نقش و اهمیت کاربرد ممبران‌ها در صنعت تصفیه آب

علی عالم، حسین سرپولکی، حسین قصاعی

دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه سرامیک
Ali_alem59@yahoo.com

چکیده: *ممبرانها نقشی کلیدی را در تکنولوژی شیمیایی ایفا مـی نماینـد. ویژگـی مهـم ممبرانهـا، توانایی آنها در کنترل نرخ نفوذ گونه‌های شیمیایی یا اجزاء گازی یا مایع درون مخلوط هنگام عبور از ممبران می‌باشد. به منظور افزایش و بهبود عملکرد ممبرانها در فرآیندهایی چون تصفیه و جداسازی، شناخت کامل و دقیق انواع ممبرانها و همچنین طبقه‌بندیهای موجود لازم و ضروری می باشـد؛ لـذا در این تحقیق به بررسی انواع ممبرانها از لحاظ ساختار فیزیکی، اندازه حفره، جنس و مدول پرداخته شده است. در ادامه نیز شیرین‌سازی آب به عنوان یکی از مهمترین کاربردهای ممبرانهـا در صـنعت تصفیه آب در کنار سایر کاربردها بررسی شده اسـت. در آخـر نیـز دورنمـا و چـشم‌انـدازی از آینـده ممبرانها ترسیم گردیده است.*

لغات کلیدی: *ممبران، تیتانیا، تصفیه آب.*

۱- مقدمه

افزایش بی رویه جمعیت از مهمترین مشکلات فزاینده در قرن بیست و یکم می باشد، آمارها حاکی از آنـست که جمعیت تا سال ۲۱۵۰ با دو برابر افزایش، از مرز ۱۱/۵ میلیارد نفر خواهد گذشت. چنـین انفجـار جمعیتـی، بروز مسائلی از قبیل سوء تغذیه، قحطی، آلودگی، بیماریهای واگیردار، خشکسالی و بحران‌ها را اجتناب ناپـذیر خواهد نمود. در این میان آب نقش کلیدی را در نجات انسان بازی می کند؛ لذا آبیاری، نمک زدایی یا شیرین کردن آب و فیلتراسیون آن مهمترین فن آوریهای هزاره سوم محسوب می گردند. سرامیک‌ها نیـز بـا عنایـت به فراوانی اکسیدها در طبیعت، در زمره مواد کلیدی و استراتژیک در این زمینه محسوب می شوند[۱].

امروزه بسیاری از سیستم های تصفیه آب و تکنیکهای تصفیه، به طور وسیعی گسترش یافته اند تـا قـادر بـه تولید آب سالم باشند؛ اما این تکنیکهای مختلف تصفیه آب چگونه با یکدیگر مقایسه می شوند و کـارایی هـر کدام چیست؟

۲- تاریخچه تولید و گسترش ممبران‌ها

مطالعه منظم ممبران‌ها، به زمان دانشمندان قرن ۱۸ باز می گـردد. Abbe Nolet لغـت osmosis را بـرای توصیف نفوذ آب از درون یک دیافراگم، در سال ۱۷۴۸ ابداع نمود. درقرن نـوزدهم و ابتـدای قـرن بیـستم، ممبران‌ها هیچ کاربرد صنعتی و تجـاری نداشـتند و تنهـا بـرای پیـشرفت تئوریهـای فیزیکـی- شـیمیایی در آزمایشگاهها به کار گرفته می شدند و فروش سالیانه آنها برای تمامی کاربردهای صنعتی از ۲۰ میلیـون دلار تجاوز نمی کرد. این ممبرانها دارای چهار مـشکل بودنـد کـه مـانع از مـصرف گـسترده آنهـا در کاربردهـای جداسازی می شد؛ غیرقابل اعتماد بودن، عملکرد کند، قدرت انتخابی خیلی کم و هزینه تمام شده بالا[۲].

بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ تحولی اساسی در وضعیت تکنولوژی ممبران ایجاد نمود. در سال ۱۹۶۰ ممبران به عنوان ابزاری کار آمد برای تصفیه آب مطرح گردید. کمبود روز افـزون منـابع آب قابـل شـرب، منجـر بـه حرکت به سوی نوع دیگری از منابع آبی مانند اقیانوس‌ها گردید و سال ۱۹۷۰ آغاز به کارگیری ممبران‌هـای جدید برای مصارف شیرین سازی آب بود[۳].

در طول سال‌ها، استانداردهای تصفیه سخت تر و دقیق تر گردید و به دنبال آن کاربردهـای متنـوع و زیـادی

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

برای ممبران‌ها بوجود آمد. راه حلهای مربوط به مشکلات به کارگیری ممبران‌ها در طی روند توسعه تکنولوژی ممبران، گسترش یافت و در حال حاضر فرایندهای جداسازی بر پایه ممبران‌ها به فرایندهایی معمولی و همه جایی مبدل گشته است. لازم به ذکر است که گسترش و پیشرفت بسیار سریع ممبران‌ها بیانگر تکمیل تحقیقات پیرامون آن نبوده و در حال حاضر برای بهبود کار آمدی و کارایی ممبرانها تلاش‌های زیادی در حال انجام است[۳].

۳- فرایند تصفیه و شیرین سازی آب

به منظور شناخت و بررسی روش‌های تصفیه آب، ابتدا لازم است آلودگی‌های موجود در آن را بشناسیم. به دلیل متنوع بودن انواع این آلودگی‌ها در اینجا فقط به ذکر مهمترین آنها پرداخته و از توضیح آنها صرف نظر می‌نمائیم. این آلودگی‌ها عبارتند از: مواد بیماریزای میکروبی، آلودگیهای آلی فرار، آلودگیهای آلی مصنوعی، تری هالومتان‌ها، رادیواکتیو، سولفور، کلریدها، سرب و مس، آنتیموان، فلوراید، نیترات، آرسنیک، پنبهٔ نسوز، عوامل سختی، گل آلودگی، رنگ.

