مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۱۵

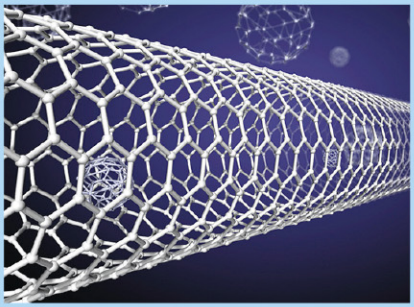
تصفیه آب با استفاده از غشاء پلیمری نانوفیلتراسیون

ویرایش نخست

سال انتشار: ۱۳۹۴

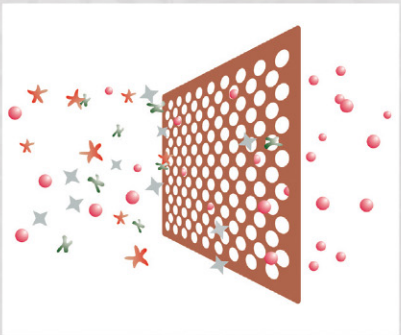
ستاد ویژه توسعه فناوری نانو • www.nano.ir

فناوری نانو چیست؟



فناوری نانو توانایی طراحی ساختارها را با دقت و ظرافت مولکولی-اتمی فراهم می‌آورد. این به معنای مهندسی دقیق یک ساختار در حد میلیاردیم‌متر یا همان نانومتر است. ساختارهایی که با این دقت تهیه می‌شوند، خصوصیات ویژه و منحصربه‌فردی از خود نشان می‌دهند. همچنین این اندازه ذرات (یا جزییات ساختار) است که خصوصیات منحصر به‌فرد را ایجاد می‌کند. انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۵۰ میلادی، این فناوری بتواند چهره زندگی بشر را بطور کلی تغییر دهد. فناوری نانو در کنار فناوری زیستی و فناوری اطلاعات موج دیگری از انقلاب صنعتی را در جهان رقم خواهد زد.

محصولات غشایی



شکل ۱. عملکرد یک غشاء نیمه‌تراوا، برخی مواد قابلیت عبور از منافذ غشاء را ندارند و به مرور جداسازی می‌شوند.

استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا برای جداسازی ترکیبات و مواد معلق یا محلول در مایعات و گازها یک رویکرد کارای مهندسی است. غشاهای نانوفیلتراسیونی جزء آخرین ابداعات در زمینه غشاء هستند و معمولا برای گندزدایی و حذف املاح از آب‌های سطحی یا زیرزمینی به کار می‌روند. با این حال، محصولات غشایی نیمه‌تراوا که حاوی حفرات نانومقیاس هستند در بسیاری از صنایع صنعتی و نیمه‌صنعتی مربوط به تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی غشاها دارای حفرات بسیار ریزی هستند که مولکول‌های کوچک به راحتی می‌توانند از آن عبور کنند و مولکول‌های درشت‌تر در طرف دیگر غشاء باقی می‌مانند. در سیستم غشایی، مواد شیمیایی جداشده از بین نمی‌روند بلکه تغلیظ می‌شوند. به طور معمول مولکول‌های کوچک مثل آب، حلال‌ها و یون‌های ریز می‌توانند از غشاء عبور کنند، ولی مولکول‌های درشت اجازه عبور نخواهند داشت (شکل ۱).

محصولات غشایی بر اساس اندازه حفرات خود به سه دسته ماکروحفره‌ها[1]، مزوحفره‌ها[2] و میکروحفره‌ها[3] تقسیم‌بندی می‌شوند (جدول ۱) [۱].

