

# نانوفیلترهای لیفی

## ۱- مقدمه

فناوری نانو به مهندسی نمودن مواد در ابعاد اتمی-مولکولی و ساخت موادی با خواص کاملاً متفاوت در ابعاد نانو می‌پردازد. یکی از کاربردهای فناوری نانو استفاده در صنایع فیلتر است که نقش مؤثری در بهبود عملکرد نسل گذشته‌ی فیلترها و تولید نسل جدیدی از فیلترها دارد. فیلترها در یخچال، خودرو، محیط منزل، بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای حذف باکتری، قارچ، بو و ترکیبات آلی فرار مورداستفاده قرار می‌گیرند. در این نوشتار، گزارشی کوتاه در مورد چگونگی به‌کارگیری فناوری نانو در تولید فیلترهای نانومقیاس، نمونه‌های صنعتی و چشم‌انداز پیش رو ارائه خواهد شد.

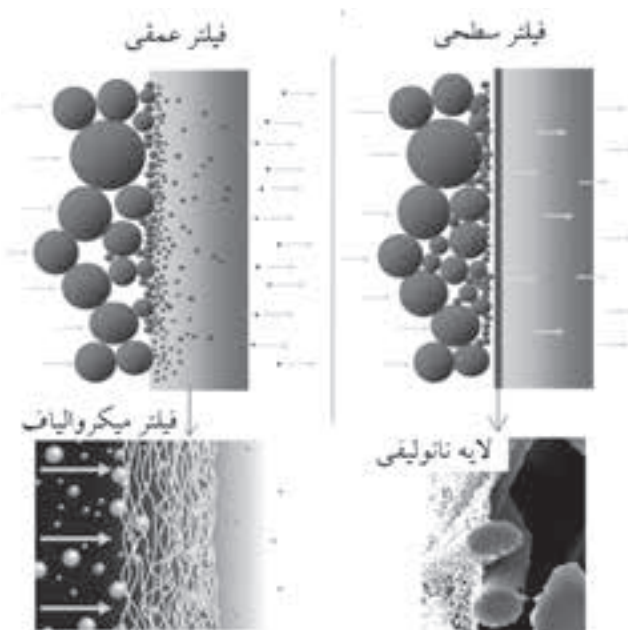
## ۲- فیلترها و انواع آن

فیلترها موادی متخلخل از جنس پلیمر یا سرامیک هستند و فیلتر کردن یا فیلتراسیون، فرایندی است که در آن یک مایع و یا گاز (سیال) به دلیل اختلاف فشار، اختلاف پتانسیل الکتریکی یا اختلاف غلظت از فیلتر عبور می‌کند. با انجام عمل فیلتراسیون، ذراتی که از اندازه حفره‌های فیلتر کوچک‌تر هستند، از آن عبور کرده و ذرات با اندازه بزرگ‌تر، از سیال جدا شده و در پشت فیلتر باقی می‌مانند. در انتخاب نوع فیلتر و بازده آن، دو عامل اندازه حفره‌ها و مقدار ذرات باقیمانده پشت فیلتر اثرگذار است.

بازده فیلتراسیون اساساً تحت تأثیر ساختار فیزیکی فیلتر (ظرافت لیف، ساختار ماتریس، ضخامت و اندازه حفره)، خصوصیات الکتریکی و شیمیایی سطح لیف (انرژی آزاد سطح) می‌باشد. علاوه بر بازده فیلتراسیون، خصوصیات دیگری نظیر افت فشار و مقاومت شار نیز از جمله پارامترهای مهم در ارزیابی بستر فیلتر به شمار می‌روند. فیلترها به دو گروه اصلی دسته‌بندی می‌شوند: فیلترهای عمقی و فیلترهای غشایی یا سطحی (شکل ۱). فیلترهای عمقی اغلب دارای ساختار سه‌بعدی پرپیچ‌وخم با کانال‌های متعدد و شاخه‌های زیاد هستند و ذرات از طریق حبس شدن در عمق فیلتر غربال می‌شوند. اما در فیلترهای غشایی، معمولاً از یک لایه نازک با اندازه حفره معین برای غربال کردن ذرات استفاده می‌شود.

چنانچه لایه‌ای از نانو الیاف روی یک فیلتر عمقی قرار گیرد، خاصیت

فیلتراسیون از حالت فیلتر عمقی به فیلتر سطحی یا غشایی تبدیل می‌شود. در فیلترهای معمولی، به دلیل این که فیلتراسیون در عمق صورت می‌گیرد، فیلتر دچار افت فشار شده و کارایی خود را از دست می‌دهد. از سوی دیگر در فیلترهای معمولی از الیاف میکرومتری استفاده می‌شود؛ بنابراین حفره‌های موجود در بین فیلترهای میکرونی بزرگ بوده و ذرات با ابعاد کوچک‌تر از فاصله میان الیاف، جذب فیلتر نخواهد شد. اما با کشیدن لایه‌ای از نانو الیاف به روی فیلتر، هم فیلتراسیون جذب فیزیکی و هم فیلتراسیون الکترواستاتیکی رخ می‌دهد. افزایش طول عمر فیلتر تا حدود دو برابر، کنترل و عدم افزایش افت فشار، افزایش قابل توجه کارایی فیلتراسیون، افزایش بازده تبدیل انرژی در صنایع خودرویی و نیروگاهی به همراه کاهش استهلاک تجهیزات و زمان خواب و تعمیر آن‌ها و افزایش سطح حفاظت از توربین از جمله مزایای به‌کارگیری لایه نانو لیفی است.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از فیلترهای عمقی (سمت چپ) و سطحی (سمت راست)

## ۳- فیلترهای غشایی

روش‌های فیلتراسیون غشایی را می‌توان به چهار گروه کلی



نظیر مولکول‌های نمک، ویروس‌ها، سموم و سایر ترکیبات آلوده غیرآلی از آب شود.

