

Polymeric Membranes and Their Role in the Removal of Dyes

Hafez Soltani Mohammadi¹, Zahra Rahmani², Behzad Shirkavand Hadavand²

1- Department of Chemical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, P.O. Box: 11155-1639.

2- Department of Resin and Additives, Surface Coating and Novel Technologies Faculty, Institute for Color, Science and Technology, Tehran, Iran, P.O. Box: 16765-654.

ABSTRACT

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28-12-2022

Accepted: 19-06-2023

Available online: 13-11-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.3.2.8

Keywords:

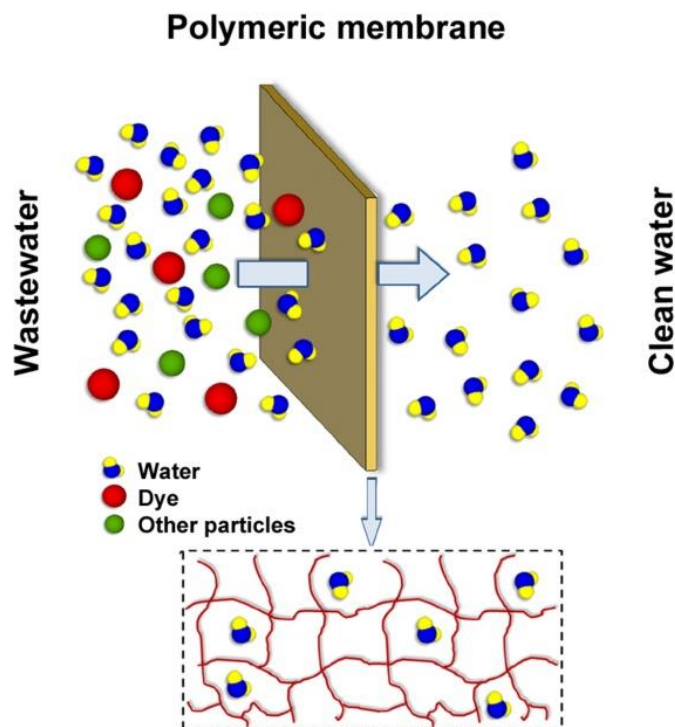
Polymeric membranes

Removal

Dyes

Membrane processes

In recent times, the growth of various industries has led to an increase in the generation of colored wastes and effluents. Dyes, in particular, are significant water pollutants that contribute to the production of colored effluents. Physical, chemical, and biological methods have been employed to treat and purify colored wastewater. With the progress of polymer science, the fabrication of diverse types of membranes for dye removal has increased based on the properties of different dyes. By manufacturing membranes in varying sizes, dyes can be eliminated from wastewater. In addition, the use of clay and metal-organic frameworks has facilitated the development of membranes for efficient dye purification and removal. This article discusses the production and application of different types of polymer membranes for the removal of dyes while introducing dyes



Corresponding author: shirkavand@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



غشاهای پلیمری و نقش آنها در حذف مواد رنگزا

حافظ سلطانی محمدی^۱، زهرا رحمانی^۲، بهزاد شیرکوند هداوند^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳۹-۱۱۱۵۵

۲- کارشناس ارشد، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۳- استاد، گروه رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

چکیده

امروزه با گسترش صنایع پسماندها و پساب‌های رنگی در طبیعت افزایش یافته است. مواد رنگزا یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های آب بشمار می‌آید که تولید پساب‌های رنگی می‌کنند. پساب‌های رنگی با روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی حذف و تصفیه می‌شوند. امروزه با گسترش علم پلیمر، تولید انواع غشاهای حذف مواد رنگزا با توجه به خواص ماده رنگزا گوناگون افزایش یافته است و با ساخت غشاهای گوناگون به طور خوبی ماده رنگزا از پساب‌ها حذف می‌شوند. با گسترش علم پلیمر حتی غشاهایی به کمک خاک رس و چارچوب‌های فلزی-آلی ساخته شده است که در تصفیه و حذف مواد رنگزا ما را بسیار یاری می‌دهد. در این مقاله ضمن معرفی مواد رنگزا به روش‌های تولید و کاربرد انواع غشاهای پلیمری در حذف مواد رنگزا می‌پردازیم.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.3.2.8

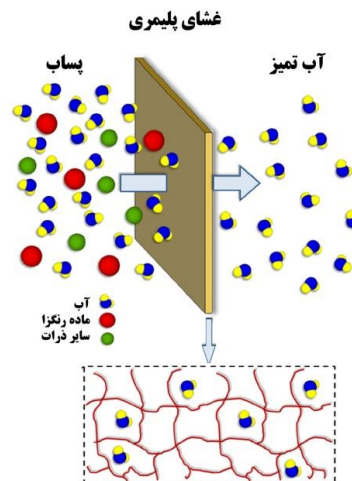
واژه‌های کلیدی:

غشاهای پلیمری

حذف

مواد رنگزا

فرآیندهای غشایی



۱- مقدمه

پلیمرهایی ساخت که به عنوان غشا ما را در حذف مواد رنگزا یاری دهد. در بین غشاهای مختلف، غشاهای پلیمری به دلیل انعطاف پذیری بیشتر، خاصیت تشکیل فیلم خوب، استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی، گزینش پذیری بالا، انتقال انتخابی گونه‌های شیمیایی، مواد ارزان قیمت برای ساخت آن و اندازه منافذ مورد نیاز برای فرآیندهای مختلف صاف و جدا کردن، کارآمد هستند.

۲- غشا و انواع آن

غشا به معنای پوسته است و تراوایی انتخابی دارد. یک غشا می‌تواند باردار یا خنثی، جامد یا مایع و متقارن یا نامتقارن باشد. عبور مواد از یک غشا می‌تواند تحت تاثیر همرفت (برای مثال در غشاهای سلولی) یا وجودغشا در یک میدان الکتریکی یا به علت اختلاف دما، فشار یا غلظت باشد. غشاها به طور کلی به دو دسته زیستی و مصنوعی طبقه‌بندی می‌شوند. از منظر دیگر غشاها را می‌توان به دو دسته ایزوتروپ یا غیرایزوتروپ طبقه‌بندی کرد. غشاهای ایزوتروپیک از نظر ترکیب و ساختار فیزیکی یکنواخت هستند. از طرف دیگر غشاهای غیرایزوتروپ در سطح غشا غیریکنواخت هستند و از لایه‌های مختلف با ساختار و ترکیب متفاوت تشکیل شده‌اند. از نظر مواد تشکیل دهنده غشا، غشاها به دو دسته آلی یا معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. غشاهای آلی از پلیمرهای آلی مصنوعی ساخته می‌شوند. غشاهای معدنی از موادی مانند سرامیک، فلزات، زئولیت‌ها یا سیلیس ساخته می‌شوند (۴).

۳- انواع فرآیندهای غشایی

۳-۱- فرآیندهای غشایی تحت فشار

فرآیندهای غشایی تحت فشار، تا حد زیادی پرکاربردترین فرآیندهای غشایی در تصفیه پساب هستند. چهار نوع اصلی از این فرآیندها وجود دارد که عبارت‌اند از میکروفیلتراسیون (MF)، اولترافیلتراسیون (UF)، نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO) [۵]. چندین نمونه از اعمال این فرآیندهای غشایی تحت فشار در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ خلاصه‌ای از ویژگی‌های اصلی این فرآیندها ارائه شده است.

۳-۲- غشاهای نانوفیلتراسیون، میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون

به طور کلی می‌توان از انواع مختلفی از غشاها برای دستیابی به اهداف مختلف در تصفیه پساب‌های رنگرزی استفاده کرد (۱۷). غشاهای MF و غشاهای UF برای از بین بردن ماده رنگزای کلونیدی، ذرات و سایر ماکرومولکول‌ها استفاده می‌شوند. غشاهای NF برای از بین بردن مواد رنگزا بسیار کارآمد هستند، اما نمی‌توانند مخلوط مواد رنگزا/نمک را برای بازیابی تصفیه کنند.

آلودگی مواد رنگزا یکی از خطرناک‌ترین آلودگی‌هایی است که در صنایع مختلف همچون نساجی، خودروسازی، بهداشتی و غیره تولید می‌شود. شاخص رنگ، مواد رنگزا با ساختار شناخته شده را بر اساس نوع شیمیایی به ۲۵ دسته ساختاری طبقه‌بندی می‌کند. یکی از مهم‌ترین طبقات، مواد رنگزای آزو هستند. مواد رنگزای آزو حاوی یک یا چند گروه آزو و بزرگ‌ترین خانواده مواد رنگزای آلی هستند. مواد رنگزا را می‌توان به سه روش فیزیکی، شیمیایی و زیستی حذف نمود. روش‌های فیزیکی شامل صاف کردن غشایی است. جذب سطحی یکی از روش‌های فیزیکی حذف مواد رنگزا می‌باشد. کربن فعال (AC) به طور گسترده‌ای در حذف مواد رنگزا از پساب استفاده می‌شود. فعال سازی مواد با اکسید شدن جزئی به منظور ایجاد ساختارهای منفذی در آن انجام می‌شود. کربن فعال‌هایی می‌توانند به صورت‌های مختلفی وجود داشته باشند که عبارتند از: کربن فعال دانه‌ای (GAC)، کربن فعال پودری (PAC)، کربن فعال گلوله‌ای و صافی کربن فعال (ACF) (۱). نانوجاذب‌ها کارایی جذب عالی و سینتیک فرآیند سریع را ارائه می‌دهند. این به دلیل سطح وسیع آن‌ها و دسترسی آسان به مکان‌های جذب می‌باشد (۲). پدیده جذب به ویژگی‌های ذاتی جاذب‌ها بستگی دارد. از این رو، سازوکار اساسی وابسته به ویژگی‌های جاذب است. روش‌های شیمیایی حذف مواد رنگزا بیشتر شامل اکسید شدن آن می‌باشد. با اکسید شدن مولکول‌های ماده رنگزا، بسته به ساختار ماده رنگزا و قدرت اکسیدکننده مورد استفاده، به مولکول‌های کوچک بی‌رنگ مانند دی‌اکسید کربن، آب، نیتروژن، اسید آلدهید و سولفات تجزیه می‌شوند. روش اکسید شدن به کمک معرف فنتون قابلیت رنگ‌زدایی طیف گسترده‌ای از ضایعات را دارد ولی به شدت گران است. روش‌های زیستی به معنای استفاده از چندین میکروارگانیسم از جمله قارچ‌ها، باکتری‌ها، مخمرها و جلبک‌ها برای حذف مواد رنگزا است که امروزه مشخص شده است که می‌توان بسیاری از مواد رنگزای آزو را تحت شرایط محیطی خاص رنگ‌زدایی کرده و حتی به طور کامل معدنی کرد (۳). تخلیه مواد رنگزا به منبع آب باعث کاهش کیفیت آب می‌شود. مواد رنگزا بدون هرگونه فرآیندی برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند. ساختار بسیار چندوجهی و پایه مصنوعی مواد رنگزا حذف آنها را نسبتاً مشکل‌ساز می‌کند. علاوه بر این، در نتیجه ساختار شیمیایی مواد رنگزا، در برابر مواد شیمیایی متعدد، عوامل اکسیدکننده و گرما که از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر هستند، مقاومت نشان می‌دهند. از این رو، رنگ‌زدایی پساب‌ها به محض رها شدن در محیط آبی کار آسانی نیست. پلیمرهایی که به کمک انسان و با فناوری‌های مختلف ساخته می‌شوند به دلیل اینکه می‌توان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آنها را تغییر داد، با بررسی و پژوهش می‌توان