جدول ۱. توانایی انواع غشاء برای جداسازی و فیلتراسیون [۱]

نوع حفرات	نوع غشاء	گونه و ترکیبات قابل عبور	ابعاد گونه قابل عبور (nm)
ماکروحفره‌ها (بیشتر از ۵۰ nm)	ماکروفیلتراسیون[4]	مخمرها و قارچ‌ها باکتری‌ها ذرات روغنی	۱۰۰۰۰-۱۰۰۰ ۱۰۰۰۰-۳۰۰ ۱۰۰۰۰-۱۰۰
مزوحفره‌ها (۲ تا ۵۰ nm)	الترافیلتراسیون[5]	کلوئیدهای جامد ویروس‌ها پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها اسیدهای نوکلئیک	۱۰۰۰-۱۰۰ ۳۰۰-۳۰ ۱۰-۳ بیشتر از ۳
میکروحفره‌ها (۰/۲ تا ۲ nm)	نانوفیلتراسیون[6] اسمز معکوس و مستقیم[7]	آنتی بیوتیک‌های رایج یون‌های معدنی آب	۱/۸-۰/۳ ۰/۴-۰/۲ ۰/۲

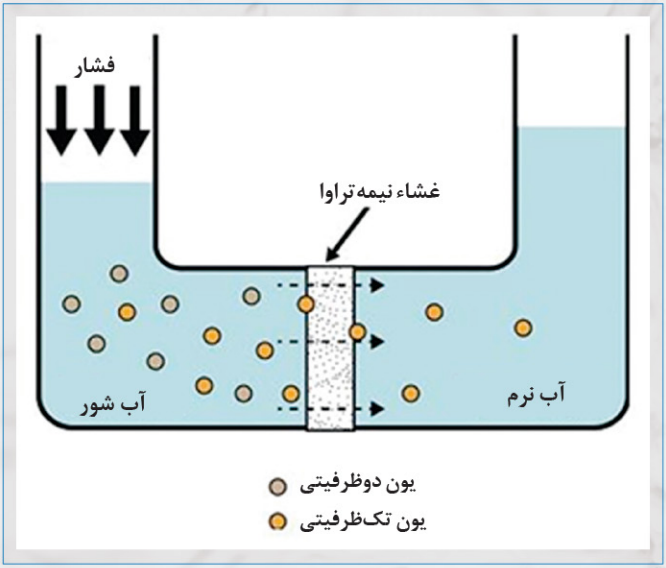
چالش‌های پیش روی فناوری غشاء

مهمترین چالش در این حوزه، افزایش گزینش‌پذیری برای یک غشاء است به طوری که از تراوایی آن کاسته نشود. همچنین مصرف انرژی جهت نیروی پیش‌برنده در فرآیند تصفیه و شیرین‌سازی آب اهمیت قابل توجهی دارد. مقاومت در برابر رسوب و گرفتگی منافذ، پایداری مکانیکی و حرارتی، خاصیت خودتمیزشوندگی و توانایی همزمان جداسازی و تخریب آلاینده‌ها در سطح، از دیگر نکات قابل توجهی می‌تواند باشد که با بهره‌گیری از فناوری نانو، می‌توان در غشاء مشاهده کرد [۲].

نانوفیلتراسیون

از غشاهای نانوفیلتراسیون معمولی برای نرم‌سازی آب استفاده می‌شود که در آن سختی آب، کم شده و مواد آلی، باکتری‌ها و ناخالصی‌های دیگر از آب جدا می‌شوند. نرم‌سازی فرآیندی است که در آن نمک‌زدایی در حد بالا صورت نمی‌گیرد. چرا که بسیاری از صنایع نیازی به نمک‌زدایی کامل ندارند.

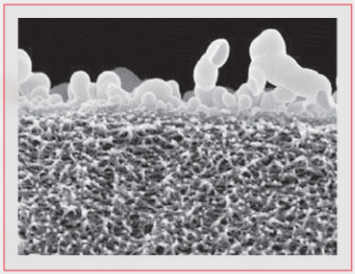
همچنین برای آب شرب نیاز به آبی است که املاح به طور کامل از آن حذف نشده باشد (شکل ۲). برای نمک‌زدایی کامل نیاز به فرآیند اسمز معکوس می‌باشد. در فرآیند نانوفیلتراسیون معمولی، بخشی از مواد معدنی آب حذف می‌شوند در حالی که در اسمز معکوس تا ۹۹/۵ درصد املاح حذف می‌شوند. به دلیل نیاز به فشار کمتر نانوفیلتراسیون نسبت به اسمز معکوس و کاهش هزینه انرژی، در خصوص نمک‌زدایی از آب حاوی مقادیر بالا از املاح جهت مصارف آشامیدن، توجه به نانوفیلتراسیون فزاینده است. با توجه به قوانین سخت در مورد حذف آلاینده‌ها و خطر فلزات سنگین در آب شرب، اصلاح غشاهای نانوفیلتراسیون توسط فناوری نانو امری اجتناب ناپذیر است. غشاهای نانو فیلتراسیون را می‌توان به دو گروه سرامیکی و پلیمری طبقه‌بندی نمود [۳].



