

بسمه تعالی

آشنایی با عملکرد  
سیستم اسمز معکوس (RO)  
اصول طراحی و بهره برداری

مؤلف:

مهندس حسین اسدالهی

انتشارات ارسطو  
(چاپ و نشر ایران)

۱۳۹۷

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۴۳۲-۲۰۲-۷

شماره کتابشناسی ملی: ۵۲۰۹۲۰۳

عنوان و نام پدیدآور: آشنایی با عملکرد سیستم اسمز معکوس (RO) اصول طراحی

و بهره‌برداری / مولف حسین اسداللهی.

مشخصات نشر: مشهد: ارسطو، ۱۳۹۷.

مشخصات ظاهری: ۱۴۲ص: مصور، جدول.

یادداشت: کتابنامه.

موضوع: آب -- تصفیه -- پالایش غشا

موضوع: Water -- Purification -- Membrane filtration

موضوع: آب -- تصفیه -- فرایند اسمز معکوس

موضوع: Water -- Purification -- Reverse osmosis process

موضوع: جداسازی غشایی -- کاربردهای صنعتی

موضوع: Membrane separation -- Industrial applications

رده بندی دیویی: ۶۲۸/۱۶۲۲

رده بندی کنگره: TD۴۴۲/۵/الف۵۵ ۱۳۹۷

سرشناسه: اسداللهی، حسین، ۱۳۵۹ -

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

نام کتاب: آشنایی با عملکرد سیستم اسمز معکوس (RO)

اصول طراحی و بهره‌برداری

مولف: حسین اسداللهی

ناشر: ارسطو (با همکاری سامانه اطلاع رسانی چاپ و نشر ایران)

صفحه آرای، تنظیم و طرح جلد: پروانه مهاجر

تیراژ: ۱۰۰۰ جلد

نوبت چاپ: اول - ۱۳۹۷

چاپ: مدیران

قیمت: ۱۲۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۴۳۲-۲۰۲-۷

تلفن‌های مرکز پخش: ۳۵۰۹۶۱۴۵ - ۳۵۰۹۶۱۴۶ - ۰۵۱

[www.chaponashr.ir](http://www.chaponashr.ir)



انتشارات ارسطو



چاپ و نشر ایران

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۷	مقدمه
۹	فصل اول: تاریخچه غشاء
۱۳	مقدمه ای بر فرآیندهای غشایی
۱۵	تعریف غشاء
۱۵	انواع غشاها
۱۷	غشاهای متقارن
۱۷	غشاهای میکرومتخلخل
۱۷	غشاهای متراکم نامتخلخل
۱۸	غشاهای باردار به طور الکتریکی
۱۸	غشاهای نامتقارن
۱۹	غشاهای سرامیکی، فلزی و مایع
۱۹	فرآیندهای غشایی
۲۴	روش های ساخت غشای پلیمری
۲۴	انواع غشاهای پلیمری
۲۵	غشاهای پلیمری متقارن
۲۵	غشای غیر متخلخل
۲۵	غشاهای میکرومتخلخل
۲۵	غشاهای پلیمری نامتقارن
۲۶	غشاهای حاصل از روش جدایش فازی
۲۷	روش ترسیب در آب (ترسیب به کمک غوطه‌وری)
۲۸	روش انعقاد گرمایی

۲۸	روش تبخیر حلال	۲۸
۲۸	روش جذب بخار آب	۲۸
۲۹	غشاهای حاصل از پلیمریزاسیون بین سطحی	۲۹
۳۰	غشاهای مرکب پوشش داده شده در محلول	۳۰
۳۱	<b>فصل دوم: روش های پیش تصفیه</b>	۳۱
۳۳	گرفتگی	۳۳
۳۴	روش های مختلف پیش تصفیه برای سامانه های RO و مقایسه ی آن ها	۳۴
۳۴	پیش تصفیه خوراک واحد RO	۳۴
۳۷	پیش تصفیه ی مکانیکی	۳۷
۳۸	زالال کننده	۳۸
۳۸	فیلترهای تحت فشار Multimedia	۳۸
۳۸	فیلترهای راندمان بالا	۳۸
۳۸	فیلترهای کربنی	۳۸
۳۸	فیلترهای آهنی	۳۸
۳۹	کاهش دهنده ی سدیم	۳۹
۳۹	تابش اشعه ی فرابنفش (UV)	۳۹
۳۹	استفاده از غشاء	۳۹
۴۰	پیش تصفیه ی شیمیایی	۴۰
۴۰	اکسید کننده های شیمیایی	۴۰
۴۱	آنتی اسکالانت ها	۴۱
۴۱	سدیم متابی سولفیت	۴۱
۴۲	ترکیب روش های پیش تصفیه ی مکانیکی با شیمیایی	۴۲
۴۲	کاهش دهنده با آهک (اکسید کلسیم)	۴۲
۴۳	ترتیب روش های پیش تصفیه	۴۳
۴۵	<b>فصل سوم: دستگاه تصفیه آب صنعتی، پکیج RO</b>	۴۵
۴۷	فرآیند اسمز معکوس (RO)	۴۷
۴۹	بخش های مختلف دستگاه تصفیه آب صنعتی اسمز معکوس (RO)	۴۹