جدول ۱: نمونه‌هایی از فرآیندهای غشایی تحت فشار را نشان می‌دهد.

Table 1: The examples of membrane pressurized processes.

Pressure driven membrane process	Wastewater treated	Results	Reference
UF	Vegetable oil factory	COD(91%), TSS(b)(100%), TOC(87%), PO ₄ ³⁻ (85%), Cl ⁻ (40%)	(6)
MF-RO	Urban wastewater	Pesticides and pharmaceuticals removed to discharge limit	(7)
MF	Municipal wastewater (disinfection and phosphorus removal)	Contaminants removed to below detection limit	(8)
MF	Synthetic emulsified oily wastewater	95% removal of organic contaminants	(9)
NF-RO	Dumpsite leachate	95% water recovery	(10)
UF	Poultry slaughterhouse, wastewater	COD and BOD removal > 94%, fats (99%), suspended substances (98%)	(11)
NF	Textile	COD (57%), color (100%), salinity (30%)	(12)
UF-RO	Metal finishing industry	90-99% removal of different contaminants	(13)
UF-RO	Oily wastewater	Oil and grease (100%), TOC (98%), COD (98%), TDS (95%), Turbidity (100%)	(14)
UF-NF/RO	Phenolic wastewater from paper mill	COD (95.5%), phenol (94.9%)	(15)

Note: COD: chemical oxygen demand, TSS: total suspended solids, BOD: biochemical oxygen demand, TOC: total organic carbon, TDS: total dissolved solids.

جدول ۲: ویژگی‌های اصلی فرآیندهای تحت فشار (۱۶).

Table 2: The main properties of pressurized processes (16).

Membrane process	Mw cut off (kilo Dalton)	Retained diameters (µm)	pressure required (bar)	Membrane type	Average permeability (L/m ² h bar)	Solutes Retained
MF	100-500	0.1-10	1-3	porous, asymmetric or symmetric	500	Bacteria, fats, oils, greases, colloids, organic, micro particles
UF	200-150	0.001-1	2-5	Micro porous, asymmetric	150	proteins, pigments, oils, sugar, organic, microplastics
NF	2-20	0.001-0.01	5-15	Tight porous, asymmetric, thin film composite	10-20	pigments, sulfates, divalent cations, divalent anions, lactose, sucrose, sodium chloride
RO	0.2-2	0.0001-0.001	15-75	Semi porous, asymmetric, thin film composite	5-10	All pollutants including monovalent ions

مولکول‌های آلی (به ویژه ماده رنگزا) را دارند و آنها را برای جداسازی مواد رنگزا و نمک‌های معدنی مناسب می‌کند. اخیراً لو و همکارانش تعریفی از غشای NF سست بر اساس تراوایی بالای نمک و کاهش وزن مولکولی بزرگ بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دالتون را ارائه دادند (۲۴). اخیراً، برخی از محققان غشا مفهومی را مطرح کردند که می‌توان از غشای سست با فشار کم برای جداسازی مؤثر مواد رنگزا/نمک استفاده کرد (۲۶، ۲۵). در مقایسه با نانوفیلتراسیون، نانوفیلتراسیون سست یک فرآیند نسبتاً جدید در میان فرآیندهای جداسازی غشایی تحت فشار است. مشابه نانوفیلتراسیون، نانوفیلتراسیون سست یک فرآیند پیچیده فوق‌العاده و بین غشای اسمز معکوس و غشای اولترافیلتراسیون از نظر عملکرد جداسازی آن است (۲۸، ۲۷). با این

از این رو، مطالعه و توسعه غشاهای جداسازی با حذف بیشتر مواد رنگزا و تراوایی بیشتر برای نمک گسترش یافته است. مشابه NF، NF سست (شل)^۱ نوعی غشای تحت فشار است و برای جداسازی نمک‌های معدنی و مولکول‌های آلی با فشار کمتر و شار بیشتر مناسب است. فناوری غشاء NF سست برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ در تصفیه فرآیند آبی اجرا شد (۱۸). از آن زمان، به سرعت و به طور گسترده در تحقیقات دانشگاهی و کاربرد عملی برای جداسازی مواد رنگزا/نمک توسعه یافته است (۲۳-۱۹). به طور کلی، غشاهای NF سست تراوایی نمک معدنی بالا و نگهداری بالایی برای

¹ Loose

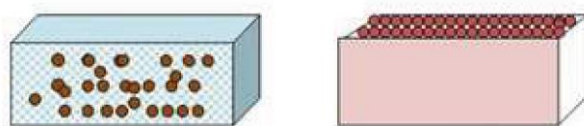
غشاهای پلیمری نانو کامپوزیتی نوع اصلاح شده غشاهای پلیمری با نانو مواد پراکنده در بستر آنها هستند. غشاهای پلیمری نانو کامپوزیتی کاربرد خود را در نانوفیلتراسیون حلال آلی، تبخیر، تصفیه آب، پیل‌های سوختی مستقیم متانل و غیره پیدا کرده است. غشاهای پلیمری نانو کامپوزیتی به دو نوع تقسیم می‌شوند. غشاهای نانو کامپوزیت لایه نازک و غشاهای نانو کامپوزیت ترکیبی قبل از ریخته‌گری پراکنده می‌شوند. در حالی که در لایه نازک غشای نانو کامپوزیتی، نانو ذرات از طریق خودآرایی با روش پوشش غوطه‌وری، لایه نازکی را روی سطح غشا تشکیل می‌دهند یا روی سطح غشا آماده شده با فشار رسوب می‌کنند (شکل ۲) (۳۳).

۴-۲- روش‌های تهیه غشاهای پلیمری

روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی غشاها به کار می‌رود اما مهم‌تر از همه، روش وارونگی فاز است که مهم‌ترین و رایج‌ترین فرآیند برای تهیه غشاها از تعداد زیادی واحدهای سازنده پلیمر است (۳۴).

۴-۲-۱- روش وارونگی فاز

وارونگی فاز به عنوان یک فرآیند اختلاط (جداسازی ناخواسته مواد در یک مخلوط) تعریف می‌شود که در آن محلول پلیمری همگن در حالت مایع به صورت کنترل شده به حالت جامد تبدیل می‌شود. از روش وارونگی فاز برای تهیه غشای نامتقارن با لایه پوستی متراکم و نازک استفاده می‌شود. انتخاب حلال، ترکیب محلول پلیمری، سیستم غیرحلال، شرایط ریخته‌گری فیلم و ترکیب حمام انعقادی برخی از عوامل کلیدی هستند که بر روش وارونگی فاز برای تشکیل غشا تأثیر می‌گذارند. روش وارونگی فاز به چهار نوع مختلف طبقه‌بندی می‌شود: وارونگی فاز غیرحلال^۱ (NIPS)، وارونگی فاز القایی حرارتی^۲ (TIPS)، وارونگی فاز ناشی از تبخیر^۳ (EIPS) و وارونگی فاز ناشی از بخار^۴ (VIPS) (۳۵).



شکل ۲: چپ: غشاهای نانو کامپوزیتی پلیمری مخلوط، راست: نانو کامپوزیتی پلیمری لایه نازک (۳۳).

Figure 2: Left, Mixed polymer nanocomposite membranes, Right, thin layer polymer nanocomposite (33).

¹ Nonsolvent-induced phase separation (NIPS)

² Thermally induced phase separation (TIPS)

³ Evaporation induced phase separation (EIPS)

⁴ Vapor-induced phase separation (VIPS)

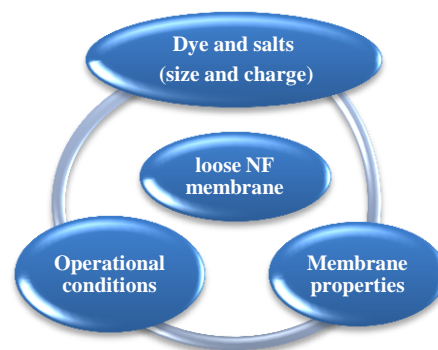
حال، ویژگی منحصر به فرد جداسازی نانوفیلتراسیون سست، جداسازی با بازده بالا بین مواد آلی و نمک است، در حالی که غشاهای نانوفیلتراسیون دفع نسبتاً بالایی برای نمک دارند. اکثر نتایج تحقیقات نشان داد که برهمکنش‌های الکترواستاتیک (اثر دانون) و خروج فضایی بر عملکرد ماندگاری و تراوایی غالب هستند. در این بررسی‌ها، برای درک بهتر سازوکارهای جداسازی نانو فیلتراسیون سست و رویدادهای سطحی که در سطح غشا رخ می‌دهند، از سه جنبه بررسی شد (شکل ۱) که شامل، اندازه روزنه و انواع بار الکتریکی (ماده رنگزا و نمک‌ها)، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی غشاء (ضخامت، آبدوستی، بار و اندازه منافذ) و شرایط عملیاتی (pH، دما و غلظت نمک) (۲۹).