### ۳-۴- نانوفیلتراسیون

غشاء نانوفیلتراسیون یکی از غشاءهای محرک-فشاری با خصوصیتی مابین اسمز معکوس و غشاء اولترافیلتراسیون است. نانو فیلتر به معنای فیلتری است که اندازه منافذ آن در حد نانومتری (۰/۵ تا ۲ نانومتر) است [۱، ۲]. فناوری فیلتر نانو لیفی یک فیلامنت پیوسته و ظریف از لیاف پلیمری است که به صورت یکنواخت گسترده شده و روی یک زیر لایه فیلتری توسط فرایند الکتروریسی متصل شده است. ضخامت لایه اعمالی در محدوده ۰/۱ و ۰/۵ میکرومتر، با قطر لیاف در محدوده ۵۰ و ۵۰۰ نانومتر است. این لیاف بسیار نازک هستند (۱۰۰۰ بار ظریفتر از موی انسان)، به طوری که به طوری که با چشم غیرمسلح قابل رؤیت نیستند. برای کاربردهای جمع‌آوری گردوخاک، مواد بر پایه سلولز یا پلی‌استر برای زیر لایه یا لایه پایه متداول تر است [۳].

### ۴- اهمیت به کارگیری نانوفیلتراسیون

نانوفیلتراسیون دارای مزایای بسیاری از قبیل فشار عملیاتی پایین، شار بالا، نگهداری بالای نمک یون‌های چند ظرفیتی و با وزن بالای ۳۰۰ دالتون، نیاز به سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری پایین است. مزیت این غشاء در مقایسه با غشاءهای دیگر، اندازه حفره‌های نانومتری است که توانایی حذف ویروس‌ها، باکتری‌ها و مواد نانومتری را دارا است. لایه نانولیفی بسیار ظریف است و روی زیرلایه انعطاف‌پذیر به کار می‌رود، لذا امکان ایجاد زیر لایه با مساحت سطحی بالا را فراهم می‌کند.

### ۴-۱- افزایش بازده فیلتر

شبکه نانو لیفی الکتروریسی شده، افزایش چشمگیر در بازده فیلتراسیون در کنار کاهش نسبتاً اندک نفوذپذیری را فراهم می‌سازد. در مقایسه با فیلترهای لیفی متداول در افت فشار یکسان، نانو لیاف با قطر ظریفتر از نیم میکرون ظرفیت بالاتری در جمع‌آوری ذرات ریز دارد. مقایسه میان شبکه الکتروریسی شده نایلون ۶ (ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و اندازه حفره ۰/۲۴ میکرومتر) با فیلتر هوای با بازده بالا تجاری (HEPA) (ضخامت ۵۰۰ میکرومتر و اندازه حفره ۱/۷ میکرومتر) با استفاده از آزمون ذرات ۳۰۰ نانومتر نشان داد که لایه نانولیفی ظریف بازده فیلتراسیون اندکی بالاتر (۹۹/۹۹٪) نسبت به فیلتر HEPA (۹۹/۹۷٪) دارد [۴].

### ۴-۲- حذف ذرات ریز مایع

علاوه بر ذرات جامد، ذرات ریز مایع درون سامانه امتزاج‌ناپذیر مایع-مایع نیز می‌تواند با لایه نانو لیفی (فیلتراسیون انعقاد مایع-مایع)

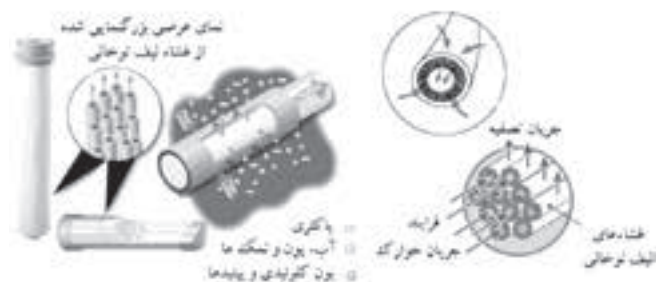
میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس تقسیم کرد [۱].

### ۳-۱- میکروفیلتراسیون

میکروفیلتراسیون سیستمی کوچک و تمام‌خودکار است که برای جداسازی محلول‌های جامد-مایع و موادی مثل باکتری‌ها، کیست‌ها، مولکول‌ها و ذراتی با قطر تقریبی ۰/۱ تا ۱ میکرون به کار می‌رود. فشار غشاء معمولاً ۱۰ psi (۰/۷ بار) است [۲].