شکل ۲. عملکرد غشاء نیمه تراوا نانوفیلتراسیونی [۳]

بهبود غشاء نانوفیلتراسیون پلیمری

دو نوع غشاء سلولز استات[۸] و غشاء کامپوزیت لایه‌نازک پلی‌آمید[۹]، موفق‌ترین غشاهای نانوفیلتراسیون در بازار هستند. غشاء سلولز استات به دلیل تولید آسان و ارزان بودن بخش کوچکی از بازار را در اختیار دارد ولی معایبی دارد که از آن جمله می‌توان به محدوده کارکردش در pH بین ۴-۶، از بین رفتن کارایی غشاء در بالاتر از دمای ۳۵ درجه سانتی گراد و جذب راحت باکتری روی این غشاء اشاره کرد. غشاء کامپوزیت لایه‌نازک پلی آمید نیز به دلیل قابلیت خوب در پس‌زدن نمک، در بازار تجاری موفق بوده اما معایبی مثل مقاومت کم در برابر فشار، مقاومت کم در برابر اکسید کننده‌ها و کلر، مقاومت دمایی پایین را دارد. همچنین غشاهای نانوفیلتراسیون موجود در بازار، به سرعت منافذشان گرفته می‌شود و از طول عمر آنها به شدت

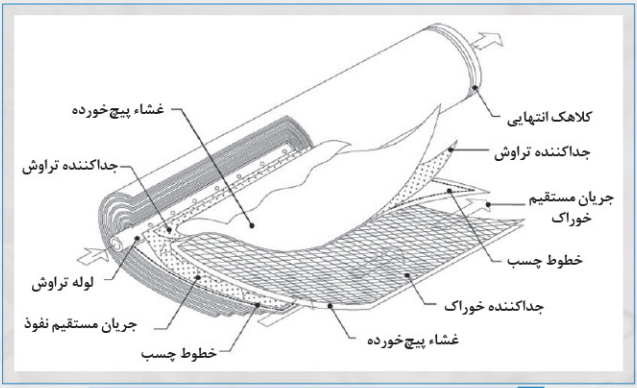


شکل ۳. غشاء نانوفیلتراسیون اصلاح شده با نانو زئولیت [۳]

کاسته می‌شود. در این خصوص، غشاهای جدید پلیمری ترکیب‌شده با فناوری نانو مشکلات گذشته را برطرف کرده است. از جمله موادی که می‌توانند در بهبود عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون پلیمری نقش ایفا کنند: (۱) غشاءهای پوشش‌داده شده از نانوکانی‌های سیلیکاتی، (۲) غشاهای پلیمری -پروتئینی پیوندی و یا شبه‌زیستی[۱۰]، (۳) غشاهای ترکیب‌شده با نانولوله‌های کربنی، (۴) غشاهای کوپلیمری خودآرا[۱۱]، (۵) غشاهای پایه گرافنی، (۶) نانوکامپوزیت‌های لایه‌نازک آلی- غیرآلی می‌باشند [۵،۴] (شکل ۳). به عنوان مثال، شرکت LG محصولات غشاهای اسمز معکوس نانوکامپوزیت لایه‌نازک با نام تجاری $nanoH_2O$ به بازار عرضه کرده و درحال کار بر روی محصولات نانوفیلتراسیون هستند [۶]. یا شرکت دانمارکی Aquaporin غشاهای متنوع از نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس که با فناوری نانو ادغام شده است را به فروش می‌رساند [۷].