چاپ جوهر افشان دیجیتال، به طور گسترده برای چاپ فایل‌های تصویری کامپیوتری استفاده می‌شود و ماده رنگزای جوهر افشان رنگزای بسیار غلیظ با خلوص بالا و محتوای نمک بسیار کم هستند. یک غشای نانو فیلتراسیون سست تجاری (Sepro NF 2A) برای نمک‌زدایی گونه‌های رنگی مختلف استفاده می‌شود که می‌تواند به اندازه کافی رنگ‌ها را حفظ کند (۳۰).

۴-۲-۱- غشاهای پلیمری و روش‌های تهیه آنها

۴-۱-۱- غشاهای پلیمری

غشاهای پلیمری به دلیل ویژگی‌های ممتازی همچون انعطاف‌پذیری بالا، استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی، گزینش‌پذیری بالا، انتقال انتخابی گونه‌های شیمیایی و غیره کارآمد هستند. مثلاً غشای پلی اتر سولفون (PES) به دلیل پایداری حرارتی، خواص هیدرولیکی و مکانیکی فوق‌العاده به طور گسترده در فرآیندهای مختلف جداسازی استفاده می‌شود [۳۱]. غشای PES می‌تواند ماده رنگزای قرمز کنگو را تا ۹۹/۴ درصد حذف نماید (۳۲).



شکل ۱: طرح‌واره سازوکارها جداسازی غشاهای NF سست (۲۹).

Figure 1: Schematic diagram of the separation mechanisms of loose NF membranes (29).

کیفیت حلال را کاهش می‌دهد) تهیه می‌شود تا اختلاط زدایی و جداسازی فاز ایجاد شود و در نتیجه غشاهای متخلخل آماده شوند. در مقایسه با NIPS، روش TIPS دارای عیوب کمتری است و تنوع در تشکیل ساختارهای منفذی دارد. همچنین دارای استحکام مکانیکی بالاتر، تخلخل بالاتر و ساختار متخلخل یکنواخت‌تری نسبت به غشاهای تهیه شده توسط NIPS هستند (شکل ۴) (۳۵).

۲-۲-۴-۲- جداسازی فاز ناشی از بخار (VIPS) و جداسازی فاز ناشی از تبخیر (EIPS)

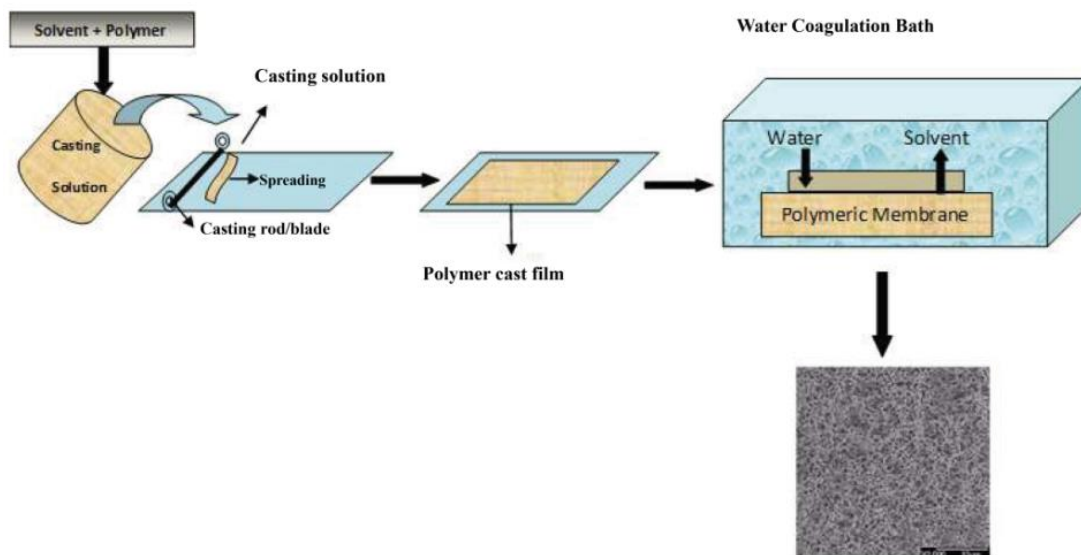
جداسازی فاز ناشی از بخار (VIPS) روش دیگری برای تهیه غشاهای بسیار متخلخل مانند غشاهای میکروفیلتراسیون است. این روش بر اساس قرار گرفتن فیلم ریخته‌گری شده با بخارات اتمسفری غیرحلال (معمولاً آب) در یک محفظه بخار است.

۴-۲-۱-۱- روش وارونگی فاز ناشی از غیرحلال

روش بارش غوطه‌وری یا وارونگی فاز ناشی از غیرحلال (NIPS) معمولاً برای تهیه غشای نامتقارن با ساختار زیر لایه متخلخل و لایه پوسته متراکم استفاده می‌شود. در روش وارونگی فاز القای غیرحلال (NIPS)، محلول پلیمری همگن با حلال مناسب در مخزنی با جنسی مانند نمد تهیه و روی سطح صاف ریخته می‌شود و سپس در حمام انعقادی حاوی غیرحلال به دلیل تبادل حلال و حلال غوطه‌ور می‌شود تا غشای پلیمری را تشکیل دهند (شکل ۳) (۳۳).

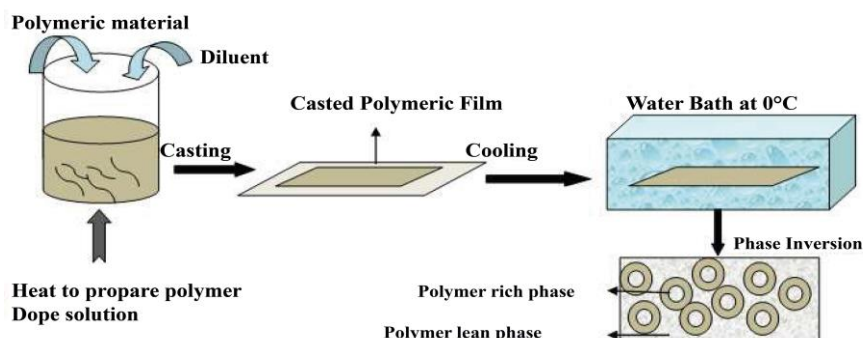
۴-۲-۱-۲- جداسازی فاز القایی حرارتی (TIPS)

روش وارونگی فاز القایی حرارتی برای تهیه غشاهای ریز متخلخل با تخلخل بالا، توزیع اندازه منافذ باریک استفاده می‌شود. اصل روش TIPS مبتنی بر انتقال حرارت است به طوری که محلول پلیمری در دمای بالا با استفاده از رقیق‌کننده و سپس خنک‌کننده (کاهش دما



شکل ۳: مراحل روش وارونگی فاز القای غیرحلال [۳۳].

Figure 3: Steps of non-solvent induced phase separation process [33].



شکل ۴: مراحل روش جداسازی فاز القای حرارتی (TIPS) (۳۳).

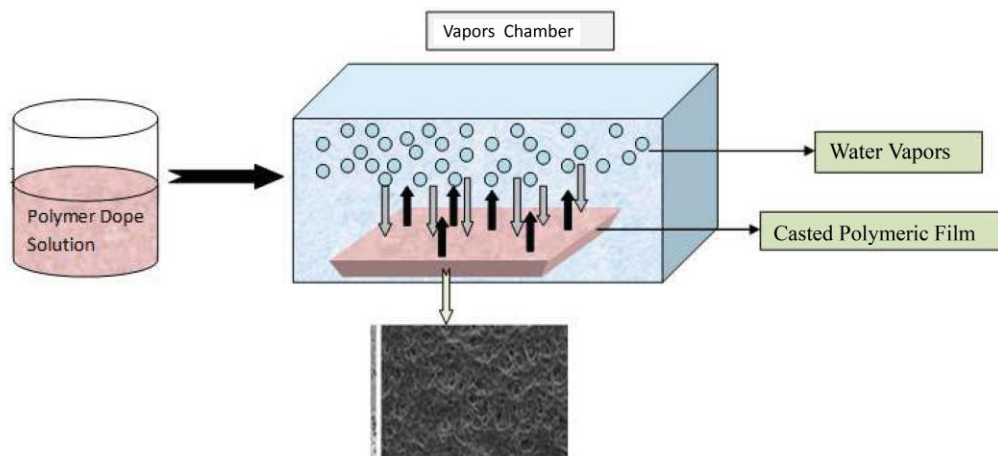
Figure 4: Steps of thermal induction phase separation method (33).

غشای غیرآلی، به طور گسترده برای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۷). از طرفی غشاهای پلیمری یک سری محدودیت‌هایی را دارا می‌باشند. به همین دلیل تلاش‌هایی برای توسعه غشاهای نسل بعدی که دارای تراوایی و گزینش‌پذیری عالی همراه با خواص ضد رسوب قوی و مقاومت در برابر کلر هستند، صورت گرفته است. پیشرفت‌های اخیر در فناوری نانو فرصت استثنایی را برای تقویت غشاء فراهم می‌کند. ثابت شده است که استفاده از نانومواد در سنتز غشاء، مقاومت ضد رسوبی بسیار خوبی را می‌دهد. نانو مواد بر گزینش‌پذیری، تراوایی، استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی، بار سطحی، آب‌دوستی و ویژگی‌های ضدباکتریایی غشاهای پلیمری تأثیر می‌گذارند (شکل ۶) (۳۸).