٤- روشهای متداول تصفیه آب

هر فرایند و روشی که باعث تغییر ترکیب شیمیایی و رفتار طبیعی منبع آبی گردد تحت عنوان تصفیه آب تعریف می گردد[۴]. روشهای تصفیه می توانند به صورت زیر تقسیم شوند: تصفیه فیزیکی و شیمیایی و زیستی(بیولوژیکی). در اینجا تنها انواع هر دسته را نام برده می شود. انواع روش‌های تصفیه فیزیکی عبارتند از: غربال کردن، فیلتراسیون ماسه ای، فیلتراسیون کارتریجی، فیلتراسیون توسط آلومینای فعال شده، فیلتراسیون توسط کربن فعال شده و فیلتراسیون توسط ممبران‌ها.

انواع روش‌های تصفیه شیمیایی عبارتند از: انعقاد و فیلتراسیون، تعویض یونی، کاهش سختی(نرم سازی) توسط آهک، گندزدایی، تقطیر، دمش هوا، تنظیم pH.

انواع روش‌های تصفیه زیستی آب عبارتند از: تصفیه هوازی و تصفیه بی هوازی.

٥- معرفی و طبقه بندی ممبرانها

امروزه ممبران‌ها جایگاه مهمی را در تکنولوژی شیمیایی بدست آورده اند به گونه ای که در محدوده وسیعی از کاربردها، به کار گرفته می شوند. ویژگی کلیدی و مهم ممبران‌ها، توانایی آنها در کنترل سرعت نفوذ گونه‌های شیمیایی، هنگام عبور می باشد. ممبران‌ها از طریق فراهم ساختن سطح مخصوص بالا، می توانند در فرایندهای کاتالیستی به کار گرفته شوند و انجام فرایندهایی مانند واکنش شیمیایی و دیفوزیون را مهیا سازند[۵]. در دهه های اخیر فرآیندهای متعددی از جداسازی به کمک ممبران‌ها توسعه یافته است. تفاوت بین آنها در نوع و شکل ممبران، مکانیزم انتقال اجزاء گوناگون محلول در فاز مایع از ممبران، نوع نیروی محرکه و مابقی خصوصیات فرآیند می باشد. در حالیکه برخی از فرایندها به طور کامل در مقیاس صنعتی به کار می‌روند؛ برخی دیگر در حال آزمایش، توسعه یا انتقال از مرحله توسعه به کاربرد صنعتی می باشند[۶].

٦- تکنولوژی ممبران‌ها

تکنولوژی ممبران به عنوان یک انتخاب مناسب برای حل مشکلات سیستم‌های تصفیه آب، مطرح می‌باشد. در یک فرایند فیلتراسیون که توسط ممبرانها صورت پذیرد، هدف، عبور و نفوذ آزادانه یک جزء مخلوط، از ممبران و ممانعت از نفوذ سایر اجزاء از آن می باشد. تمامی ذرات بزرگتر از بزرگترین حفره های ممبران، به طور کامل توسط ممبران متوقف می شوند. ذرات کوچکتر از بزرگترین حفره ها و بزرگتر از کوچکترین

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

حفره‌ها وابسته به توزیع اندازه حفره های ممبران، به طور جزئی پس زده می شوند. در آخر نیز ذراتی کـه بـه طور محسوسی کوچکتر از کوچکترین حفره ها می باشند از درون ممبران عبور می کنند. بخش عبور کرده از درون حفرات ممبران، در سمت دیگر ممبران تحت عملیات بعدی قرار خواهد گرفت. انتخاب یک ممبران بـه منظور تصفیه آب قابل شرب، توسط چندین پارامتر تعیین می‌گردد که این فاکتورهـا شـامل وزن مولکـولی و نوع موادی که می بایست حذف گردند، خواص و ویژگیهای کیفی منبع آب مصرفی، کیفیـت لازم بـرای آب تصفیه شده، اندازهٔ حفره‌های ممبران، ترکیـب شـیمیایی ممبـران، دمـا، فـشار و پیکربنـدی سیـستم تـصفیه می‌باشد. از لحاظ اقتصادی، این تکنولوژی می‌تواند در مقایسه بـا اکثـر فرآینـدهای مرسـوم تـصفیه، جایگـاه مناسبی داشته باشد.

شناخته شده ترین و پرمصرف ترین انواع ممبران‌ها در صنایع تصفیه آب و فاضـلاب، آنهـایی هـستند کـه از گردایان فـشار بـه عنـوان نیـروی محرکـه فرآینـد اسـتفاده مـی‌کننـد؛ ایـن دسـته شـامل اسـمز معکـوس، نانوفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون می باشد که در ادامه به طور مفصل بررسی می‌گردد.

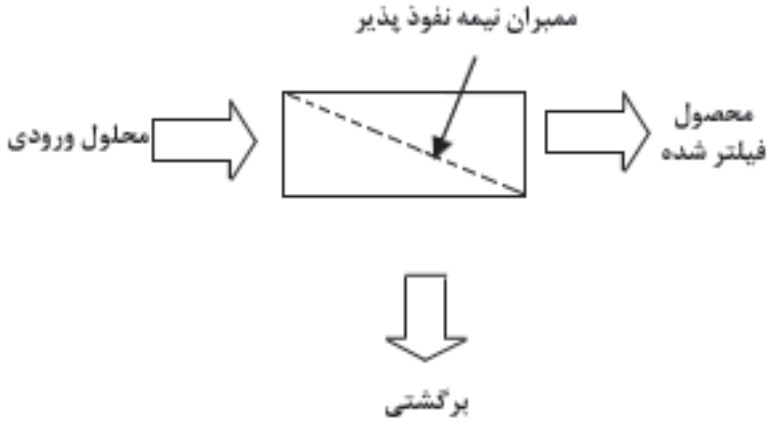
یک شمای کلی از فرایند و عملکرد ممبران در شکل ۱ نشان داده شده است. بخشی از محلول ورودی کـه از ممبران عبور می کند؛ محصول نفوذ کرده[1] یا فیلترشده[2] نامیده می شود و بخش عبور نکرده محلول تغذیـه، به تغلیظ شده[3] یا برگشتی[4] ملقب می باشد.