آماده‌سازی لایه‌های غشاء نانوفیلتراسیون

فرایند غشاء نانوفیلتراسیون منجربه پس‌زدن ذرات بزرگتر از یک نانومتر مثل مولکول‌های آلی با وزن زیاد، یون‌های چندظرفیتی (مثل Ca^{2+} و SO_4^{2-}) و در مواردی یون‌های تک‌ظرفیتی (مثل CL^-) می‌شود. غشاءهای نانوفیلتراسیون معمولا ضخامتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر با یک لایه تفکیک‌کننده دارد که منافذی با قطر کمتر از ۰/۰۰۲ میکرومتر را دارا می‌باشد. معمولا غشاءهای نانوفیلتراسیون پلیمری به صورت چندلایه استفاده می‌گردند که این لایه‌ها به شکل لوله‌ای و یا حلزونی پیچیده می‌شوند (شکل۴). و برای استحکام بین لایه‌ها، از چسب‌های مخصوصی که در عملکرد سیستم غشاء نقشی داشته باشد



شکل ۴. طراحی غشاء نانوفیلتراسیون به مدل حلزونی

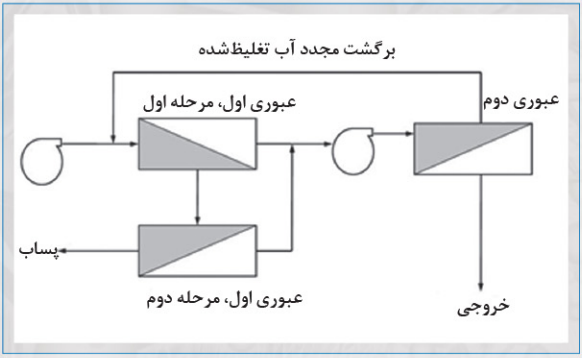
استفاده می‌کنند. فشار عبوری غشاء معمولا بین ۳/۵ تا ۱۶ بار می‌باشد. [۸]. غشای نانوفیلتراسیون پلیمری نیز به عنوان جزء اصلی فرآیند نانوفیلتراسیون می‌تواند بنابر ساختار، جنس، گستره اندازه حفرات و فناوری طراحی‌شده با روش‌های گوناگونی ساخته شود.

نانوفیتراسیون جهت نمک‌زدایی آب دریا

باتوجه به کاهش منابع آبی در بسیاری از کشورها، تصفیه آب دریا اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است، استفاده از اسمز معکوس به منظور نمک‌زدایی آب دریا به دلیل مصرف زیاد انرژی و هزینه بالای نگه‌داری سیستم، مقرون به صرفه نیست. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از غشاهای اصلاح‌شده نانوفیلتراسیون در دو مرحله (شکل ۵ و ۶) نتایج مطلوب‌تری نسبت به اسمز معکوس در تصفیه آب دریا خواهد داشت زیرا [۹]:

شکل ۵. نصب و راه‌اندازی سیستم نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از غشاء نانو فیلتراسیون در کالیفرنیا (۲۰۰۶) به درخواست بنیاد تحقیقاتی اتحادیه آب آمریکا[۱۲] و سازمان احیا اراضی ایالات متحده[۱۳]

- فشار مورد نیازبرای اسمز معکوس، ۸۳ بار می‌باشد درحالی که فشار مورد نیاز برای دو مرحله نانوفیلتراسیون، ۳۸ بار است که نزدیک به ۲۰ درصد انرژی کمتری هدر می رود.
- استحکام و طول عمر این سیستم بهتر از سیستم تک‌مرحله‌ای اسمز معکوس خواهد بود.
- طبق نظر سازمان جهانی بهداشت، مقدار $H_2BO_3^-$ نباید از ۰/۵ میلی گرم بر لیتر بیشتر شود، این درحالی است که آب دریا بین ۴ تا ۶ میلی گرم بر لیتر یون بورات دارد که غشاهای نانوفیلتراسیون اصلاح‌شده با نانومواد می‌توانند به راحتی در طی دو مرحله حذف کنند. ولی در اسمز معکوس احتمال عبور یون بورات وجود دارد.