وارونگی فاز به دلیل ورود بخارهای غیرحلال به فیلم ریخته‌گری پلیمری و خروج حلال از فیلم ریخته‌گری صورت می‌گیرد. انتقال جرم بخارات غیرحلال در مقایسه با حلال به دلیل فراریت کم آن غالب است. به طور مشابه، روش وارونگی فاز ناشی از تبخیر (EIPS) شامل تهیه محلول پلیمری در یک حلال یا مخلوطی از حلال‌ها است (شکل ۵) (۳۶).

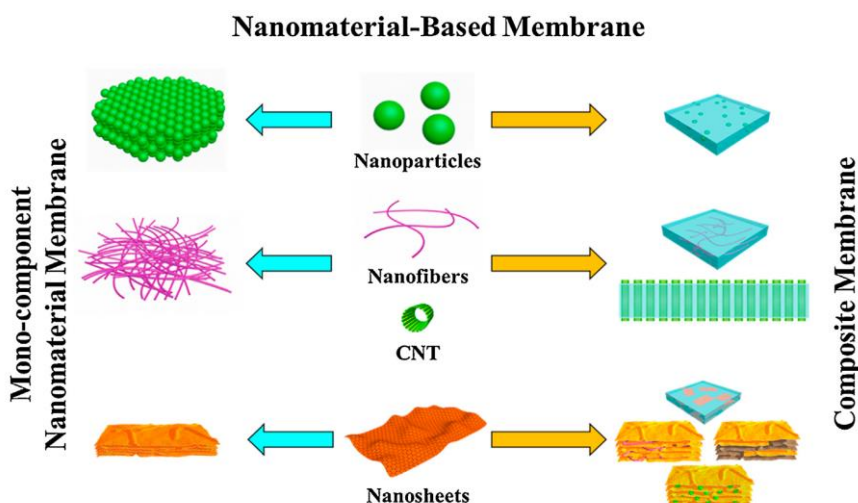
۵- نقش غشاهای پلیمری در حذف مواد رنگزا

فناوری غشا در بخش‌های صنعتی متعددی از جمله پساب‌های صنعتی و تصفیه پساب، غذا، دارو، داروسازی، زیست‌فناوری و مواد شیمیایی به اهمیت بی‌پایانی دست یافته است. در حال حاضر، غشای پلیمری به دلیل سازوکار ایجاد منافذ مستقیم، سهولت نصب و استفاده از آن، انعطاف‌پذیری بالاتر و مقرون‌به‌صرفه بودن نسبت به



شکل ۵: طرح‌واره جداسازی فاز ناشی از بخار (VIPS) (۳۳).

Figure 5: A view of vapour induced phase separation (33).



شکل ۶: غشاهای ساخته شده با نانومواد، مانند غشاهای نانو مواد تک جزئی ساخته شده با ادغام نانو ذرات، نانو الیاف، نانو لوله های کربنی و نانو صفحات و کامپوزیت‌های آنها (۳۸).

Figure 6: Membranes fabricated with nanomaterials, such as mono component nanomaterial membranes fabricated with the integration of nanoparticles, nanofibers, carbon nanotubes, and nanosheets, and their composites (38).

غشای سلولی، مختل کردن زنجیره‌های انتقال الکترون و تخریب پروتئین سلولی و اسید دی اکسی ریبونوکلیک نسبت داد. حالت‌های اکسید شدن متنوع نقره در غشاهای کامپوزیت زیست پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. ادغام nAg در غشاها اساساً قابلیت بهبود خواص ضد رسوب زیستی غشا را ارائه می‌دهد. با این حال، آنها معمولاً در افزایش تراوایی و نسبت دفع غشا مؤثر نیستند (۴۶، ۴۷).

دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) یک ماده با خاصیت کاتالیزوری نوری با سه شکل بلوری مختلف آناتاز، روتیل و بروکیت است. اگر قیمت TiO_2 را نسبت به قیمت سایر نانو مواد دیگر مقایسه کنیم، گران نیستند و TiO_2 پایداری حرارتی و شیمیایی عالی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، دی اکسید تیتانیوم به عنوان یک ماده نانو، تراوایی، مقاومت در برابر دما و خواص ضد رسوب غشاها را افزایش می‌دهد (۴۷).

۵-۱- سازوکارهای غشا نانو کامپوزیت‌های پلیمری برای تصفیه آب

مشخص شده است که جذب، فاز اولیه در سازوکار انتقال آب و در موارد دیگر انتقال املاح از طریق غشاء در مدل انتشار محلول است. این سازوکار تحت تأثیر غشاء و بار مولکول‌ها قرار می‌گیرد. این می‌تواند جاذبه یا دافعه نیروهای بین غشاء و بارهای مولکول را تقویت کند. یکی از سازوکارهای حذف غشاهای نانو کامپوزیتی در تصفیه آب، سازوکار حذف اندازه است. این سازوکار اصلی حذف یون‌های فلزی است، زیرا کامپوزیت غشایی به عنوان یک انسداد فیزیکی عمل می‌کند. از جمله عناصر مهمی که بر سازوکار حذف اندازه حاکم است، اندازه منافذ و اندازه ذرات مواد زائد تحت بررسی است. مدل حذف اندازه یک مدل نگهداری خلاصه شده است که به اندازه فیزیکی یک محصول زائد بستگی دارد. به طور کلی، املاح بزرگ‌تر از اندازه منافذ غشا حفظ می‌شوند. چندین غشا نانو کامپوزیت مورد استفاده برای تصفیه آب حاوی منافذ در مقیاس نانومتری برای دستیابی به گزینش پذیری هستند. معمولاً از اندازه منافذ کوچکی که کمتر از ۱ نانومتر است استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که گزینش پذیری بالایی در غشای متخلخل از طریق سازوکار حذف اندازه حاصل می‌شود. سازوکار دیگری که در استفاده از غشاهای نانو کامپوزیتی برای تصفیه پساب یافت می‌شود، برهم‌کنش الکترواستاتیکی در میان غشا و محلول خارجی است. برای بیشتر غشاهای نانو کامپوزیتی، سازوکارهای بار سطحی در صاف کردن تأثیر دارند. این سازوکارها معمولاً با دفع زیاد یون‌های دو ظرفیتی، دفع کم یون‌های تک ظرفیتی و شار زیاد نشان داده می‌شوند (۴۸).

۵-۲- غشاهای نانوفیلتراسیون کامپوزیت بر پایه پلی سولفون در این بخش غشاهای نانوفیلتراسیون کامپوزیت بر پایه پلی سولفون

در سطح نانو، پیشرفت در نانوکامپوزیت‌های پلیمری توجه را برانگیخته است. آنها به عنوان روش‌های جدید و ارزان برای غشاها در تصفیه آب و جداسازی گاز، حذف جذبی و کشف مواد زائد مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳۹).

سنتز غشاهای نانو کامپوزیتی برای حفظ مزایای غشاهای پلیمری است. این کار به منظور دستیابی به یک نتیجه بسیار پیش‌بینی شده برای پیشرفت غشاء از طریق ادغام مواد مهندسی شده در مقیاس نانو در غشاهای پلیمری انجام می‌شود. علاوه بر این، معایب غشاهای پلیمری برطرف خواهد شد (۴۰). دو رویکرد به طور کلی برای سنتز غشاهای نانو کامپوزیت و لایه نازک نانو کامپوزیت اجرا شده است. اولین رویکرد شامل رسوب مواد مهندسی شده در مقیاس نانو بر روی سطوح غشای پلیمری است. رویکرد دوم شامل سنتز غشاهای نانو کامپوزیت بر مبنای مخلوط از طریق قاب مستقیم مواد نانو مقیاس مهندسی شده در بستر پلیمری است. ترکیبی از این دو رویکرد مورد مطالعه قرار گرفته است (۴۱). با این وجود، به منظور جلوگیری از فرآیندهای پیچیده در طول تهیه غشاهای نانو کامپوزیت چند منظوره منحصر به فرد، پوشش/رسوب و اختلاط هر دو می‌توانند برای دستیابی به انواع گسترده‌ای از غشاها با خواص مختلف که می‌توانند برای استفاده پیش‌بینی شده طراحی شوند، استفاده شوند. رسوب‌دهی فرآیند ایجاد لایه‌ای از مواد مهندسی شده در مقیاس نانو بر روی لایه سطح پویا غشا است تا از طریق تغییر گروه‌های شیمیایی که در سطح دیده می‌شود، آب‌دوستی سطح غشاء کنترل شود (۴۲). چندین ماده مهندسی شده در مقیاس نانو برای ادغام در غشاهای پلیمری برای ایجاد راه‌حل‌های پیشرفته برای کمبود آب با کاهش رسوب، دستیابی به شار عالی و افزایش خواص شیمیایی و فیزیکی غشاء در دسترس هستند. از این رو، چندین نانو مواد می‌توانند به عنوان پرکننده غشاهای نانو کامپوزیت استفاده شوند. نانولوله‌های کربنی خواص حرارتی، الکتریکی و مکانیکی برجسته‌ای دارند (۴۳). آنها می‌توانند خواص فیزیکوشیمیایی یک غشاء را تغییر دهند (۴۴). منافذ داخلی نانولوله‌های کربنی مانند نانو منافذ انتخابی رفتار می‌کنند. از این رو، غشاهای کامپوزیتی نانولوله‌های کربنی تراوایی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند که در مقایسه با انواع دیگر غشاها، فاقد کاهش گزینش پذیری هستند (۴۵).