۷- انواع گرادیان‌های مصرفی توسط ممبران‌ها

فرایندهای جداسازی از طریق ممبران‌ها، بر اساس معیارهای مختلفی طبقه بندی و دسته بنـدی مـی گـردد. یک تفاوت پایه بین این روش‌ها، نوع نیروی محرکه مصرفی به منظور تصفیه یـا تغلـیظ محلـول اسـت کـه می‌تواند انواع گرادیان فشار، گرادیان غلظت، گرادیان پتانسیل الکتریکی یا گرادیان دما باشد. در برخی مـوارد، مخصوصا در برخی فرایندهای در حال توسعه، بیشتر از یک نوع نیرو محرکه به کار گرفته می شود[۶].

۸- انواع ممبرانها

ممبران‌ها از چند لحاظ تقسیم بندی می گردند. انواع این تقسیم بندیها بر مبنای ترکیـب شـیمیایی و سـاختار فیزیکی، اندازه حفره ممبران، جنس و مـدول ممبـران مـی باشـد کـه در ادامـه بـه بررسـی تـک تـک آنهـا می‌پردازیم.



شکل ۱- فرایند ممبرانی به صورت شماتیک[۶]

[1] permeate
[2] filtrate
[3] concentrate
[4] reject

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

۸-۱-انواع ممبران‌ها از لحاظ ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی

ممبران‌ها به طور کلی به دو دسته ایزوتروپ و غیرایزوتروپ تقسیم می شوند. ممبرانهای ایزوتروپ از لحاظ ترکیب شیمیایی و فیزیکی در طول سطح مقطع خود یکسان می باشند؛ در حالیکه ممبرانهای غیرایزوتروپ در طول سطح مقطع خود یکنواخت نبوده و شامل لایه هایی هستند که از لحاظ ساختار و یا ترکیب شیمیایی با یکدیگر متفاوت می باشند[۳].

۸-۲-انواع ممبران‌ها از لحاظ اندازه حفره

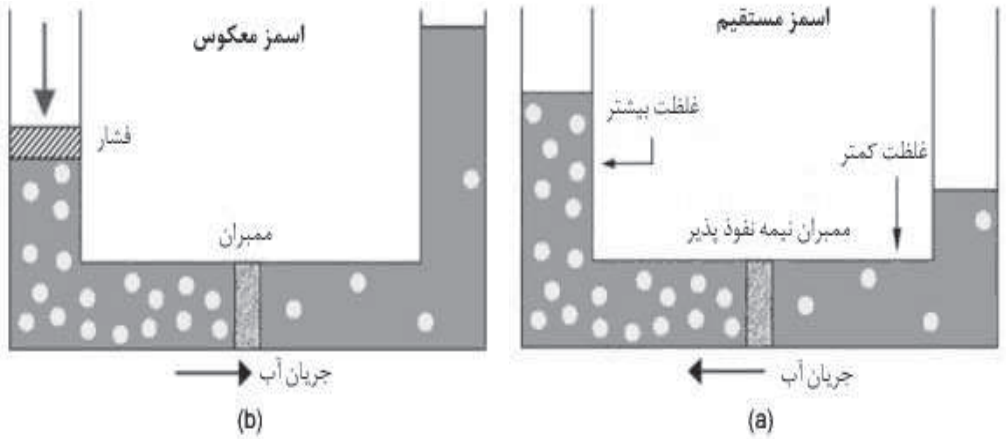
۸-۲-۱- اسمز معکوس

تکنیک اسمز معکوس در مقابل اسمز مستقیم به کار می رود. در اسمز مستقیم، هنگامی که دو محلول با غلظتهای مختلف توسط یک ممبران نیمه تراوا از یکدیگر جدا گردند به گونه ای که امکان عبور حلال از ممبران وجود داشته باشد در حالیکه اجزاء حل شده قادر به عبور از آن نباشد یک انتقال خود به خودی (نفوذ) حلال رخ خواهد داد. حلال که معمولا آب می باشد از سمت با غلظت کمتر به سمت با غلظت بیشتر حرکت خواهد کرد (شکل a-۲).

فرایند اسمزی می تواند معکوس گردد. اعمال فشار به یک محلول غلیظ تر باعث نفوذ حلال، از ممبران نیمه تراوا و قرارگیری آن در محلولهای با غلظت کمتر خواهد شد(شکل b-۲). اصطلاح اسمز معکوس به جداسازی یونهای حل شده و مولکولهای کوچک که باعث آلوده شدن آب می گردند، اختصاص دارد[۶].

در اسمز معکوس فشاری بیشتر از فشار اسمزی(۵ تا ۱۰ Mpa) به محلول ورودی و غلیظ تر اعمال می گردد تا شاهد جریان حلال از قسمت غلیظ تر به قسمت رقیق تر باشیم. اندازۀ اندک حفره‌ها در این نوع ممبرانها، مسدود شدن آنها را نسبت به انواع دیگر محتمل‌تر می‌سازد. اگر چه پیشرفتهای اخیر در تکنولوژی ممبران، منجر به گسترش ممبرانهایی شده است که در فشارهای کمتری کار می‌کنند. به کارگیری ممبرانهای با فشار کمتر، به معنی ذخیرۀ انرژی الکتریکی و کاهش هزینه می باشد[۶].

اسمز معکوس در صنعت به منظور تهیه آب قابل شرب از آبهای شور و نمکی به کار می رود و به طور روز افزونی در تصفیه فاضلابها به کارگرفته می شود. به طورکلی سیستم اسمز معکوس با سایر فرایند های جداسازی که برای حذف تمامی آلودگیهای آب به کار می‌روند(مانند تقطیر) رقابت می نماید.