### ۳-۲- اولترافیلتراسیون

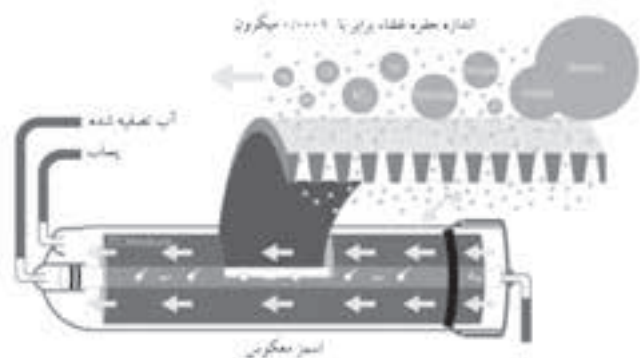
اولترافیلتراسیون فرایندی برای جداسازی و غربال ذراتی در محدوده ۲ تا ۱۰۰ نانومتر (تا ۰/۱ میکرون) است. فشار عملیاتی غشاء معمولاً ۱-۷ psi (۱-۷ بار) است. طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد یک دستگاه دارای سیستم اولترافیلتراسیون در شکل ۲ نشان داده شده است [۲].



شکل ۲. طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد از یک دستگاه دارای سیستم اولترافیلتراسیون

### ۳-۳- اسمز معکوس

اسمز معکوس یکی از روش‌های جداسازی ناخالصی‌ها از آب است. در این روش، اعمال فشار مکانیکی عامل جداسازی است (شکل ۳). در این روش، آب از داخل یک پوسته عبور داده شده و این امر سبب جداسازی ناخالصی‌ها می‌شود. قابلیت نفوذپذیری پوسته تا حدی می‌تواند اندک باشد که در عمل موجب جداسازی تمام ناخالصی‌ها



شکل ۳. نحوه عملکرد اسمز و اسمز معکوس



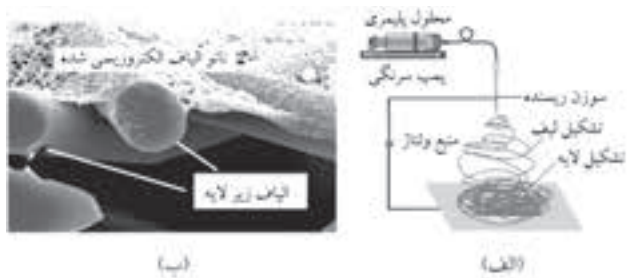
الیاف و غشاءهای سرامیکی نانو حفره‌ای اشاره کرد. که در این گزارش تمرکز روی غشاءهای نانو لیفی است.

#### ۵- نحوه تولید غشاء نانو لیفی

نانو الیاف به صورت الیاف با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند و با دارا بودن یک بعد خارج از محدوده نانومتری، جزء دسته نانو مواد تک بعدی قرار می‌گیرند. نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انعطاف بالا در عامل دار کردن سطوح و خواص مکانیکی عالی از قبیل چقرمگی و استحکام کششی بالا، از خواص مورد توجه نانو الیاف در مقایسه با الیاف معمولی است.

الکتروریسی روشی با نیروی محرکه الکترواستاتیکی برای تولید نانو الیاف است. شکل ۴ (الف) طرح‌واره‌ای از فرآیند الکتروریسی را نشان می‌دهد. در این فرآیند، نانو الیاف از محلول مایع یا مذاب پلیمری که از لوله موئین به منطقه با میدان الکتریکی بالا تغذیه می‌شود، تشکیل می‌شوند. اندازه و ریزساختار نانو الیاف با متغیرهای عملیاتی متفاوتی کنترل می‌شود.

این متغیرها، گرانیروی محلول، ولتاژ، نرخ تغذیه، هدایت محلول، فاصله هدف و لوله موئین و اندازه لوله هستند. شکل ۴ (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه نانو لیفی رسیده شده روی یک زیر لایه لیفی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. (الف) طرح‌واره‌ای از دستگاه الکتروریسی و (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری فیلتر نانو لیفی

با افزودن پوششی از نانو الیاف الکتروریسی شده به زیر لایه فیلتراسیون متداول، عملکرد فیلتراسیون چندین بار افزایش می‌یابد. تنها فناوری تجاری موجود برای تولید الیاف ظریف زیر میکرون با توزیع قطری باریک، روش الکتروریسی است.

در حقیقت می‌توان با یک زیر لایه ارزان قیمت و پوشش نانو لیفی ظریف به بازده بالای فیلتراسیون باقیمت پایین دست یافت. با استفاده از فناوری Nanospider™ می‌توان الیاف با قطر ۷۵ تا ۲۵۰ نانومتر، لایه‌ای با ۹۰-۶۰٪ تخلخل، اندازه حفره بین ۰/۱ تا ۳ میکرومتر، مساحت سطحی ۱۰ تا ۱۰۰ مترمربع بر گرم تولید نمود [۵]. شکل ۵، دستگاه صنعتی تولید لایه نانو لیفی شرکت المارکو با استفاده از فناوری Nanospider™ را نشان می‌دهد.

حذف گردد. برای مثال می‌توان از نانوالیاف پلی استایرن الکتروریسی شده در مخلوط با میکرو الیاف شیشه‌ای، فیلتری برای زدودن ذرات مایع از امولسیون آب در روغن ایجاد نمود.

افزودن مقدار اندکی از نانو الیاف پلی استایرن، صرف نظر از افزایش افت فشار فیلتر، افزایش چشمگیری در بهبود بازده حذف ذرات ایجاد می‌کند (از ۶۸٪ به ۸۸٪) [۴].