به منظور کاهش رسوب، انواع مختلفی از نانوذرات در بسترهای غشایی پلیمری ادغام شده‌اند تا آب‌گریزی غشاء، زبری غشا و بهبود خواص سطح را کاهش دهند. ذرات نانو نقره (nAg) مؤثر هستند و به عنوان عوامل ضدباکتری شناخته می‌شوند. nAg می‌تواند به عنوان یک پرکننده نانو در غشاء ادغام شود تا میکروارگانیسم‌ها را در جریان صاف کردن خنثی کند. بنابراین رسوب زیستی غشاء را کاهش می‌دهد. اثرات ضد میکروبی نانو ذرات نقره را می‌توان به توانایی آنها در قطع عملکرد

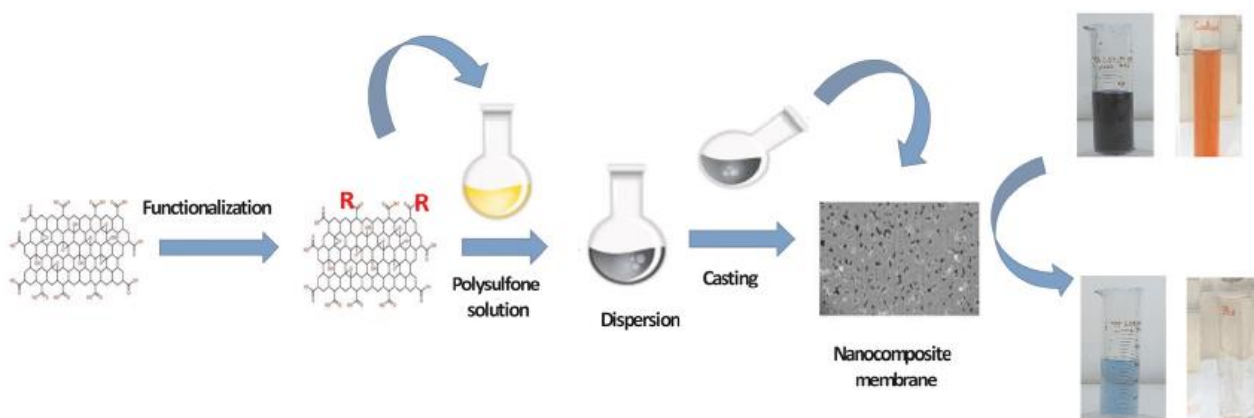
بیشتری نسبت به آنالوگ‌های دست نخورده آنها دارد. عامل‌سازی از طریق پیوند گروه‌های عاملی روی سطح گرافن صورت می‌گیرد. GO قادر به جذب گروه‌های عاملی است. این نتیجه از تخصیص مکان‌های فعال مختلف بر روی سطح آن است. GO به عنوان یک جاذب موثر برای خلاص شدن از شربن‌های فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی مورد بررسی قرار گرفت (۵۷). ترکیبات ناجورحلقه از جمله مواد مناسب برای چنین عامل‌سازی هستند. ترکیبات ناجورحلقه ذوب شده مانند پیرازولو-پیریدین‌ها، پیرانو-پیرازول‌ها و پیرازولو-پیریدین-پیریمیدین‌ها خواص زیستی مناسبی مانند کارایی باکتری‌کشی و قارچ‌کشی را نشان داده‌اند (۵۹، ۵۸). توجه زیادی به توسعه رویکردهای جدید برای سنتز بسیاری از دسته‌های این ناجورحلقه غنی‌شده با نیتروژن معطوف شده است (۶۱، ۶۰). برخی از واکنش‌های چند جزئی برای تهیه پیرازولو-پیریدین-پیریمیدین‌ها به استفاده از آمینوپیرازولیا آمینوپیریمیدین به عنوان مواد اولیه با کاتالیزورهای مختلف بستگی دارد (شکل ۷) (۶۴-۶۲).

بارگذاری f GO بر روی بستر غشا، هم شار آب و هم دفع ماده رنگزا را در فشار نسبتاً کم افزایش داد. رفتار پس‌زنی برای هر دو مواد رنگزای قرمز کنگو و متیلن آبی بالاتر از ۹۹ درصد بود. حضور f-f GO یک فعالیت محیطی امیدوارکننده را نشان داد که به وسیله آن کارایی حذف مواد رنگزای امیدوارکننده‌ای را برای غشا فراهم می‌کند. این کار رویکرد جدیدی را برای تولید یک غشای مرکب جدید با ویژگی بسیار آب‌دوست گسترش و عملکرد بالایی در تصفیه فاضلاب نساجی نشان می‌دهد.

۵-۳- نانو الیاف پلیمری الکتروریسی شده

نانو الیاف پلیمری الکتروریسی شده (EPNFs) به عنوان نانو ساختارهای یک بعدی با نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل بالا، تعداد زیاد مکان‌های جذب و ظرفیت جذب بالا مشخص می‌شوند.

(PSU) و اکسیدگرافن عامل‌دار (f-GO) برای حذف ماده رنگزا از محیط‌های آبی را معرفی می‌کنیم. پیشرفت در طراحی و سنتز غشاهای NF تاثیر فوق‌العاده‌ای در زمینه‌های مختلفی مانند تصفیه آب، جداسازی شیمیایی انتخابی خواهد داشت. غشاهای پلیمری NF معمولی مقاومت شیمیایی محدودی دارند. در ضمن غشاهای سرمایی مقرون‌به‌صرفه نیستند. پلی سولفون (PSU) یکی از مواد غشایی رایج است. این شایستگی را می‌توان با پایداری خوب مکانیکی، حرارتی و شیمیایی آن مرتبط دانست که از آن برای ساخت غشاهای متخلخل از میکروفیلتراسیون (MF) تا NF استفاده می‌شود. PSU خاصیت تشکیل فیلم برتری را نشان می‌دهد (۴۹). PSU در حضور نانوذرات خاک رس برای کاربرد اولترافیلتراسیون مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات فوق، ضد رسوب و بازیابی شار را برای غشاهای آماده شده افزایش دادند (۵۰). اوژنول و اکسید روی به غشای PSU وارد شدند. آنها خواص اولترافیلتراسیون غشا تهیه شده را در کنار خواص ضد رسوب و ضدباکتری آن نیز بهبود بخشیدند (۵۱). گرافن لایه‌ای از اتم‌ها در یک شبکه کربنی دو بعدی لانه زنبوری sp^2 است و دارای ترکیبی از خواص مکانیکی قوی، بی اثری شیمیایی و سطح بسیار بزرگ است (۵۳، ۵۲). غشاهای تهیه شده از گرافن دارنده امتیاز هستند. آنها از نظر شیمیایی مانند غشاهای سرمایی بی‌اثر هستند. علاوه بر این، آنها قادر به تشکیل فیلم با استفاده از پراکندگی فاز سیال گرافن/اکسیدگرافن (GO) مانند پلیمرها هستند. تحقیقات بر روی پیشرفت خواص انتقال غشاهای مبتنی بر گرافن مانند تراوایی بالا و گزینش‌پذیری بالا برای مایعات و گازها تمرکز دارد (۵۵، ۵۴). GO برای افزایش عملکرد غشای اسمز رو به جلو استفاده شد. GO به بهبود خواص غشاهای تبادل آنیونی پیشرفته PSU کمک می‌کند (۵۶). غشاهای نانو الیاف PSU فعالیت ضدباکتریایی قابل‌قبولی را نشان دادند (۵۱). اکسیدگرافن عامل‌دار (f-GO) هنگامی که به پلیمرها وارد می‌شود، پایداری و سازگاری



شکل ۷: نمودار شماتیک مراحل اعمال غشاهای آماده شده در حذف مواد رنگزا از محیط‌های آبی (۶۵).

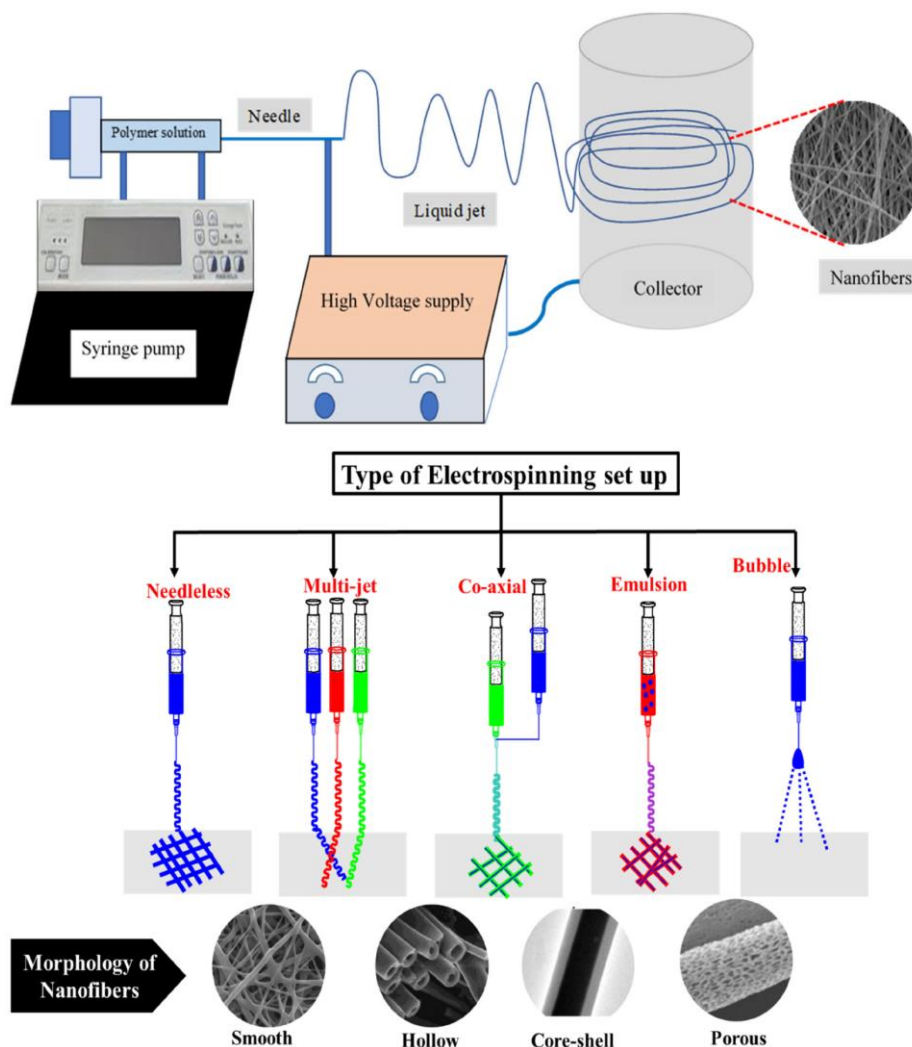
Figure 7: Schematic diagram for applying the prepared membranes in dye removal from aqueous media (65).