شکل ۲- a) اسمز مستقیم[۷] b) اسمز معکوس[۷]

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

توانایی حذف آلودگی توسط ممبران اسمز معکوس بسیار وسیع بوده و شامل موارد زیر می‌باشد:

- حذف مینرال‌ها و فلزات حل شده
- حذف یونهای منفرد حل شده و عوامل مسبب سختی
- حذف ویروس‌ها، باکتری‌ها و pyrogenها تا سقف ٪۹۹/۹
- حذف نمک‌ها، مواد قندی، پروتئین‌ها، فلزات سنگین و فلزات رادیواکتیو
- حذف پنبه نسوز، انواع مزه ها، رنگ، ترکیبات شیمیای ایجاد کننده بو، ذرات، جامدات حل شده و گل و لای

۸-۲-۲- نانوفیلتراسیون

نانوفیلتراسیون نیز یک فرایند جداسازی به کمک ممبران می باشد که از ممبران‌های نازک و متخلخل با اندازه حفره در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵ میکرون بهره می جوید. فشار اعمالی بر جریان محلول در این تکنیک، در محدوده ۰/۳ تا MPa ۴ می باشد. به دلیل بزرگتر شدن اندازه حفره ها در ممبرانهای نانوفیلتراسیون، این ممبرانها توانایی کار کردن در فشارهای پایین‌تری نسبت به ممبرانهای اسمز معکوس داشته که این به معنی هزینهٔ کمتر عملیات و نگهداری این ممبرانها می‌باشد.

محدوده ابعاد حفره های تکنیک مذکور، به گونه ای عمل می نماید که یونهای تک ظرفیتی می توانند از ممبران عبور نمایند، در حالیکه یونهای چند ظرفیتی که دارای ابعاد بزرگتری نسبت به نوع تک ظرفیتی هستند، اجازه عبور نخواهند داشت. ناشی از پدیده مذکور، این ممبرانها را به عنوان ممبران حذف کننده مینرالها یا نرم کننده آب نیز می نامند. قابلیت این ممبرانها در حذف نمکهای آلی بی همتاست. حذف ترکیبات آلی حل شده و تفکیک نمودن مواد آلی با وزن مولکولی کم و زیاد از دیگر تواناییهای این ممبرانها می باشد.

۸-۲-۳- اولترافیلتراسیون

ممبران اولترافیلتراسیون، به طور قابل ملاحظه ای متخلخل تر از دو نوع دیگر است. محدوده اندازه حفره این ممبرانها بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۱ میکرون می باشد. وجود تخلخلهای با اندازه بزرگتر در این ممبرانها، فلاکس بیشتر جریان و در عین حال فشار ورودی کمتری را سبب می گردد(فشار ۰/۲- Mpa ۱/۴).

ناشی از اندازه بزرگتر حفره های ممبران، این تکنیک قادر به حذف یونها نبوده و اغلب گونه های قابل حل مانند نمکهای معدنی از درون ممبران عبور خواهند نمود. در این روش، کلوئیدها، جامدهای معلق، میکروارگانیسم ها، مولکولهای آلی با وزن مولکولی بالا و پروتئینها از درون ممبران عبور نخواهند کرد و در درون جریان برگشتی باقی خواهند ماند. یکی از کاربردهای مهم این ممبرانها حذف کلوئیدها و سایر ذرات موجود در محلول ورودی به منظور جلوگیری از انسداد ممبران اسمز معکوس می باشد که در ادامه مسیر نصب شده است.

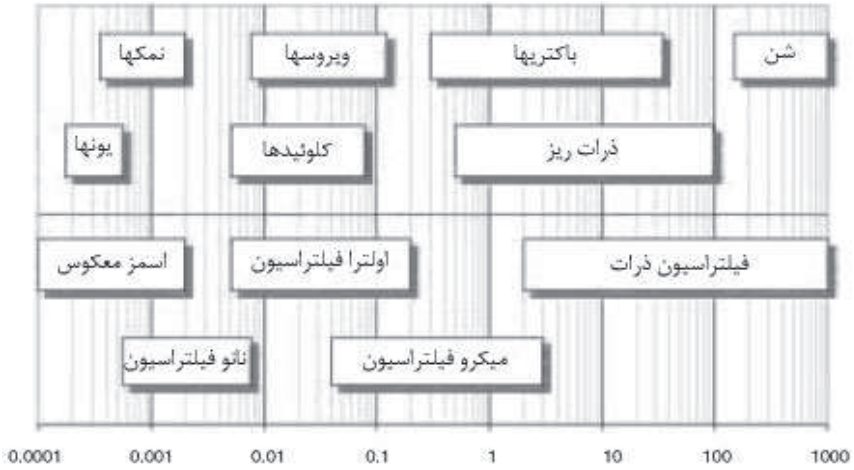
۸-۲-٤- میکروفیلتراسیون

ممبران‌های میکروفیلتراسیون دارای بزرگترین اندازه حفره در بین سایرین می باشند. ابعاد حفره ها در ممبران‌های میکروفیلتراسیون بین ۰/۰۵ تا ۵ میکرون می باشد و در فشاری بالاتر از Mpa ۰/۱ کار می‌کنند. این ممبران‌ها از عبور آلودگی‌های درشتی مانند ذرات معلق ریز، باکتریها و انواع متنوعی از میکروارگانیسم‌ها (بزرگتر از µm ۰/۱) جلوگیری می نمایند. لازم به ذکر است که کلوئیدها توسط ممبران‌های میکروفیلتراسیون حذف نخواهند شد؛ زیرا میانگین اندازه حفره این ممبران‌ها بزرگتر از محدوده اندازه کلوئیدها می‌باشد. ابعاد بزرگ حفره ها، سرعت فلاکس بالایی را ایجاد خواهد نمود. تکنیک مذکور در صنعت