شکل ۶. سیستم نانوفیلتراسیون دومرحله‌ای جهت نمک‌زدایی آب دریا

تجاری‌سازی نانوفیلتراسیون در ایران

در ایـران بـه دلیـل بحـران کم‌آبـی در دهـه گذشـته، توجـه خاصـی بـه طرح‌هـای تصفیـه آب، اسـتفاده مجـدد از فاضـلاب و تهیـه آب شـرب شـده اسـت. در ایـن راسـتا می‌تـوان بـه طرح‌هـای نویـن نانوفنـاوری نیـز اشـاره نمـود.

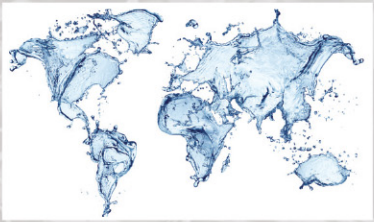
- طـرح بررسـی عملکـرد نانوفیلتراسـیون در تصفیـه آب تهـران بـرای تصفیـه نیتـرات حاصـل از نشـت فاضـلاب
- طـرح آب‌رسـانی بـه شـهر مـرزی خمارلـو در سـال ۱۳۸۵ انجـام گردیـد کـه تجهیـزات تصفیه‌خانـه نانوفیلتراسـیون در کنـار رود ارس احـداث گردیـد.
- تصفیـه آب رود کارون بـه روش نانوفیلتراسـیون بـا حجـم تصفیـه روزانه ۳۰۰ مترمکعب جهت آب‌رسـانی بـه منطقـه محـروم ملاثانی در سـال ۱۳۸۶ توسـط شـرکت نانوپالایـش آب‌لیان.
- تامیـن آب شـهر پل‌دشـت از توابـع آذربایجـان غربـی بـا روش نانوفیلتراسـیون در سـال ۱۳۹۲ بـا حجـم ۱۷۰۰ مترمکعـب در روز .

مطالعات در هریک از این موارد، بازده خوب و بهره‌وری اقتصادی را برای طرح‌های فوق نوید می‌دهند.

در زمینـه سـاخت غشـاهای نانوفیلتراسـیون تلاش‌هـای موفقـی در «پژوهشـکده فنـاوری نانـوی دانشـگاه صنعتـی نوشـیروانی بابـل» صـورت پذیرفـت و نهایتـا محصـول طراحـی شـده در راسـتای فعالیت‌هـای «شـرکت فنـاوری نانـو کاسـپین» تجاری‌سـازی و عرضـه شـد. ایـن گـروه کـه در زمینـه سـاخت نسـل جدیـد غشـاءهای نانوفیلتـر در تصفیـه آب و پسـاب صنعتـی فعالیـت می‌کنـد، در سـال ۱۳۸۵ آغـاز بـه کار کـرد و از سـال ۱۳۹۱ در قالـب «شـرکت دانش‌بنیـان فنـاوری نانوکاسـپین» ادامـه یافـت. وجـود متخصصـان زبـده در حـوزه غشـاء در دانشـگاه و در پژوهشـکده و همچنیـن حمایت‌هـای سـتاد ویـژه توسـعه فنـاوری نانـو و دانشـگاه صنعتـی نوشـیروانی بابـل، موتـور محرکـه تأسـیس شـرکت در حـوزه نانوغشـاء شـد [۱۰-۱۲].

همچنیـن شـرکت‌هایی همچـون «نانوپالایـش آب‌لیـان» و «مهندسـی سـاخت آب روبـش رسـوب مهسـار» از مـوارد فعـال در زمینـه تصفیـه آب بـا نانوفیلتراسـیون بوده‌انـد.