۵-۳-۲- نانو الیاف الکترورسی شده در حذف مواد رنگزا
 با توجه به ظرفیت جذب پایین، خواص مکانیکی کم و خواص آب‌گریز هموپلیمرهایی که قابل ریسندگی دارند و نامحلول در آب هستند، از مخلوط پلیمری به عنوان جاذب جایگزین و کارآمد برای حذف مواد رنگزا از یک سیستم آبی استفاده شده است. اختلاط یک پلیمر حاوی گروه‌های عاملی با پلیمر آب‌گریز در نسبت‌های مختلف نقش مهمی در بهبود آب‌دوستی آن و افزایش مکان‌های فعال جذب و همچنین کاهش هزینه دارد. یکی از پلیمرهای قابل ریسندگی و آب‌گریز که خواص مکانیکی خوبی دارد پلی‌اکریلونیتریل (PAN) است. ظرفیت جذب PAN نسبت به جذب مواد رنگزا به دلیل خاصیت آب‌گریز و عدم وجود گروه‌های عامل مؤثر بسیار کم است. بنابراین، بسیاری از مطالعات ثابت کرده‌اند که ترکیب پلیمرهای دیگر با نانو الیاف PAN توانایی آن را در حذف مواد رنگزای مختلف بهبود بخشیده است (شکل ۴).

این ویژگی‌ها آنها را به عنوان یک جاذب مؤثر برای حذف آلاینده‌های آب مانند فلزات سنگین، مواد رنگزا و سایر آلاینده‌ها معرفی می‌کند. استفاده از EPNFs به عنوان جاذب برای حذف مواد رنگزا به دلیل خواص منحصر به فرد، کارایی جذب و قابلیت استفاده مجدد مورد توجه روزافزونی قرار گرفته است. علاوه بر این، کارایی جذب و پایداری EPNFs در محیط‌های آبی را می‌توان از طریق اصلاح سطح آنها بهبود بخشید (۶۶).

۵-۳-۱- ساخت نانو الیاف پلیمری الکترورسی شده

الکترورسی یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در تولید نانو الیاف پلیمری در دو دهه اخیر است. راه‌اندازی این روش ساده است و از چهار بخش اصلی تشکیل شده است: منبع تغذیه با ولتاژ بالا، پمپ سرنگ، اسپینر و کلکتور (شکل ۸).



شکل ۸: طرح‌واره انواع راه‌اندازی الکترورسی و ریخت نانوالیاف (۶۶).

Figure 8: Schematic of types of electrospinning setup and morphology of nanofibers (66).

جدول ۳: نانو الیاف پلیمری الکتروسیسی شده خالص و مخلوط برای حذف مواد رنگزا (۶۶).

Table 3: Pristine and blend electrospun polymer nanofibers as adsorbent for removal of dyes (66).

Adsorbent	Adsorption Conditions					Q _{max} (mg/g)
	Dye	pH	T°C	Dosage (g/L)	Range conc (mg/L)	
PMAA-co-PMMA	MV	6	25	-	5-200	135.37
Nylone-6	AB-117	5.5	25	4	25-400	58.8
Keratin	MB	6	20	1	50-250	170
SPES	MB	6.8	RT	1	6	6.6
PAN/PAMAM	MO	-	30	3.33	-	120.77
PAN/PVDF	BB-41	6	25	0.66	10-40	166.6
polyamide 6	AB-41	-	20	0.1	10	43.9
PPI-N6	AR-252	4	25	0.6	12.5-100	158.73

خاصیت جذب مورد استفاده قرار گرفت. لی و همکارانش نانو الیاف PMMA/زئولیت به عنوان جاذب برای حذف MO ساختند (۷۶). چارچوب‌های فلزی - آلی^۳ دسته‌ای از ترکیبات متشکل از یون‌های فلزی یا خوشه‌هایی است که با لیگندهای آلی کوردینه شده و ساختارهای یک، دو یا سه‌بعدی ایجاد می‌کنند و دسته جدیدی از مواد نانو متخلخل به شمار می‌روند. آنها یک زیرمجموعه از پلیمر کوئوردیناسیونی هستند، با این ویژگی خاص که اغلب متخلخل هستند. اخیراً توجه به ادغام MOFs در مواد پلیمری برای کاربرد در تصفیه آب شده است (۸۰-۷۷). لی و همکارانش نانو الیاف bio-MOF-1/PAN را با موفقیت برای جذب انتخابی متیلن آبی به عنوان مدل ماده رنگزای کاتیونی ساختند (۸۱). آنها دریافتند که ادغام bio-MOF-1 در نانو الیاف PAN منجر به افزایش خواص مکانیکی و آب‌دوستی آن می‌شود. نانو الیاف bio-MOF-1/PAN انتخاب بهتری برای جذب و جداسازی MB از محلول‌های آبی مواد رنگزای مخلوط نشان دادند.

۶- نتیجه‌گیری

غشاهای پلیمری و کامپوزیت‌های آنها می‌توانند نقش مهمی در حذف یا تخریب یون‌ها، مواد رنگزای آلی و فلزات سنگین از محلول‌های آبی را داشته باشند. پیشرفت‌های اخیر در خواص مواد پلیمری و نانو کامپوزیت پلیمری امکان استفاده‌های متعددی را فراهم کرده است. به عنوان مثال، غشاهای پلیمری اخیراً توجه زیادی را برای استفاده از تصفیه فاضلاب به خود جلب کرده است. ترکیبات مختلف نانو ذرات در بسترهای پلیمری مناسب منجر به تشکیل غشاهای پلیمری

به عنوان مثال، هو و همکارانش ترکیبی از PAN/پلی آمیدوآمین (PAMAM) با نسبت مشخصی تولید کرد که منجر به افزایش سطح آن و افزایش ظرفیت جذب آن به سمت حذف ماده رنگزای متیل نارنجی شد. کیتوسان و ترکیبات آن نیز به دلیل وجود گروه‌های آمین در ساختار خود، کارایی حذف خوبی از خود نشان داده‌اند. اخیراً، چندین مطالعه از ترکیب کیتوسان به عنوان ماده موثر برای حذف ماده رنگزا استفاده کرده‌اند. دوتو و همکارانش ترکیبی از نانو الیاف کیتوسان/پلی آمید (CS/PA) را با الکتروسیسی ساخت و از آن به عنوان یک ماده موثر برای حذف پونسو ۴^۱ و راکتیبو سیاه ۵^۲ استفاده کرد (۷۳-۶۷). در جدول ۳ نانو الیاف پلیمری الکتروسیسی شده خالص و مخلوط که برای حذف مواد رنگزا مورد استفاده قرار می‌گیرند آورده شده است.

استفاده از خاک‌های رس در EPNFs می‌تواند موجب بهبود خواص آن شود. خاک‌های رس معدنی مواد طبیعی هستند که از آلومینیم آبدار، منیزیم و سیلیکات آهن ساخته شده و به عنوان جاذب ارزان قیمت برای حذف آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شوند (۷۴). خاک رس به عنوان پرکننده برای بهبود خواص برخی مواد مانند پلیمرها و تهیه غشاهای نانوکامپوزیت استفاده می‌شود. حسینی و همکارانش کامپوزیت‌های جدید نانو الیاف PVA/CS/مونت‌موریلونیت را با استفاده از الکتروسیسی ساخته و به عنوان جاذب برای حذف Basic Blue 41 استفاده کرد (۷۵). آنها به این نتیجه رسیدند که ادغام مونت‌موریلونیت در PVA/CS منجر به افزایش تراوایی و ظرفیت خواص مکانیکی آنها شد. زئولیت همچنین به عنوان پرکننده برای بهبود خواص مکانیکی برخی از نانو الیاف پلیمری و همچنین

¹ Ponceau 4R (P-4R)

² Reactive Black 5 (RB-5)

³ Metal-organic framework

تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه رنگ برای انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی از طرف نویسندگان گزارش نشده است.

نانوکامپوزیتی مختلف با قابلیت‌های متفاوت در غشا می‌کند. در این مقاله انواع غشاهای پلیمری و روش‌های تولید آنها مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که یکی از روش‌های حذف فیزیکی مواد رنگزا استفاده از غشاهای پلیمری است که بر مبنای فیلتراسیون و تفاوت اندازه جداسازی را انجام می‌دهد که با استفاده از مواد گوناگون همچون نانوذرات و چارچوب‌های آلی - فلزی می‌توان خواص غشاهای پلیمری را بهبود بخشید و درصد حذف مواد رنگزا را افزایش داد.