#### ۴-۳- داربست پشتیبان در اولترافیلتراسیون

نانو الیاف به عنوان داربست پشتیبان در اولترافیلتراسیون جداسازی امولسیون روغن/آب استفاده می‌شود. لایه اولترافیلتراسیون داری ساختار کامپوزیتی سه لایه متشکل از لایه فوقانی آب دوست نانو متخلخل، لایه میانی نانو لیفی الکتروریسی شده پلی وینیل الکل با اتصالات عرضی و زیر لایه میکرو لیفی بی بافت رایج است. بستر نانو لیفی الکتروریسی شده، شبکه متخلخل به هم پیوسته مناسبی با مساحت سطحی ویژه بالا ایجاد می‌کند. این نوع فیلتر اولترافیلتراسیون نرخ شار و قابلیت زدودن مواد حل شده آلی بالایی را فراهم می‌کند.

#### ۴-۴- جذب یون‌های فلزی

افزایش میزان یون‌های فلزی، نوعی آلودگی جدی در منابع آبی ایجاد کرده است و در درازمدت موجب تهدید بهداشت فرد و محیط طبیعی می‌شود. نانو الیاف الکتروریسی شده پتانسیل بالایی در جمع‌آوری یون‌های فلزی از محلول دارند؛ زیرا این لایه‌ها دارای مساحت سطحی ویژه بالا، تخلخل بالا و عاملیت سطحی قابل کنترل هستند. برای جذب یون فلزی، پلیمرهای با گروه‌های عاملی که میل جذبی به یون‌های فلزی دارند، به صورت مستقیم درون نانو الیاف الکتروریسی می‌شوند.

الکتروریسی نانو الیاف مخلوط فیبروئین ابریشم/کراتین پشم برای جذب یون‌های مس از آب استفاده شده است. پروتئین پشم دارای گروه‌های زیادی از اسیدهای آمینه آب دوست با میل جذبی بالا به یون‌های فلزی است و نانو الیاف مخلوط نشان داد که ظرفیت جذب  $2/8 \mu\text{g}/\text{mg}$  فلز را باراندمان بالای بازیابی دارد [۴].

دو روش برای بهبود جذب یون‌های فلزی روی نانو الیاف الکتروریسی شده وجود دارد:

۱- قرار دادن مواد عامل دار روی سطح لیف با استفاده از روش‌های جذبی یا پوشش دهی و افزایش مساحت سطحی برای بهبود ظرفیت جذب و

۲- تبدیل مستقیم یون‌های فلزی به عنصر فلزی روی نانو الیاف برای باز تبدیل فلزات گران بها.

در حوزه نانوفیلتراسیون می‌توان به غشاءهای نانولوله‌ای، فیلترهای نانو غربال، فیلتر آومینای نانو لیفی، فیلترهای جاذب جریان، شامل نانو



نانو ذرات هیبرید مواد آلی و معدنی است و پایداری مناسبی دارند. به‌طور کلی نانو فیلترها در صنایع مختلف از جمله صنعت آب و فاضلاب، صنایع غذایی، صنایع داروسازی، پزشکی، تصفیه هوا و خالص‌سازی گازها کاربرد دارند. در ادامه به معرفی برخی از محصولات تجاری شده‌ی این حوزه می‌پردازیم.

## ۶- محصولات تجاری

### ۶-۱- فیلتر نانو لیفی Ultra-web®

شرکت Donaldson آمریکا بیش از ۲۰ سال است که فیلترهایی بر پایه نانو الیاف الکترورسی شده را برای کاربردهای صنعتی، خانگی و نظامی تولید می‌کند و فیلتر نانو لیفی Ultra-web® آن برای صنایع بی‌بافت و فیلتراسیون برای کاربردهای وسیعی توسعه یافته است (شکل ۶). این فیلتر متشکل از یک لایه وب لیفی الکترورسی شده با الیاف پیوسته با قطر ۰/۳-۰/۲ میکرون روی یک بستر اسپان باند است، به‌طوری که قادر است که ذرات گردوخاک ریز را فیلتر کند [۷].



شکل ۶. فیلتر نانو لیفی Ultra-Web® شرکت دونالدسون

### ۶-۲- فیلتر نانویی تصفیه هوا AMOSIL Ea Air

فیلترهای تصفیه هوای شرکت Amsoil از لایه نانو لیفی با کیفیت بالا تهیه شده است (شکل ۷ الف). فیلترهای هوای AMOSIL EA اصولاً از یک بستر سلولزی با یک لایه نانو لیفی مصنوعی روی آن ساخته شده‌اند. گردوخاک و ذرات ریز روی سطح نانو لیفی گیر می‌افتند و مانع از ورود آن‌ها به عمق بستر فیلتر می‌شود. به دلیل اینکه ذرات روی یکدیگر تجمع می‌کنند، فیزیک میکرو در جریان‌های لغزنده اجازه می‌دهد که حجم بالایی از جریان هوا، حتی با وجود پوشش ضخیمی از گردوخاک از میان فیلتر عبور کند. این فیلترهای هوا برای کاربردهای اتومبیل و تریلرهای سبک مناسب هستند. طی آزمایش‌های انجام شده در این شرکت، نانو الیاف ۵ برابر بیشتر از فیلتر سلولزی و ۵۰ بار بیشتر از بستر توری ذرات گردوخاک را حذف می‌کند. این فیلتر، ذرات میکرونی را روی سطح نانو لیف گیر می‌اندازد و مانع از قرارگیری ذرات درون عمق بستر فیلتر می‌شود. از نانو الیاف به‌صورت گسترده در فیلتراسیون گردوخاک به‌ویژه در محیط‌های حاکی استفاده می‌شود. برای مثال از فیلترهای نانو لیفی مذکور، در تانک جنگی ارتش آمریکا با نام M<sub>1</sub> استفاده شده است (شکل ۷ ب).