شرکت‌ها و محصولات خارجی



بـازار محصـولات غشـایی بـرای مصـارف تصفیـه آب بسـیار گسـترده بـوده و بـه طـور قابل توجهـی افزایـش یافتـه اسـت بـه عنـوان مثـال در سـال ۲۰۱۰، تنهـا در زمینـه غشـاءهای مربـوط بـه تصفیـه آب آشـامیدنی، بـازاری معـادل ۵۹۴ میلیـون دلار داشـته اسـت. تخمیـن زده می‌شـود

که تا سال ۲۰۱۵، حجم بازار محصولات غشایی، برای آب آشامیدنی، آب فرآیندی و پساب به ترتیب معادل ۹۰۰، ۶۰۰ و ۴۲۰ میلیون دلار باشد.

بسیاری از شرکت‌های فعال در زمینه تصفیه آب، شرکت‌های تولیدکننده غشاء را شامل می‌شوند و بسیاری از تولیدکنندگان غشاء که مبتنی بر فناوری نانو هستند از زیرمجموعه‌های شرکت‌های بزرگ چندملیتی مانند Dow Chemicals، Toyobo، Koch Industries، Toray Industreis، BASF، Woongjin Chemical می‌باشند. برخی شرکت‌ها مانند MarCorPurification، در زمینه تولید فیلترهای آب مصارف پزشکی فعالیت می‌کنند. از دیگر شرکت‌های فعال در زمینه غشاءهای پلیمری نانوفیلتراسیون می‌توان نام برد [۱۳-۲۱]:

شکل ۷. محصول غشایی نانوفیلتراسیون شرکت GE's Water & Process Technologies

Argonide/ Daicel Chemical Industrie/ Donaldson Co/ Dow water&process / Emembrane/ Hydranautics-Nitto Denko / ITT industries/ Kochmembrane/ Membrane Products Corp/ Microdyn-Nadir Gmbh/ New logic International/ Trisep corp/Fraunhofer IKTS Appliedmembranes/Aquaporin

یکی از موفق‌ترین کمپانی‌های بزرگ در صنایع تصفیه آب، شرکت GE's Water & Process Technologies می‌باشد که از سال ۱۹۹۹ شروع به کار کرده و توانسته با بهبود کیفیت محصولات و بهره‌گیری از فناوری‌های روز دنیا، بسیاری از رقیبان خود را کنار زده و جایگاهی جهانی را بدست آورد [۲۲]. تا به امروز نزدیک به ۲ میلیارد دلار در جهت تحقیقات توسط این شرکت سرمایه‌گذاری شده است که اخیرا، فناوری نانو و استفاده آن در سیستم‌های غشایی سهم بزرگی از بودجه تحقیقاتی شرکت را شامل شده است (شکل ۷).

جمع بندی

امروزه فرآیندهای فیلتراسیون نقشی اساسی در تصفیه آب بازی می‌کنند. در این میان غشاهای توسعه‌یافته نانوساختار منجر به ایجاد سامانه‌های نانوفیلتراسیون بسیار کارا با قابلیت‌های نمک‌زدایی و گندزدایی شده‌اند. شرکت‌های بسیار بزرگی در دنیا سرمایه‌گذاری‌های ارزنده‌ای در این زمینه انجام داده‌اند. خوشبختانه در داخل کشور نیز تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت می‌گیرد و شرکت‌هایی نیز موفق به تجاری‌سازی چنین محصولاتی گردیده‌اند. به طور کلی دورنمای بسیار موفقی برای تولید و بکارگیری محصولات نانوفیلتراسیون در کشور متصور است [۸].

مراجع

1 A review of water treatment membrane nanotechnologies, M. Theresa M. Pendergast , E.M.V. Hoek, Energy & Environmental Science, P: 1946, V: 4 (2011).

2 Applications of Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment, X. Qu, P.

J.J. Alvarez, Q. Li, Water Research, P: 3931, V: 47 (2013).

3 Applications of Nanotechnology in Wastewater Treatment—A Review, T. Bora ,J. Dutta, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, P: 613, V: 14 (2014).

4 Nanotechnology Applications for Clean Water ,Solutions for Improving Water Quality, Elsevier Inc. (2014).

5 Advances in Polymer-based Nanostructured Membranes for Water Treatment, N. Mehwish, A. Kausar, M. Siddiq, Polymer-Plastics Technology and Engineering, P: 1290–1316, V: 53 (2014).