۷- مراجع

- Gupta VK, Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal- a review. *J Environ Manage.* 2009;90(8):2313-42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.
- Pan B, Zhang X, Jiang Z, Li Z, Zhang Q, Chen J. Polymer and polymer-based nanocomposite adsorbents for water treatment in polymeric materials for clean water. Das R, editor. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 105-32. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00743-0_5.
- Uygun A. An overview of oxidative and photooxidative decolorisation treatments of textile wastewaters. *J Soc Dyers Colourists.* 1997;113(6):211-7. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1997.tb01901.x>.
- Oshani F, Allahverdi A. Ceramic membranes and their application in treatment of dye containing wastewaters. *J Studies Color World.* 2018;8(3):71-88. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1397.8.3.7.8> [In Persian].
- hollom M. Treatment and Reuse of Reactive Dye Effluent from Textile Industry Using Membrane Technology [PhD Thesis]. Durban: Durban University of Technology; 2014. <https://doi.org/10.51415/10321/1388>
- Mohammadi T, Esmaelifar A. Wastewater treatment using ultrafiltration at a vegetable oil factory. *Desalination.* 2004;166:329-37. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.087>
- Rodriguze-Mozaz S, Ricart M, Kock-Schulmeyer M, Guasch H, Bonnineau C, Proia L, et al. Pharmaceuticals and pesticides in reclaimed water: Efficiency assessment of micro filtration reverse osmosis (MF-RO) pilot plant. *J Hazard Mater.* 2015;282:165-73. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.015>
- Dittrich J, Gnirss R, Peter-Frohlich A, Sarfert F. Microfiltration of municipal wastewater for disinfection and advanced phosphorus removal. *Water Sci Technol.* 1996;34(3-4):125-31. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00795-0).
- Wang Y, Chen X, Zhang J, Yin J, Wang H. Investigation of microfiltration for treatment of emulsified oily wastewater from the processing of petroleum products. *Desalination.* 2009;249(3):1223-7. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.033>
- Rautenbach R, Linaa T, Eilers L. Treatment of severely contaminated waste water by a combination of RO, high-pressure RO and NF-Potential and limits of the process. *J Membr Sci* 2000;174(2):231-41. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00388-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00388-4)
- Yordanov D. Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Bulg J Agric Sci.* 2010;16:700-41. <https://www.agrojournal.org/16/06-06-10.pdf>
- Ellouze E, Tahri N, Amar RB. Enhancement of textile wastewater treatment process using nanofiltration. *Desalination.* 2012;286:16-23. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.025>
- Petricin I, Korenak J, Povodnik D, Helix-Nielsen C. A feasibility study of ultrafiltration reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry. *J Clean Prod.* 2015;101:292-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.022>
- Salahi A, Badrmezhad R, Abbasi M, Mohammadi T, Rekabdar F. Oily wastewater treatment using a hybrid UF/RO system. *Desalin Water Treat.* 2011;28:75-82. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2204>
- Sun X, Wang C, Li Y, Wang W, Wei J. Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes. *Desalination.* 2015;355:68-74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.018>
- E Ezugbe EO, Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment: A review *Membranes.* 10(5)2020. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Koyuncu I, Topacik D. Effects of operating conditions on the salt rejection of nanofiltration membranes in reactive dye/salt mixtures. *Sep Purif Technol.* 2003;33:283-94. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00088-1)
- Van der Bruggen B, Curcio E, Drioli E. Process intensification in the textile industry: the role of membrane technology. *J Environ Manage.* 2004;73:267-74. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.07.007>
- Lin J, Ye W, Baltaru MC, Tang YP, Bernstein NJ, Gao P, et al. Tight ultrafiltration membranes for enhanced separation of dyes and Na₂SO₄ during textile wastewater treatment. *J Membr Sci* 2016;514:217-28. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.04.057>

20. Lin J, Tang CY, Ye W, Sun SP, Hamdan SH, Volodin A, et al. Unraveling flux behavior of superhydrophilic loose nanofiltration membranes during textile wastewater treatment. *J Membr Sci* 2015;493:690-702. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.018>
21. Samaei SM, Gato-Trinidad S, Altaee A. The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters – A review. *Sep Purif Technol*. 2018;200:198-220. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.041>
22. Zou D, Chen X, Qiu M, Drioli E, Fan Y. Flux-enhanced α -alumina tight ultrafiltration membranes for effective treatment of dye/salt wastewater at high temperatures. *Sep Purif Technol*. 2019;215:143-54. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.063>
23. Tavangar T, Jalali K, AlaeiShahmirzadi MA, Karimi M. Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process. *Sep Purif Technol*. 2019;216:115-25. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.070>
24. Guo S, Wan Y, Chen X, Luo J. Loose nanofiltration membrane custom-tailored for resource recovery. *Chem Eng J*. 2021;409:127376. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127376>
25. Jin P, Chergaoui S, Zheng J, Volodine A, Zhang X, Liu Z, et al. Low-pressure highly permeable polyester loose nanofiltration membranes tailored by natural carbohydrates for effective dye/salt fractionation. *J Hazard Mater*. 2022;421:126716. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126716>
26. Huang L, Li Z, Luo Y, Zhang N, Qi W, Jiang E, et al. Low-pressure loose GO composite membrane intercalated by CNT for effective dye/salt separation. *Sep Purif Technol*. 2021;256:117839. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117839>
27. Mohammad AW, Teow YH, Ang WL, Chung YT, Oatley-Radcliffe DL, Hilal N. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination* 2015;356:226-54. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>
28. Weng RG, Huang X, Liao DQ, Xu S, Peng L, Liu XZ. A novel cellulose/ chitosan composite nanofiltration membrane prepared with piperazine and trimesoyl chloride by interfacial polymerization. *RSC Adv* 2020;10:1309-18. <https://doi.org/10.1039/C9RA09023A>
29. Feng X, Peng D, Zhu J, Wang Y, Zhang Y. Recent advances of loose nanofiltration membranes for dye/salt separation. *Separation and Purification Technology* 2022;285:120228. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120228>
30. Ye W, Lin J, Borrego R, Chen D, Sotto A, Luis P, et al. Advanced desalination of dye/NaCl mixtures by a loose nanofiltration membrane for digital ink-jet printing. *Sep Purif Technol* 2018;197:27-35. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.12.045>
31. Hassan MM, Abudi ZN, Al-Furaiji MH. Polysulfone ultrafiltration membranes embedded with silica nanoparticles for enhanced dye removal performance. *Prog Color Colorants Coat*. 2023. <https://doi.org/10.30509/pccc.2022.167016.1185>
32. Jin P, Chergaoui S, Zheng J, Volodine A, Zhang X, Liu Z, et al. Low-pressure highly permeable polyester loose nanofiltration membranes tailored by natural carbohydrates for effective dye/salt fractionation. *J Hazard Mater*. 2022;421:126716. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126716>
33. Zahid M, Rashid A, Akram S, Rehan ZA, Razzag W. A comprehensive review on polymeric nano-composite membranes for water treatment. *J Membr Sci Technol*. 2018;8:179. <http://dx.doi.org/10.4172/2155-9589.1000179>
34. Karimi S, Yarak MT, Karri RR. A comprehensive review of the adsorption mechanisms and factors influencing the adsorption process from the perspective of bioethanol dehydration. *Renew Sust Energy Rev*. 2019;107:535-53. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.025>
35. Aburabie J, Villalobos LF, Peinemann KV. Composite membrane formation by combination of reaction induced and nanosolvent-induced phase separation. *Macromol Mater Eng*. 2017;302:1700131. <https://doi.org/10.1002/mame.201700131>
36. Menut P, Su Y, Chinpa W, Pochat C, Deratani A. A top surface liquid layer during membrane formation using vapor-induced phase separation (VIPS)-evidence and mechanism of formation. *J Membr Sci*. 2008;310:278-88. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.11.016>
37. Ng LY, Mohammad AW, Leo CP, Hilal N. Polymeric membranes incorporated with metal/metal oxide nanoparticles: A comprehensive review. *Desalination* 2013;308:15-33. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.033>
38. Ying Y, Ying W, Li Q, Meng D, Ren G, Yan R, et al. Recent advances of nanomaterial-based membrane for water purification. *Appl Mater Today* 2017;7:144-58. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.010>
39. Kango S, Kalia S, Celli A, Njuguna J, Habibi Y, Kumar R. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites: A review. *Prog Polym Sci* 2013;38:1232-61. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003>
40. Wang P, Ma J, Shi F, Ma Y, Wang Z, Zhao X. Behaviors and effects of differing dimensional nanomaterials in water filtration membranes through the classical phase inversion process: A review. *Ind Eng Chem Res* 2013;52:10355-63. <https://doi.org/10.1021/ie303289k>
41. Sathish KR, Arthanareeswaran G, Paul D, Kweon JH. Modification methods of polyethersulfone membranes for minimizing fouling-Review. *Membr Water Treat* 2015;6:323-37. <https://doi.org/10.12989/mwt.2015.6.4.323>
42. Sathish KR, Arthanareeswaran G, Paul D, Kweon JH. Modification methods of polyethersulfone membranes for minimizing fouling-Review. *Membr Water Treat* 2015;6:323-37. <https://doi.org/10.12989/mwt.2015.6.4.323>
43. Wu H, Tang B, Wu P. MWNTs/polyester thin film nanocomposite membrane: An approach to overcome the trade off effect between permeability and selectivity. *J Phys Chem C* 2010;114:16395-400. <https://doi.org/10.1021/jp107280m>
44. Brunet L, Lyon DY, Zdrov K, Rouch JC, Caussat B, Serp P, et al. Properties of membranes containing semi-dispersed carbon nanotubes. *Environ Eng Sci*. 2008;25:565-76. <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0076>
45. Kim S, Jinschek JR, Chen H, Sholl DS, Marand E. Scalable fabrication of carbon nanotube/polymer nanocomposite membranes for high flux gas transport. *Nano Lett*. 2007;7:2806-11. <https://doi.org/10.1021/nl071414u>
46. Algailani HM, Al-Nassar SI, Mahmoud AK, Ali AA. Synthesis of bio-nanocomposite coating (silver-multi wall