شکل ۵. دستگاه تولید لایه نانو لیفی شرکت المارکو [۶]

## ۵- کاربرد فیلترهای نانومقیاس

امروزه با پیشرفت صنایع مختلف، استفاده از نانو فیلترها به‌عنوان ابرفیلتر در صنایع مختلف ضروری به نظر می‌رسد. از نظر تحقیقات دانشگاهی، از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۵ حدود ۱۶۴۲ مقاله در زمینه‌های مختلف نانوفیلتراسیون نظیر کاربردهای محیطی، تولید غشاء، موضوعات متفرقه، داروسازی و بیوتکنولوژی، مدل‌سازی، کاربردهای مواد غذایی، اقتصادی و طراحی و غیره به چاپ رسیده است که نشان از اهمیت و گستردگی نانوفیلتراسیون است.

فناوری تولید نانو فیلترها جدید است و در بسیاری از مناطق به‌صورت تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در برخی کشورها به‌صورت صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به آمار موجود، کشورهای امریکا و انگلستان از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان این گونه فیلترها هستند و کشورهای ژاپن، چین و تایوان نیز از کشورهای عمده تولیدکننده نانو فیلترها می‌باشند.

نانو فیلترهای کاربردی در صنایع را می‌توان در دودسته تقسیم‌بندی کرد: فیلترهای نانو لیفی و فیلترهای حاوی نانو ذرات. نانو فیلترها با کاربردهای مختلف برای استفاده در یخچال، اتومبیل، محیط خانه و بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای حذف باکتری، قارچ، بو و ترکیبات آلی فرار مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیلترهای نانو نقره دارای قدرت بسیار بالایی در حذف میکروارگانیسم‌ها و میکروب‌های بیماری‌زا هستند. استفاده از این فیلترها در مکان‌هایی مانند بیمارستان و مراکز عمومی که احتمال وجود آلودگی‌های میکروب زیاد است، اهمیت و کاربرد فراوانی دارند. علاوه بر نقره از ذرات نانویی کربن نیز برای از بین بردن بو و مواد فرار استفاده می‌شود. فیلترهای نانو کربن با دارا بودن ساختارهای نانو، دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند، بو و مواد فرار را به‌خوبی جذب می‌کنند. قدرت جذب این فیلترها ۱۵ برابر بیشتر از کربن فعال است و علاوه بر بو، ترکیبات آلی فرار را نیز حذف می‌کنند. یکی دیگر از موارد کاربرد فناوری نانو ساخت فیلترهای نانو هیبرید است که فرایند تهویه و تصفیه هوا را به‌خوبی انجام می‌دهند و برای از بین بردن میکروب‌ها در محیط‌های مختلف مانند محیط‌های نگهداری مواد غذایی، سرویس‌های بهداشتی، رستوران‌ها و آشپزخانه‌ها به‌کاربرده می‌شوند. این فیلترها حاوی



موتورهای توربین این تانک به سامانه فیلتر مکش هوای نانو لیفی برای دستیابی به تسلط در میدان جنگ وابسته است.



شکل ۷. الف) فیلتر نانو لیفی تصفیه هوا و  
ب) تانک جنگی M1A1 استفاده کننده از فیلتر هوای نانو لیفی

این مقدار به سه دلار برسد. کارتریج فیلترها به ازای ۲۰ تا ۲۰۰ فیلتر، وابسته به قطر آن‌ها در حدود ۳۷ دلار هزینه دارند. این فیلترها به‌طور همزمان ترکیبات شیمیایی و بیولوژیکی را بدون استفاده از مواد گندزای شیمیایی و یا مواد منعقدکننده، حتی در آب‌های شور بسیار کدر حذف می‌کنند [۹].

### ۳-۶- نانو الیاف جاذب جریان

شرکت KX، طرحی از فیلترهای جاذب جریان شامل نانو الیاف را باهدف استفاده در کشورهای درحال توسعه بهره‌برداری کرده است. فیلتر شامل یک‌لایه پیش فیلتراسیون برای حذف آلودگی‌های فیزیکی، یک‌لایه جاذب برای حذف آلودگی‌های شیمیایی و یک‌لایه نانو الیاف برای حذف آلودگی‌ها و ذرات کلوئیدی است. نانو الیاف از چندین پلیمر آب‌دوست، رزین‌ها، سرامیک‌ها، سلولز، آلومینا و دیگر مواد ساخته می‌شوند.

این فناوری در مقیاس‌های خانگی و شهری قابل دسترسی است. طبق اعلام شرکت سازنده، مقیاس خانگی فیلترهای سطح‌فعال می‌تواند به ازای هر فیلتر ۳۷۵ لیتر آب را با سرعت ۴-۶ لیتر بر ساعت تولید کند. در مقیاس روستایی نیز بیش از ۷۵۰۰ لیتر بر روز با سرعت ۵/۶ لیتر بر دقیقه تولید می‌کند. انتظار می‌رود فیلترهای خانگی ۶-۱۱ دلار فروخته شوند و فیلترهای روستایی ۱۰۰-۱۵۰ دلار هزینه خواهند داشت که تقریباً ۰/۰۰۳ دلار به ازای هر لیتر است [۹].