6 http://www.nanoh2o.com/products

7 http://www.aquaporin.dk/85/aquaporins.aspx

8 Encyclopedia of Membrane Science and Technology, E. M.V. Hoek , V. V. Tarabara, John Wiley & Sons, Inc (2013).

9 http://www.usbr.gov/main/programs/

10 http://corridor.nano.ir/

11 http://www.mtfn.ir/info_company.php

12 http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper_view&id=1406&lang=1

13 http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper_view&id=1374&lang=1

14 http://daicen.com/en/products/membrane/

15 http://www.argonide.com/commercial/product-line/

16 http://www.sterlitech.com/membrane-process-development/flat-sheet-membranes/nanofiltration-nf-membrane/

17 http://www.dowwaterandprocess.com/en/products/reverse_osmosis_and_nanofiltration

18 http://www.membranes.com/index.php?pagename=esna

19 http://membranes.trisep.com/category/nanofiltration-membranes

20 http://www.kochmembrane.com/Learning-Center/Technologies/What-is-Nanofiltration.aspx

21 http://www.kochmembrane.com/Landing/SR3D-Nanofiltration.aspx

22 http://www.gewater.com/product-directory.html?cid=ProductsNavBar

پی‌نوشت‌ها

1 Macropores

2 Mesopores

3 Micropores

4 Microfiltration

5 Ultrafiltration

6 Nanofiltration

7 Reverse & Forward Osmosis

8 Cellulose acetate membranes

9 Polyamide TFC membranes

10 Hybrid protein-polymer biomimetic membranes

11 Self-assembled co-polymer membranes

12 American Water Works Association Research Foundation

13 United States Bureau of Reclamation

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو منتشر شده است

- نماهای کامپوزیتی نانویی
- کاربرد پوشش‌های نانو در لوله‌های آب گرم
- ظروف آشپزخانه با پوشش نانویی
- تکمیل ضدآتش و دیرسوزی منسوجات
- نانوذرات لیپیدی، سامانه‌ای جدید برای دارورسانی
- نانومیسل‌ها و نقش آنها در رهایش دارو
- نانوبلورهای دارویی فرمولاسیون جدید داروهای کم‌محلول
- نقش فناوری نانو در توسعه پچ‌های پوستی
- کاربردهای فناوری نانو در سیمان حفاری
- کاربردهای فناوری نانو در گل حفاری
- کاربردهای فناوری نانو در صنعت نساجی

- بهره‌گیری از جاذب‌های نانو بر پایه آئروژل‌ها در حذف آلاینده‌های نفتی و تصفیه پساب‌های صنعتی
- کاربرد فناوری نانو در رنگ‌های آنتی‌استاتیک
- داروهای متصل‌شده به پادتن

مجموعه نرم‌افزارهای «نانو و صنعت»

مجموعه نرم‌افزارهای نانو و صنعت با هدف معرفی کاربردهای فناوری نانو در بخش‌ها و صنایع مختلف طراحی و منتشر شده است. در این نرم‌افزار اطلاعاتی مفید و کاربردی در قالب فیلم مستند، مقاله، کتاب الکترونیکی و مصاحبه با کارشناسان، در اختیار فعالان صنعتی کشور و علاقمندان به فناوری نانو قرار داده شده است.

تاکنون شش عنوان از مجموعه نرم‌افزارهای نانو و صنعت با موضوع کاربردهای فناوری‌نانو در صنایع «نفت»، «خودرو»، «نساجی»، «ساخت‌وساز»، «بهداشت و سلامت» و «کشاورزی»، ارائه شده است.

مرکز پخش: ۸۸۰۲۳۹۶۴ - www.nanosun.ir

شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهرویژن
نظارت:	داود قرایلو
تهیه‌کنندگان:	احسان فریدی محسن سروری

تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
پست الکترونیک:	setad@nano.ir report@nano.ir
صندوق پستی:	۳۴۴-۱۴۵۶۵