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

کاربردهایی چون حذف مواد ذره ای، تصفیه آب قابل شرب و تصفیه فاضلابهای محلی را دارا می باشد[۴و۶]. در شکل زیر، ممبرانهای با گرادیان فشار با محدوده آلودگیهایی که قادر به حذف آنها هستند، ارائه شده است:



شکل ۳- محدوده اندازه حفره ممبرانهای با گرادیان فشار به همراه آلودگیهایی که در حذف آنها موثرند (اعداد بر حسب میکرون بیان شده اند)[۶]

لازم به ذکر است که استانداردهای طبقهبندی ممبرانها در بین سازندگان آنها متفاوت میباشد. به طور مثال، یک سازنده ممکن است یک ممبران را در دستهٔ نانوفیلتراسیون قرار دهد در حالیکه یک سازنده دیگر، ممبرانی مشابه آنرا در دستهٔ اولترافیلتراسیون جای دهد. همچنین برخی از سازندگان، به اندازهٔ میانگین حفرات اشاره میکنند ولی برخی دیگر به اندازهٔ حفرهٔ ماکزیمم. با توجه به دلایل مذکور، سیستمهای تصفیه آب باید از کافی و مناسب بودن سایز حفرهٔ گزارش شده مطمئن گردند و همچنین وزن مولکولی حذف شونده[5] و فشار لازم اعمالی را مشخص سازند.

۸-۳- انواع ممبرانها از لحاظ جنس

۸-۳-۱- ممبرانهای پلیمری(آلی)

این ممبرانها بر مبنای ساختار فیزیکی خود به سه دسته هموژن(متقارن)، غیرهموژن(نامتقارن) و کامپوزیتی تقسیم می شوند[۶]. برخی از معایب اصلی ممبرانهای پلیمری عبارتند از: محدوده باریک دمای مجاز، مقاومت اندک در برابر حمله شیمیایی، محدوده باریک pH مجاز، استحکام مکانیکی کم، رخداد تجزیه زیستی، کمی عمر مفید.

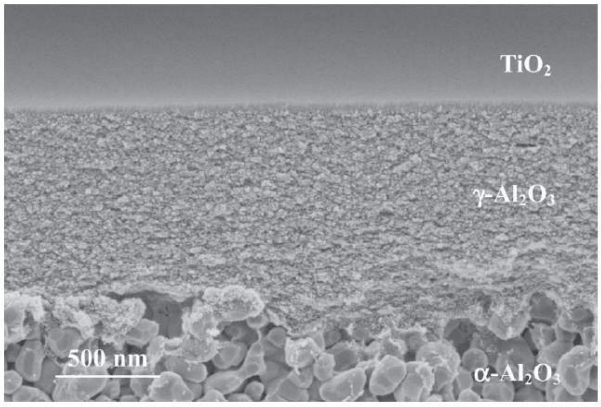
۸-۳-۲- ممبرانهای غیرآلی

ممبرانهای غیرآلی از موادی مانند سرامیکها، فلزات، گرافیت یا ترکیب آنها ساخته میشوند ولی در این تحقیق منظور از ممبرانهای غیرآلی، انواع سرامیکی می باشد و تمرکز تنها بر روی همین دسته خواهد بود. هدف از ساخت ممبرانهای سرامیکی کاهش و یا حذف برخی محدودیتهای انواع پلیمری می باشد. این ممبرانها در شرایط سخت به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند؛ جاییکه ممبرانهای پلیمری عملکرد مطلوبی نداشته و یا قادر به انجام فرایند نخواهند بود. اکسیدهای فلزی (آلومینا، زیرکونیا، تیتانیا، ...) متداولترین مواد سرامیکی مصرفی برای ساخت این ممبرانها هستند و از پایه های معمول می توان از آلومینا و کاربید سیلیسیوم و ... نام برد. این پایه ها نه تنها حداکثر نفوذپذیری ممبران را تامین می سازند بلکه پایداری مکانیکی ممبران را نیز به مقدار زیادی افزایش می دهند. شکل ۴ اشاره ای به یک مثال در این زمینه می باشد.

[5] Molecular Weight Cut Off

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]



شکل ۴- مقطع عرضی ممبران شامل لایه آمورف TiO_2 در سطح، لایه میانی γ-Al_2O_3 و پایه α-Al_2O_3 [6]

ممبران‌های سرامیکی، استحکام مکانیکی بالا و همچنین مقاومت به سایش بالاتری را از خود نشان می‌دهند و همچنین در اثر فشرده شدن ساختار تحت فشارهای اعمالی و گذشت زمان تجزیه نخواهند شد؛ به همین دلیل دوام و ایمنی ممبران‌های سرامیکی، از انواع پلیمری بیشتر می باشد. این ممبران‌ها از لحاظ حرارتی پایدارند و توانایی کار در دماهای بالا را دارا هستند؛ به طوریکه بسیاری از ممبران‌های سرامیکی در دمای بالاتر از $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ نیز قابل مصرف هستند. مقاومت ممبران‌های سرامیکی در مقابل عوامل شیمیایی و تشعشع به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از انواع پلیمری می باشد و این ممبران‌ها در مقابل عوامل زیستی خنثی می‌باشند؛ به همین دلیل این ممبران‌ها در بسیاری از کاربردهای شیمیایی، دارویی و فرایند تصفیه آبها و پسابها به عنوان انتخاب اول مطرح می باشند. ناشی از تفاوتهای مذکور، آسیب دیدگی کمتر ممبران و در نتیجه اطمینان بیشتر از محصول تولیدی و همچنین هزینه کمتر عملیات، از اثرات به کارگیری ممبرانهای سرامیکی خواهد بود. از معایب عمده و اساسی این ممبرانها، نیز می توان به وزن زیاد آنها و هزینه ساخت بالاتر آنها در مقایسه با ممبران‌های پلیمری اشاره نمود؛ اگرچه مورد آخر توسط طول عمر بالای ممبران جبران می گردد. امروزه ممبران‌های سرامیکی به طور روز افزونی در کاربردهای جداسازی به خدمت گرفته می‌شوند. تکنولوژی ساخت این ممبران‌ها با معرفی مواد سرامیکی نانوساختار، دچار تحول و پیشرفت بزرگی شده است. تکنیک‌های زیادی برای تولید مواد نانوساختار و ساخت لایه های سطحی انتخابی وجود دارد که همگی بر فرایند سل- ژل استوار بوده و بیشترین مواد مصرفی در تولید لایه های نانوساختار موادی چون Al_2O_3، ZrO_2، CeO_2 و TiO_2 می باشند.