- carbon nano tubes) by electroless plating method. *Mater Today Proc.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.017>.
47. Marino AFT, Boerrigter M, Faccini M, Chaumette C, Arockiasamy L, Bundschuh J. Photocatalytic activity and synthesis procedures of TiO₂ nanoparticles for potential applications in membranes. In: Figoli Jbahjasae, editor. application of nanotechnology in membranes for water treatment. abingdon: CRC Press; 2017.
 48. Berber MR. Current advances of polymer composites for water treatment and desalination. *J Chem.* 2020;2020:7608423. <https://doi.org/10.1155/2020/7608423>
 49. Yuan HG, Liu TY, Liu YY, Wang XL. A homogeneous polysulfone nanofiltration membrane with excellent chlorine resistance for removal of Na₂SO₄ from brine in chloralkali process. *Desalination* 2016;379:16-23. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.10.006>
 50. Rodrigues R, Mierzwa JC, Vecitis CDJ. Mixed matrix polysulfone/clay nanoparticles ultrafiltration membranes for water treatment. *Water Process Eng* 2019;31:100788. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100788>
 51. Wenten IG, Syaifi YS, Saputra FA, Zunita M, Julian H, Khoiruddin K, et al. Preparation of antibacterial and antifouling PSF/ZnO/eugenol membrane for peat water ultrafiltration. *Water Sci Technol Water Supply* 2019;19:2248-55. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.103>
 52. Allen MJ, Tung VC, Kaner RB. Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chem Rev* 2010;110:132-45. <https://doi.org/10.1021/cr900070d>
 53. McAllister MJ, Li JL, Adamson DH, Schniepp HC, Abdala AA, Liu J, et al. Single Sheet Functionalized Graphene by Oxidation and Thermal Expansion of Graphite. *Chem Mater* 2007;19:4396-404. <https://doi.org/10.1021/cm0630800>
 54. O. Moradi, S. Taghavi, S. Sedaghat, "Synthesis and Characterization of Nanocomposites of Biodegradable Polymers Based on Chitin, Alginate, Sr, SiO₂ and Graphene Oxide Nanoparticles to Remove Some Colored Contaminants", *J. Color Sci. Technol.* 16, 3, 185-195, 2022, <https://doi.org/10.17358/779.1401.16.3.2.8>, [In Persian].
 - Moradi O, Taghavi S, Sedaghat S. Synthesis and Characterization of Nanocomposites of Biodegradable Polymers Based on Chitin, Alginate, Sr, SiO₂ and Graphene Oxide Nanoparticles to Remove Some Colored Contaminants. *J Color Sci Technol.* 2022;16:185-95 <https://doi.org/10.17358/779.1401.16.3.2.8> [In Persian].
 55. Yoon HW, Cho YH, Park HB. Graphene-based membranes: status and prospects. *Trans R Soc A* 2016;374:20150024. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0024>
 56. Hu B, Liu L, Zhao Y, Lü C. A facile construction of quaternized polymer brush-grafted graphene modified polysulfone based composite anion exchange membranes with enhanced performance. *RSC Adv* 2016;6:51057-67. <https://doi.org/10.1039/C6RA06363B>
 57. Wang J, Chen Z, Chen B. Adsorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Graphene and Graphene Oxide Nanosheets. *Environ Sci Technol* 2014;48:4817-25. <https://doi.org/10.1021/es405227u>
 58. El-Sayed AA, Khalil AM, El-Shahat M, Khairaldin NYRSTJ. Antimicrobial activity of PVC-pyrazolone-silver nanocomposites. *Macromol Sci A Pure Appl Chem* 2016;53:346-53. <https://doi.org/10.1080/10601325.2016.1166000>
 59. Nasr MN, Gineinah MM. Pyrido [2, 3-d]pyrimidines and Pyrimido[5', 4':5, 6]pyrido[2, 3-d]pyrimidines as New Antiviral Agents: Synthesis and Biological Activity. *Pharmazie (Weinheim)*. 2002;335:289-95. [https://doi.org/10.1002/1521-4184\(200208\)335:6%3C289::AID-ARDP289%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1521-4184(200208)335:6%3C289::AID-ARDP289%3E3.0.CO;2-Z).
 60. Zidan TA, Abdelhamid AE, Zaki EG. N-Aminorhodanine modified chitosan hydrogel for antibacterial and copper ions removal from aqueous solutions. *Int J Biol Macromol.* 2020;158:32-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.180>
 61. Lygo B, Crosby J, Peterson JA. An enantioselective approach to bis- α -amino acids. *Tetrahedron.* 2001;57:6447-53. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00536-1](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00536-1)
 62. J Quiroga J, Portilla J, Serrano H, Abonia R, Insuasty B, Nogueras M, et al. Regioselective synthesis of fused benzopyrazolo[3,4-b]quinolines under solvent-free conditions. *Tetrahedron Lett.* 2007;48:1987-90. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2007.01.074>
 63. El-Saidi MMT, El-Sayed AA, Pedersen EB, Tantawy MA, Mohamed NR. Synthesis, characterization and docking study of novel pyrimidine derivatives as anticancer agents. *Indones J Chem.* 2020;20:868-79. <https://doi.org/10.22146/ijc.50582>
 64. El-Sayed AA, El-Saidi MMT. Polyvinyl Alcohol Food Packaging System Comprising Green Synthesized Silver Nanoparticles. *Egy J Chem.* 2019;62:315-26. <https://doi.org/10.22146/ijc.55483>
 65. Abdelhamid AE, El-Sayed AA, Khalil AM. Polysulfonenanofiltration membranes enriched with functionalized graphene oxide for dye removal from wastewater. *J Polym Eng* 2020;40:833-41. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2020-0141>
 66. Thamer MB, Aldalbahi A, Moydeen AM, Rahaman M, El-Newehy MH. Modified electrospun polymeric nanofibers and their nanocomposites as nano adsorbents for toxic dye removal from contaminated waters: A review. *Polymers* 2021;13:20. <https://doi.org/10.3390/polym13010020>
 67. Liao Y, Loh CH, Tian M, Wang R, Fane AG. Progress in electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment: Fabrication, modification and applications. *Prog Polym Sci* 2018;77:69-94. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.10.003>
 68. Gezici O, Guven I, Özcan F, Ertul S, Bayrakci M. Humic-makeup approach for simultaneous functionalization of polyacrylonitrile nanofibers during electrospinning process, and dye adsorption study. *Soft Mater.* 2016;14:278-87. <https://doi.org/10.1080/1539445X.2016.1201506>
 69. Gupta A, Sharma V, Mishra PK, Ekielski A. A Review on Polyacrylonitrile as an Effective and Economic Constituent of Adsorbents for Wastewater Treatment. *Molecules* 2022;27:8689. <https://doi.org/10.3390/molecules27248689>
 70. Ali ASM, El-Aassar MR, Hashem FS, Moussa NA. Surface Modified of Cellulose Acetate Electrospun Nanofibers by Polyaniline/ β -cyclodextrin Composite for Removal of Cationic Dye from Aqueous Medium. *Fibers Polym* 2019;20:2057-69. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-9162-y>.
 71. Yasir AT, Benamor A, Hawari AH, Mahmoudi E. Poly (amido amine) dendrimer based membranes for wastewater treatment – A critical review. *Chem Eng Sci* 2023;273:18665. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118665>
 72. Li Z, Sellaoui L, Dotto GL, Ben AL, Bonilla-Petriciolet A, Hanafy H, et al. Interpretation of the adsorption mechanism

- of ReactiveBlack 5 and Ponceau 4R dyes on chitosan/polyamide nanofibers via advanced statistical physics model. *J Mol Liq.* 2019;285:165-70. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.091>
73. Dotto GL, Santos JMN, Tanabe EH, Bertuol DA, Foletto EL, Lima EC, et al. Chitosan/polyamide nanofibers prepared by Forcespinning® technology: A new adsorbent to remove anionic dyes from aqueous solutions. *J Clean Prod.* 2017;144:120-9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.004>.
74. Novikova L, Belchinskaya L. Adsorption of Industrial Pollutants by Natural and Modified Aluminosilicates. In: *Clays, Clay Minerals and Ceramic Materials Based on Clay Minerals.* London: Intech Open; 2016. <https://dx.doi.org/10.5772/61678>
75. Hosseini SA, Vossoughi M, Mahmoodi NM, Sadrzadeh M. Clay-based electrospun nanofibrous membranes for colored wastewater treatment. *Appl Clay Sci.* 2019;168:77-86. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.003>
76. Lim JHX, Goh K, Ng DYF, Jiang X, Chuah CY, Chew JW, et al. Alternating spin-and-spray electrospun scaffold membranes with fractionated MIL-101(Cr) adsorbent for high-performance single-pass dye adsorption process. *Chem Eng J* 2022;450:137963. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137963>
77. Elrasheedy A, Nady N, Bassyouni M, El-Shazly A. Metal Organic Framework Based Polymer Mixed Matrix Membranes: Review on Applications in Water Purification. *Membranes* 2019;9:88. <https://doi.org/10.3390/membranes9070088>
78. Tan Y, Sun Z, Meng H, Han Y, Wu J, Xu J, et al. A new MOFs/polymer hybrid membrane: MIL-68(Al)/PVDF, fabrication and application in high efficient removal of p-nitrophenol and methylene blue. *Sep Purif Technol* 2019;215:217-26. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.008>
79. Zhuang Y, Kong Y, Wang X, Shi B. Novel one step preparation of a 3D alginate based MOF hydrogel for water treatment. *New J Chem* 2019;43:7202-8. 2019. <https://doi.org/10.1039/C8NJ06031B>
80. Sun DT, Peng L, Reeder WS, Moosavi SM, Tiana D, Britt DK, et al. Rapid, Selective Heavy Metal Removal from Water by a Metal-Organic Framework/Polydopamine Composite. *ACS Cent Sci* 2018;4:349-56. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00605>
81. Li T, Liu L, Zhang Z, Han Z. Preparation of nanofibrous metal-organic framework filter for rapid adsorption and selective separation of cationic dye from aqueous solution. *Sep Purif Technol* 2020;237:116360. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116360>

How to cite this article:

Soltani Mohammadi Hafez, Rahmani Z, Shirkavand Hadavand B. Polymeric Membranes and Their Role in the Removal of Dyes. *J Stud color world.* 2023;13(3): 253-267. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.3.2.8> [In Persian].