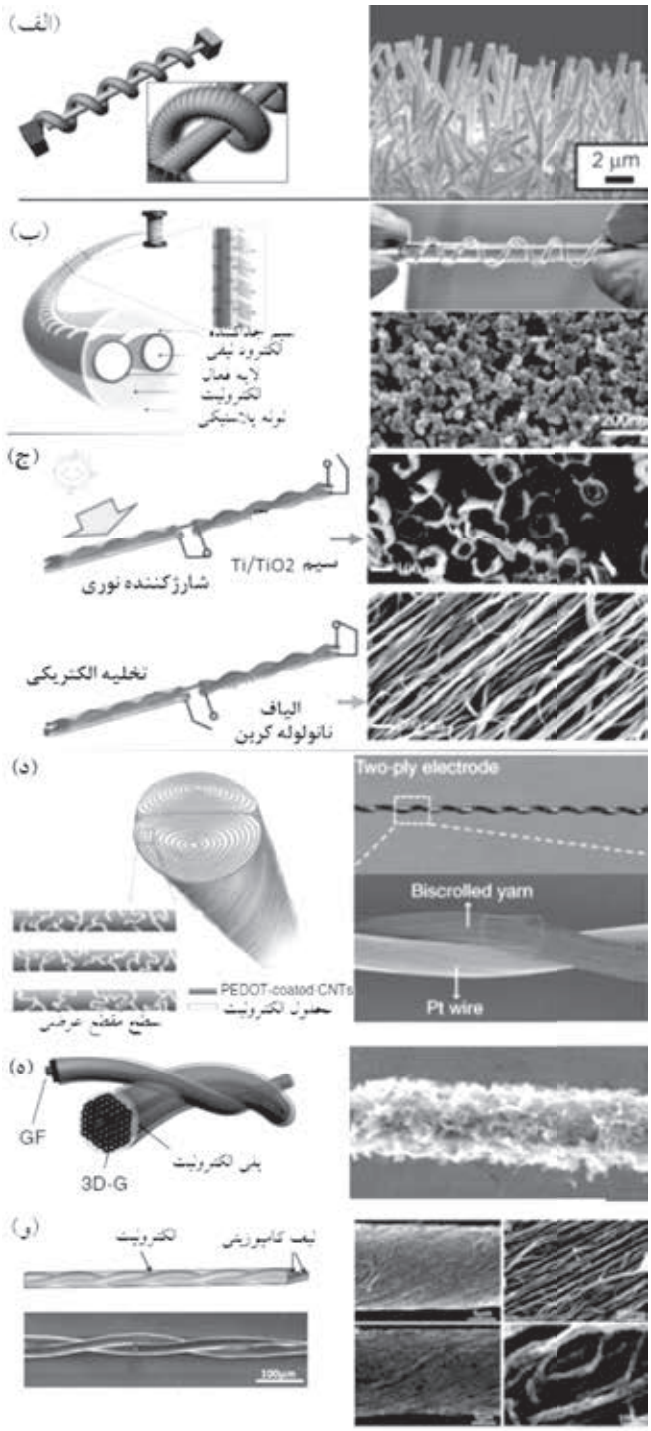
ابرخازن‌های رنگی ، پل ارتباطی میان مفهوم رنگی شدن و ابزارهای انرژی است. در میان پلیمرهای شناخته شده، پلی‌آنیلین (PANI) از هر دو قابلیت ذکر شده برخوردار است. این ماده در حالت‌های گوناگون اکسید شدن به دلیل بارهای الکتریکی مختلف، رنگ‌های متفاوتی نشان می‌دهد.

پلی آنیلین از قابلیت ایجاد رنگ زرد (در حالت اکسید شدن leucoem-eraldine)، آبی (در حالت کاملاً احیا شده و pernigraniline)، سبز (در حالت کاملا اکسید شده وemeraldine) برخوردار می‌باشد. از آنجایی که تغییر رنگ در این مواد به راحتی با چشم غیرمسلح قابل رویت می‌باشد، ابرخازن‌های رنگی گزینه مناسبی برای استفاده در حس‌گرها و ابرخازن‌های هوشمند منعطف به شمار می‌روند.

تلفیق قابلیت انعطاف‌پذیری با خصوصیات ذاتی خازن‌های سیمی امکان استفاده از محصول نهایی را در صنعت پوشاک، پزشکی و تجهیزات الکترونیک فردی فراهم می‌سازد. در حال حاضر اغلب پوشاک از یک لایه پارچه با ضخامت، انعطاف‌پذیری و تراکم ویژه تهیه می‌شوند؛ که این امر امکان استفاده از باتری و خازن‌ها (متشکل از لایه‌های نازک جمع‌کننده جریان الکتریسیته، الکترودها و مواد جداکننده) را درون ساختار لباس محدود می‌نماید و استفاده از این تجهیزات فقط در لباس‌های رو که دارای تعدد لایه‌های پارچه و ضخامت لازم باشند، امکان‌پذیر است.

بنابراین تحقیقات فراوانی برای فائق آمدن بر این چالش در حال انجام است. تولید ابرخازن‌های لیفی دومحوره (نانولوله کربن/پلی آنیلین)، با قابلیت انعطاف لازم برای پذیرش گره، از جمله پیشرفت‌های انجام شده در این حوزه می‌باشد.

ادامه دارد ...



شکل ۱۴: انواع مختلف ابرخازن‌های لیفی تابیده شده.
الف) نانوسیم اکسید روی پوشش داده شده بر روی الیاف بشرساخت.
ب) الیاف پوشش داده شده با جوهر کربن فعال.
ج) الیاف متشکل از نانولوله های کربنی به عنوان ابر خازن قابل شارژ با نور خورشید.
د) الکترودهای لیفی دو لا ـ ه)پلی الکترولیت پوشش داده شده بر روی نانوالیاف.
و)الیاف کامپوزیتی پوشش داده شده با الکترولیت [۱۳].

همراه با دی‌اکسیدمنگنز برای تولید الیاف کامپوزیتی با قابلیت تبدیل به ابرخازن استفاده می‌شود. از ابرخازن‌های لیفی همراه با ژنراتورهای لیفی در منابع انرژی قابل پوشیدن استفاده می‌شود. از معایب این گروه از