۸-٤- انواع ممبران‌ها از لحاظ مدول

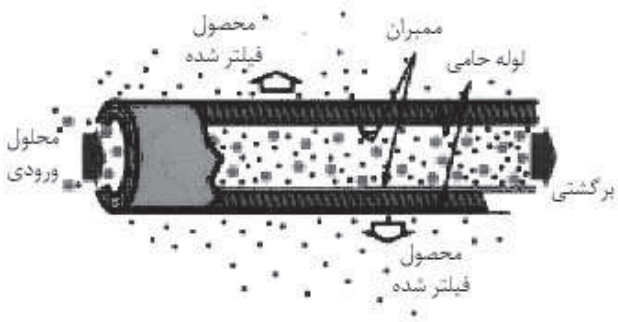
۸-٤-۱- ممبران‌های لوله ای(Tubular Membrane)

طراحی این ممبران‌ها بسیار ساده می باشد به گونه ای که ممبران مورد نظر یا در درون یک لوله متخلخل قرار می گیرد و یا بر روی سطح داخلی لوله پوشش داده می شود و محلول به درون لوله پمپ می گردد. لوله مصرفی باید فشارهای مورد نیاز در حین کار را تحمل نماید. مایع تغذیه از یک طرف لوله وارد شده و همزمان با جریان رو به جلوی آن در درون لوله، بخشی از آن به صورت عرضی نفوذ خواهد نمود. قسمت نفوذ کرده که همان محصول مورد نظر می باشد در پوسته بیرونی لوله جمع آوری می گردد. شکل ۵ نشان دهنده یک تصویر شماتیک از ممبران‌های لوله ای شکل می باشد.

از مزایای اصلی ممبرانهای لوله ای شکل، امکان حرکت سریع مایع ورودی بر روی سطح ممبران می‌باشد (به گونه ای که این حرکت می تواند سرعتی بالغ بر ۱۰ m/s داشته باشد) که باعث کاهش احتمال انسداد سطح ممبران خواهد شد. از کاربردهای اساسی این ممبرانها تصفیه محلولهای با درصد بالای ذرات جامد معلق می باشد زیرا این ممبران‌ها برای ذرات جامد معلق از تلورانس بالایی برخوردار هستند.[۶].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]



شکل ۵- نمای شماتیک ممبران لوله ای شکل[۶]

۸-٤-۲- ممبران‌های مارپیچی(Spirally Wound Membrane):

در این ممبران‌ها یک ورقه مسطح که می تواند چندین لایه داشته باشد به دور یک هسته مرکزی پیچیده می‌شود. این ممبران‌ها در درون لوله هایی نصب می شوند به گونه ای که محلول ورودی از یک انتها وارد شده، به صورت عرضی در درون ممبران نفوذ کرده و در ادامه به سمت لوله مرکزی هدایت و جمع آوری خواهد شد. شکل ۶ بیانگر تصویر شماتیک ممبران مارپیچی می باشد.

شکل ۶- نمای شماتیک ممبران مارپیچی[۵]

از مزایای این ممبران‌ها، سطح مخصوص بالای ممبران در عین حجم کم آن می باشد. در این ممبران‌ها مسیرهای باریک جریان(موجود در لایه بافته شده) نسبت به جریانهای گل آلود حساس بوده و امکان انسداد آنها وجود دارد به همین دلیل همواره در به کارگیری این ممبران‌ها از فرآیندهای پیش تصفیه به منظور حذف ذرات جامد معلق استفاده می شود. کاربردهایی چون شیرین سازی آب دریا و آب شور از مواردی هستند که در آنها از ممبران‌های اسمز معکوس به شکل مارپیچی استفاده می گردد[۶].

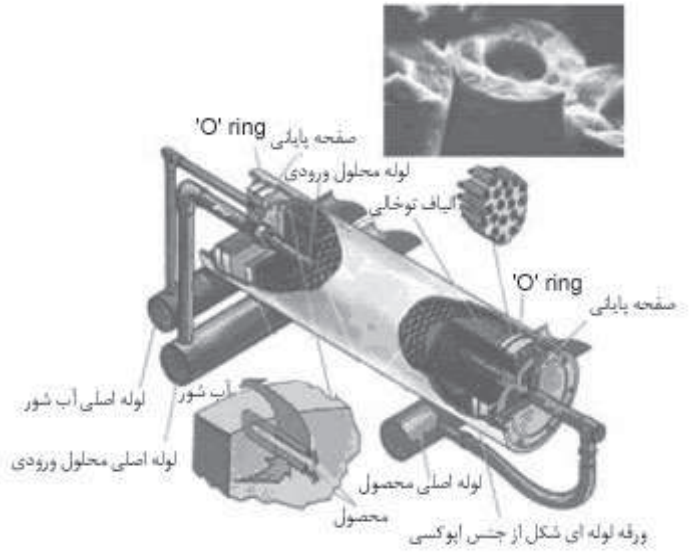
۸-٤-۳- ممبران‌های الیاف توخالی(Hollow Fiber Membrane)

در این ممبران‌ها از الیافی توخالی و همانند موی سر استفاده می گردد به طوریکه قطر خارجی آنها کمتر از ۲۰۰ میکرون می باشد. الیاف مذکور دارای یک پوسته نازک و متراکم (ممبران) بوده که از نفوذ آلودگیها جلوگیری کرده و تنها به محصول اجازه عبور می دهند. در زیر این پوسته فعال، یک لایه ضخیم و متراکم (پایه) به کار می رود که نقش آن حمایت[۶] لایه فعال می باشد. این الیاف به یکدیگر بسته می شوند و به صورت یک دسته U شکل یا مستقیم در می آیند. جریان ورودی به درون الیاف وارد می شود و به دنبال آن بخش نفوذ کرده (محصول)، در بیرون الیاف و بخش تغلیظ شده (باطله)، در انتهای دیگر الیاف جمع آوری می‌گردد[۶].