### ۴-۶- نانو فیلتر شرکت لیکوئیدیتی

شرکت لیکوئیدیتی فیلتری حاوی نانو الیاف ساخته است که می‌تواند میکرو ارگانسیم‌های آب را از آن جدا کرده و آب سالم و بهداشتی تولید کند (شکل ۹ الف). این محصول نتیجه ۱۵ سال تحقیق و توسعه شرکت لیکوئیدیتی و دانشگاه استون بروک است. نیک‌فیلتر یک بطری فیلتراسیون آب است که در آن از نانو الیاف الکترورسی شده برای ساخت فیلتر استفاده شده است (شکل ۹ ب). این فیلتر می‌تواند آب را با درجه خلوص پزشکی تولید کند.



شکل ۹. الف) نانو فیلتر تولیدی شرکت لیکوئیدیتی و ب) بطری آب حاوی نانو فیلتر

### ۲-۶- فیلتر آلومینای نانو لیفی

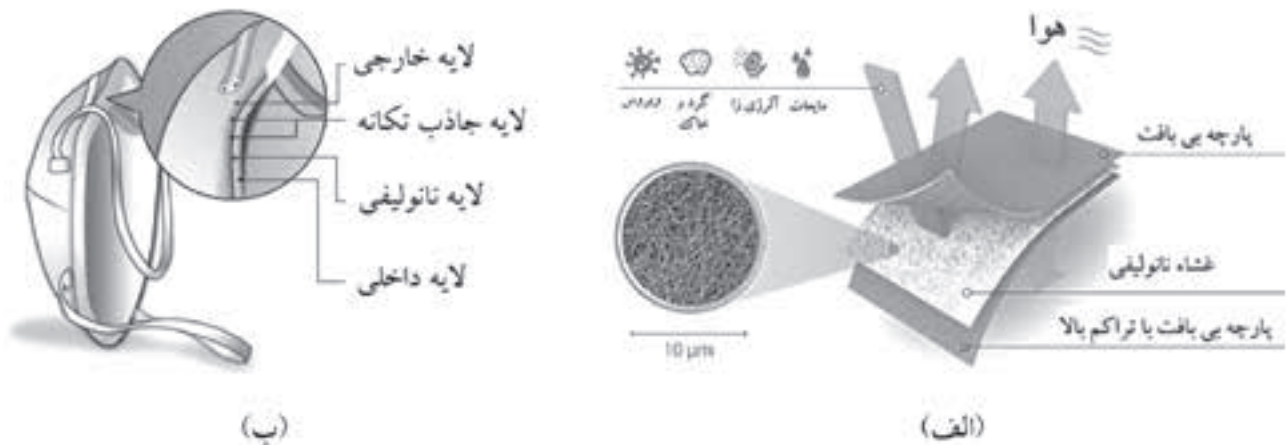
این جاذب‌ها از نانو الیاف آلومینا با بار مثبت روی زیر لایه شیشه‌ای تشکیل شده‌اند. نانو الیاف آلومینا سطح بیشتری نسبت به الیاف متداول داشته و بار مثبت بالایی دارند که باعث جذب سریع‌تر آلودگی‌های باردار منفی از قبیل ویروس‌ها، باکتری‌ها و کلوئیدهای آلی و غیر آلی می‌شود [۸].

فیلترهای نانو‌سرام بیش از ۹۹/۹۹ درصد از ویروس‌ها، باکتری‌ها، انگل‌ها، ترکیبات آلی طبیعی و کدری را حذف می‌کنند. همچنین قابلیت جذب ۹۹/۹ درصد از نمک‌ها، مواد رادیواکتیو و فلزات سنگین از قبیل کروم، آرسنیک و سرب و حتی ذرات نانومقیاس و حل شده را دارند. این فیلترها در pH ۵-۹ بهتر عمل می‌کنند. شدت جریان فیلترهای نانو‌سرام بدون استفاده از فشار، حدود یک تا ۱/۵ لیتر بر ساعت به ازای هر سانتی‌متر مربع از فیلتر است. حداکثر فشار ۴ bar می‌تواند به فیلتر اعمال شود که منجر به شدت جریان ۹ تا ۱۰ لیتر بر ساعت به ازای هر سانتی‌متر مربع از فیلتر خواهد شد. کارتریج فیلترهای نانو‌سرام دارای یک طراحی تاخورد است که سطح آن‌ها را افزایش می‌دهد (شکل ۸).

شرکت آرگوناید یکی از تولیدکنندگان این نوع فیلتر، اعلام کرده است که هزینه تولید فیلترهای نانو‌سرام نسبتاً ارزان است، چراکه می‌توانند با استفاده از فناوری کاغذسازی تولید شوند. در حال حاضر هر مترمربع فیلتر، ۱۰ دلار هزینه دارد که ممکن است



شکل ۸- کارتریج فیلترهای نانو‌سرام



شکل ۱۰. (الف) ساختار لایه‌های ماسک نانولیفی و (ب) طرح‌واره ماسک نانولیفی

را برای مادران باردار، خردسالان، کارگران صنعتی و اعضای خانواده طراحی کرده است.