[6] Support

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]



شکل ۷- نمای کلی ممبران فیبر توخالی[۶]

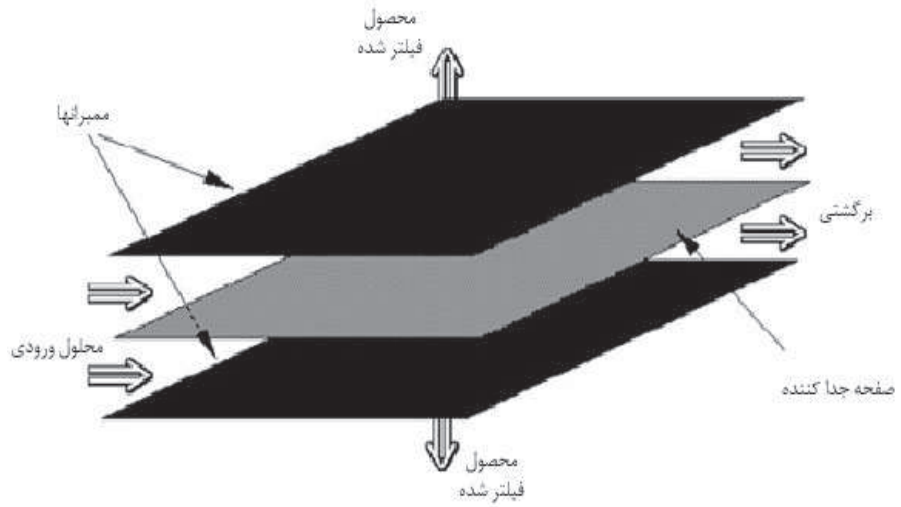
ممبران‌های فیبر توخالی دانستیه فشردگی بسیار بالایی دارند و نیاز به فضای اندکی برای کار خواهند داشت (شکل ۷). شیرین سازی آب دریا، تهیه آب قابل شرب و همچنین تصفیه فاضلابها از جمله مواردی هستند که در آن از ممبران‌های به شکل الیاف توخالی به طور گسترده ای استفاده می گردد[۶].

۸-٤-٤- ممبران‌های تخت(Flat Membrane)

این نوع مدول، ساده ترین شکل ممبران بوده و اولین ممبران نیمه نفوذپذیری که تولید شد از لحاظ هندسی، تخت بود. شکل ۸ یک نمای کلی از ممبران‌های تخت را نشان می دهد.

این ممبرانها، از دو صفحه در انتها، ممبران صفحه ای شکل و صاف و صفحات جدا کننده[۷] که با ترتیب خاصی قرار گرفته اند؛ تشکیل می گردند[۳]. لازم به ذکر است که صفحات جداکننده، نقش هدایت جریان تغذیه را بر روی سطح ممبران به عهده دارند.

ساخت، نصب و عملکرد این ممبران‌ها ساده می باشد ولی معایب عمده ای چون نسبت سطح به حجم اندک و بنابراین نیاز به فضای زیاد هنگام کار، مشکلات دمونتاژ کردن ممبران به هنگام تمیز کردن آن و بنابراین پر زحمت و زمان بر بودن فرآیند تمیز نمودن آن را نمی توان نادیده گرفت[۶].



شکل ۸- ممبران تخت به صورت شماتیک[۳]

[7] Spacer

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

۹- شیرین سازی(نمک‌زدایی) Desalination

یکی از کاربردهای مهم ممبران‌ها در بخش تصفیه آب، شیرین سازی آبهای شور می باشد. به طور میانگین، آب دریا تقریبا حاوی ۳۵۰۰۰ mg/l نمک می باشد. برای مصرف یک آب استاندارد، میزان نمک آن باید کمتر از ۲۵۰ mg/l باشد. برای تهیه یک آب استاندارد از آب حاوی ۳۵۰۰۰ mg/l نمک، نیاز به ممبرانی با خاصیت دفع نمک ۹۹/۳٪ می باشد تا با یک بار عبور آب، آنرا به میزان استاندارد، نمک زدایی نماید[۳].

در حال حاضر تکنولوژیهای مختلفی برای شیرین سازی آب مورد استفاده قرار می گیرد. در این میان، متداولترین این تکنولوژیها عبارتند از :Multi-Effect Distillation[۸]، Multi–Stage flash[۹] و اسمز معکوس[۱۰].

در هر دو تکنیک MED و MSF انتقال حرارت بین بخار و آب شور صورت می گیرد در حالی که RO تکنیکی است بر پایه ممبران که تفاوت عمده آن با دو روش قبلی در حذف مرحله تبخیر می باشد.

تکنیک اسمز معکوس نسبت به دو تکنیک دیگر مزایای بزرگی را داراست که به ذکر برخی از آنها می‌پردازیم. یکی از عوامل بسیار مهم در فرایند شیرین سازی آب، مصرف انرژی فرایند می باشد. مصرف کمتر انرژی منجر به کاهش هزینه محصول می گردد. تنها مصرف انرژی در روش RO، انرژی الکتریکی لازم برای راه اندازی پمپها می باشد؛ در حالیکه روشهای MSF و MED علاوه بر صرف انرژی برای عملکرد پمپها، به حرارت دهی برای تبخیر آب نیز نیازمند هستند.