#### ۶-۶- نانو فیلتر کیسه‌ای

محققان دانشکده میکروبیولوژی دانشگاه استلن بوش آفریقای جنوبی فیلتری شبیه به چای کیسه‌ای تولید کرده‌اند که می‌تواند یک لیتر آب را با هزینه‌ای بسیار کم قابل نوشیدن کند. این کیسه تجدید پذیر زیستی از الیاف نانو ساخته شده و داخل آن از نوعی زغال فعال پر شده است (شکل ۱۱)، دیوار داخلی خود کیسه نیز آغشته به آفت‌کش‌هایی است که میکروب‌های بیماری‌زا را نابود می‌کنند، اما برای انسان ضرری ندارند. این کیسه می‌تواند یک لیتر آب را تصفیه کرده و موادی نظیر آهن، آلومینیوم و نفت را از آن حذف کند، اما قادر به شیرین کردن آب شور نیست [۱۱].

#### ۶-۷- فیلتر نانو لیفی ProTura™

شرکت کلارک فیلتر، نانو فیلتر لیفی بانام تجاری ProTura تولید کرده است که مناسب جمع‌آوری ذرات خاک و گردوغبار است. این فیلتر ساختاری شبه توری منظم، متشکل از الیاف با قطر زیر میکرون متصل به یک بستر سلولزی دارد (شکل ۱۲). این ساختار، فیلتراسیونی را ایجاد می‌کند که کاملاً با بستر سلولزی رایج متفاوت است. با

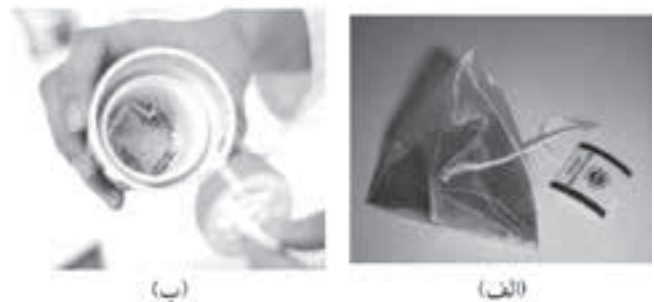
نیک‌فیلتر می‌تواند آب را با درصد خلوص ۹۹/۹۹۹۹ تصفیه کند. این فیلتر قادر است آب‌های موجود در اماکن عمومی، برکه‌ها و رودها را تصفیه کند. این فیلتر برای حذف آلاینده‌های آب از زدایش فیزیکی استفاده می‌کند و در نهایت باکتری‌هایی نظیر ای‌کولای را از آب جدا می‌کند [۱۰].

#### ۶-۵- نانو ماسک

نمونه تجاری Nanomask® از نانو ذرات روی سطح فیلتر برای افزایش قابلیت فیلتراسیون ماسک استفاده می‌کند. این نانو ذرات به مدت ۴۸ ساعت پس از قرارگیری روی ماسک فعال هستند. بسیاری از ماسک‌های پزشکی درجه N-95 دارند. بدین معنا که بازده فیلتراسیون آن‌ها در حذف ذرات با قطر ۰/۳ میکرون حدود ۹۵٪ است. این در حالی است که نانو ماسک بازده ۹۹٪ در حذف ذرات کوچک‌تر از ۰/۲۷ میکرون دارد. هزینه هر نانو ماسک حدود ۱۰ دلار است. ماسک صورت ReSpimask® از غشاء نانو لیفی برای توقف باکتری، ویروس و ذرات گردوخاک استفاده کرده است (شکل ۱۰). این ماسک می‌تواند انسان را از آلودگی هوا، محصولات آلودگی و ویروس‌ها نظیر آنفلوانزا محافظت کند. این شرکت محصولات خود



شکل ۱۲: فیلترهای نانو لیفی شرکت کلارک فیلتر



شکل ۱۱. (الف) فیلتر کیسه‌ای نانو لیفی و (ب) قرارگیری فیلتر کیسه‌ای درون یک لیوان آب



این فیلتر، ذرات ریز آلودگی تمایل دارند که روی سطح بستر قرار بگیرند تا اینکه به درون فیلتر نفوذ کنند. این امر سبب بازده بالای حذف ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها و محدودیت جریان پایین‌تر می‌شود.

#### ۷- شرکت‌های داخلی فعال در تولید نانو فیلتر غشایی

##### ۷-۱- شرکت نانو تار پاک

شرکت دانش‌بنیان نانو تار پاک در سال ۱۳۹۲ موفق به ساخت ماسک صنعتی ارتقاء یافته با نانو الیاف شد. ماسک تهیه شده با نانو الیاف از چندین لایه تشکیل شده که یکی از لایه‌های میانی حاوی نانو الیاف با قطر ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر می‌باشد. این شرکت محصولات خود را با توجه نوع کاربرد به چند دسته تقسیم کرده است:

- ۱- ماسک نانو الیاف صنعتی ۶ لایه برای محیط‌های صنعتی با درجه بالای آلاینده‌ها و ریزگردها،
- ۲- ماسک نانو الیاف صنعتی همراه با پارچه کربن فعال ۷ لایه برای محیط‌های صنعتی با درجه بالای آلاینده‌ها و گازها و بخارهای مضر،
- ۳- ماسک پزشکی، ۴ لایه مناسب محیط‌های بیمارستانی، آزمایشگاهی و دندان پزشکی.

##### ۷-۲- شرکت فناوران نانومقیاس

این شرکت نانو فیلترهایی بر پایه نانو الیاف ساخته است که ذرات خیلی ریز معلق در سیال‌های مختلف مایع و گاز را با کارایی بسیار بالا غربال می‌کند. نتایج اولیه آزمون‌های ارسالی به کشور آلمان در خصوص فیلترهای ارتقا یافته با نانو الیاف تهیه شده در شرکت فناوران نانومقیاس، نشان‌دهنده کارایی بسیار مناسب این نوع فیلترها است. به طوری که فیلتر نانویی ۵۰٪ کاهش در ذرات غبار عبور کرده را در مقایسه با فیلتر پایه نشان می‌دهد. همزمان این پوشش نانویی طول عمر فیلتر را ۲۵٪ افزایش می‌دهد. این نتایج در کنار عدم افزایش افت فشار در مقایسه با فیلتر پایه، امیدواری زیادی را در استفاده از این فناوری در صنایع مختلف مانند پزشکی، نیروگاهی، خودروسازی، شیمیایی، نظامی، معدنی و غیره به وجود می‌آورد. در حال حاضر شرکت نانومقیاس در حال ساخت دستگاه‌های صنعتی پوشش فیلتر با قابلیت پوشش ۱۰۰۰۰ مترمربع کاغذ فیلتر با الیاف نانو در روز می‌باشد.

##### ۷-۳- بهران فیلتر

شرکت تولیدی و صنعتی بهران فیلتر در زمینه تولید انواع فیلترهای خودرو، صنعتی و نیروگاهی در ایران فعالیت دارد. این شرکت از سال ۱۳۸۷ پروژه پوشش‌دهی کاغذهای فیلتر با الیاف نانو را در دستور کار خود قرار داد و در سال ۱۳۹۰ موفق به ساخت فیلترهای با پوشش نانو شد.

این شرکت با استفاده از دستگاه صنعتی تولید نانو الیاف، یک لایه نانو لیفی با قطر بین ۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر را روی کاغذ، قبل از شروع عملیات چین کن، لایه‌نشانی می‌کند. محصولات این شرکت که دارای پوشش نانو می‌باشند، عبارت‌اند از: فیلترهای هوای کمپرسور واحدهای F9 جان براون میتسوبیشی نیروگاه چنگه دار، فیلترهای هوای واحدهای آنسالو مدل V94.2 نیروگاه، فیلترهای هوای توریو ژنراتور، فیلتر مخروطی هوای کمپرسور مولدهای آلستوم نیروگاه، فیلتر استوانه‌ای هوای کمپرسور مولدهای آلستوم نیروگاه، فیلتر هوای کمپرسور مولدهای آلستوم سوئیس و فیلتر استوانه‌ای هوای توربین زمینیس SGT-600.

##### ۸- آینده نانو فیلتراسیون

بازار جهانی غشاءهای نانوفیلتراسیون از ۱۷۲/۸ میلیون دلار در سال ۲۰۱۲، به ۱۹۰/۲ میلیون دلار در سال ۲۰۱۳ افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که در انتهای سال ۲۰۱۹، به ۴۵۵/۱ میلیون دلار برسد. به عبارتی، افزایش سالانه ۱۵/۶٪ را به همراه خواهد داشت. همچنین، افزایش ۱۶/۱ درصدی بازار غشاءهای تصفیه پساب و آب طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ قابل پیش‌بینی است، به طوری که انتظار می‌رود که در سال ۲۰۱۹ به مقدار ۳۸۸/۵ میلیون دلار برسد. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که انتظار می‌رود، بازار غشاءهای بیو پزشکی و داروسازی نیز با افزایش سالانه ۱۹/۵٪، به حدود ۲۲/۷ میلیون دلار در سال ۲۰۱۹ برسد [۱۲].

##### ۹- جمع بندی

غشاء نانوفیلتراسیون یکی از غشاءهای محرک- فشاری با خصوصیتی مابین اسمز معکوس و غشاء اولترافیلتراسیون است. فیلتر نانو لیفی از یک لایه نانو لیف بسیار ظریف تهیه شده به روش الکترورسی و زیر لایه‌های انعطاف پذیر تهیه شده است. مزیت این غشاء در مقایسه با غشاءهای دیگر، اندازه حفره‌های نانومتری است که حتی توانایی حذف ویروس‌ها، باکتری‌ها و مواد نانومتری را داراست. نانو فیلترهای کاربردی در صنایع در دودسته فیلترهای نانو لیفی و فیلترهای حاوی نانو ذرات تقسیم‌بندی می‌شوند. نانو فیلترها در کاربردهایی نظیر ماسک‌های خانگی، پزشکی و صنعتی، فیلتراسیون آب و پساب کارخانه‌ها از کارایی بالایی برخوردار است. با توجه به مزایای به کارگیری نانوفیلتراسیون در صنایع مختلف، پیش‌بینی‌های صورت گرفته از آینده بازار این محصولات و پتانسیل بالقوه این فناوری در کشور، لزوم توجه هر چه بیشتر صنایع داخلی به این فناوری ضروری به نظر می‌رسد.

منابع در دفتر مجله موجود است.