هزینه انرژی مصرف شده و هزینه نگهداری و تعمیرات سیستم، دو فاکتور اصلی در تعیین هزینه سیستم می‌باشند. در این میان، هزینه شیرین سازی آب، در روش RO نسبت به روشهای MED و MSF به طور قابل توجهی کمتر می باشد.

در رابطه با مسائل زیست محیطی، هیچ یک از این سه فرایند، فرایندهای ایده آلی نیستند. در این فرایندها از افزودنیهای شیمیایی استفاده می گردد و آب شور برگشتی از هر سه فرایند RO، MED و MSF حاوی میزان نمک بالا و عوامل شیمیایی خواهد بود. ولی هنگامی که بحث دمای آب شور برگشتی و اثرات مخرب آن بر روی اکوسیستم آب مطرح می شود، فرایند RO کمترین اثر منفی را بر روی محیط اطراف خواهد گذاشت. این حقیقت در کنار حداقل میزان خروجی اتمسفری ناشی از مصرف کمتر انرژی باعث گردیده است که فرایند RO به عنوان یک انتخاب دوستار طبیعت مطرح گردد[۳].

۱۰- رسوب و کنترل رسوب در ممبران

مشکل رسوب و انسداد ممبران، مشکلی بسیار جدی بوده و خطری است که تمامی فرایندهای ممبرانی را تهدید می نماید. رسوبات می توانند باعث انسداد حفرات ممبران گردند و در نتیجه باعث کاهش میزان محصول و افزایش هدایت آب گردند. فرایندهای صحیح نگهداری و پیش تصفیه و همچنین روشهای مناسب تمیز کردن ممبران، مواردی هستند که باعث کاهش انسداد و بهبود عملکرد سیستم شده و طول عمر سیستم را بالا خواهند برد[۶و۹]. به طور کلی چهار نوع انسداد مطرح است؛ انسداد ناشی از جامدهای حل شده، جامدهای معلق، مواد آلی غیر زیستی و ترکیبات بیولوژیکی(موجودات زنده). روشهای متعدد و کارآمدی به منظور کنترل هر یک از این رسوبات وجود دارد و به کارگیری این روشها باعث به حداقل رساندن میزان رسوب شده و بهبود عملکرد سیستم و افزایش طول عمر سیستم را سبب خواهد شد.

[8] MED
[9] MSF
[10] RO

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]

۱۱- کاربرد ممبران‌های سرامیکی در زمینه های مختلف صنعتی

با توجه به تواناییهای بسیار زیاد ممبران‌های سرامیکی، برتریهای آنها نسبت به انواع پلیمری و مزایای متعدد آنها که در گذشته همگی ذکر گردید، این ممبران‌ها در صنایع زیادی به کار می روند. از کاربردهای ممبران‌های سرامیکی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- صنایع شیمیایی: جداسازی و تمیز نمودن محصول، جداسازی کاتالیست‌ها، بازیافت رنگ‌ها و رنگدانه‌ها، نمک زدایی محصولات، تمیز کردن و استفاده مجدد از حلالهای آلی
- صنایع فلزی و مهندسی سطح: تصفیه امولسیون‌های آب–روغن، بازیافت فلزات سنگین، تصفیه پسابهای شیشه و الیاف شیشه ای
- صنعت مواد غذایی و نوشیدنی: شفاف سازی آبمیوه ها، تغلیظ آبمیوه ها، استرلیزه نمودن شیر و پنیر، جداسازی و تفکیک اجزاء شیر، نمک زدایی آب پنیر، آبگیری محصولات، تصفیه آب آشامیدنی

صنعت بازیافت و محیط زیست: بازیافت مواد دارویی و ضد آفت، حذف میکروارگانیسمها، حذف فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو

۱۲- دورنما و چشم انداز آینده ممبران‌ها

با موفقیت ممبران‌ها در عرصه تصفیه آب، تکنولوژی ممبران‌ها همچنان رو به پیشرفت می باشد. کماکان مشکلاتی مانند مسدود شدن ممبران، نیاز به توجه و بررسی دارد. تحقیقات در این زمینه (انسداد ممبرانها) بر روی اصلاح سازی سطح ممبران و افزایش فرایندهای پیش تصفیه آب، قبل از ورود آن به ممبران متمرکز شده است. علاوه بر تصفیه پسابها و شیرین سازی، کاربردهای جدید ممبرانها به منظور تصفیه آب نیز در حال پیگیری می باشد. به طور کلی، حوزه کاربرد ممبرانها به طور وسیعی گسترش یافته است. اقتصادی بودن، دوستار طبیعت بودن، متنوع و مستعد بودن و کاربرد آسان آنها باعث گردیده است که ممبرانها به عنوان اولین انتخاب در کاربردهای تصفیه آب مطرح باشند[۳].

مراجع

۱. حسین سرپولکی، خبرنامه انجمن سرامیک، سال ششم، شماره بیستم، صفحه ۱۱، دانشگاه علم و صنعت ایران، تابستان ۱۳۸۲

2. R. W. Baker, 1 Overview of Membrane Science and Technology, John Wiley & sons, ISBN:0-470-85445-6, 2004
3. Alyson Sagle and Benny Freeman, Fundamentals of Membrane for Water Treatment, university of Texas at Austin
4. Methods of Water Purification, GE infrastructure water & process technology http://customer.gewater.com
5. RO Membranes, http://www.excelwater.com
6. Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Proccessing, International atomic energy agency Vienna, technical reports series No.431, 2004
7. Semih Otles and Serkan Otles, Desalination Techniques, Electronic journal of Environmental, agricultural and food chemistry, ISSN:1579-4377
8. Ultrafiltration Systems for Wastewater Treatment, USFilter, http://www.usfilter.com
9. Membrane Separation and Treatment, http://www.ntu.edu.sg

[Downloaded from jicers.ir on 2025-07-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1385.2.4.1.3]