تجهیزات اصلی بکار رفته در سیستم اسمز معکوس RO	۴۹
بخش پیش تصفیه (Pretreatment)	۵۰
فیلتر شنی	۵۱
کاربرد دستگاه فیلتر شنی	۵۳
فیلتر کربنی	۵۳
سختی گیر رزینی (سختی گیر آب)	۵۴
فیلتر میکرونی (فیلتر الیافی) P.P	۵۵
فیلتر دیسکی	۵۵
بخش اسمز معکوس (Reverse Osmosis)	۵۵
سیستم‌ها و تجهیزات برق، ابزار دقیق و کنترل	۵۶
مشخصات دستگاه‌های تصفیه آب به روش اسمز معکوس	۵۷
<b>فصل چهارم: سیستم‌های شستشو</b>	<b>۵۹</b>
مراحل شستشوی ممبران‌های RO	۶۱
چند نکته مهم در مورد شستشوی ممبران‌های RO	۶۴
الزامات شستشوی ممبران‌ها	۶۶
نکاتی مهم در خصوص شستشوی ممبران‌ها	۶۷
تجهیزات سیستم شستشوی ممبران‌های RO	۶۸
<b>فصل پنجم: طراحی سیستم</b>	<b>۷۳</b>
فرآیند ناپیوسته در برابر پیوسته	۸۰
سیستم تک مدولی	۸۲
سیستم تک مرحله ای	۸۴
سیستم چند مرحله ای	۸۵
برگشت جریان plug بر حسب جریان غلیظ شده	۸۶
سیستم نفوذ مرحله‌ای	۹۰
راهنمای طراحی سیستم ممبرین	۹۴
راهنمای طراحی سیستم ممبرین برای المان‌های FILMTEC ۸ اینچی	۹۶
راهنمای طراحی برای المان‌های FILMTEC با اندازه متوسط	۹۷

۱۰۰	مراحل طراحی سیستم ممبرین	۱۰۰
۱۰۷	طرح عملکرد سیستم	۱۰۷
۱۰۷	خواص عملیاتی سیستم	۱۰۷
۱۱۱	پارامترها و معادلات طراحی	۱۱۱
۱۱۲	المان به المان	۱۱۲
۱۱۴	کل سیستم	۱۱۴
۱۱۷	مقایسه‌ی عملکرد حقیقی المان‌های FILMTEC با طراحی ROSA	۱۱۷
۱۱۷	آزمایش	۱۱۷
۱۱۸	آزمایش غربالی	۱۱۸
۱۱۹	آزمایش کاربردی	۱۱۹
۱۱۹	تعیین فشار عملیاتی	۱۱۹
۱۱۹	تعیین ضریب غلظت، شدت بازیافت	۱۱۹
۱۲۰	آزمایش‌های صنعتی در مقیاس کوچک	۱۲۰
۱۲۱	فصل ششم: اجزای سیستم	۱۲۱
۱۲۳	پمپ فشار قوی	۱۲۳
۱۲۴	لوله‌های تحت فشار	۱۲۴
۱۲۵	کلیدهای خاموش کردن	۱۲۵
۱۲۶	شیرآلات	۱۲۶
۱۲۷	کنترلی ابزار	۱۲۷
۱۲۸	مخازن	۱۲۸
۱۳۲	مواد سازنده، کنترل خوردگی	۱۳۲
۱۳۳	خطوط لوله	۱۳۳
۱۳۶	ملاحظات مربوط به طراحی سیستم برای کنترل عملکرد میکروبیولوژیکی	۱۳۶
۱۳۷	نظریات مربوط به طراحی سیستم جهت عیب‌یابی بهتر	۱۳۷
۱۴۲	منابع	۱۴۲

## مقدمه

پیشرفت‌های کنونی در صنایع شیمیایی و صنایع مشابه، به سمت افزایش سرعت انجام فرآیندها و کاهش مصرف انرژی در طول فرآیند معطوف شده است. یکی از فرآیندهای مهم و پرکاربرد در چنین صنایعی، جداسازی مواد مختلف می‌باشد.

برای انجام فرآیندهای صنعتی اغلب باید اجزای ماده خام اولیه از هم جدا شده و محصول به دست آمده از این فرآیندها نیز تفکیک و تخلیص شود. از طرفی در اکثر صنایع، با در نظر گرفتن قوانین محیط زیستی، لزوم انجام فرآیندهای جداسازی بیش از پیش به چشم می‌خورد. در حقیقت، اهمیت فرآیندهای جداسازی و دستگاه‌ها و تجهیزات مربوطه، به اندازه‌ای است که در بسیاری از صنایع، بخش اعظم قیمت تمام شده یک محصول، مربوط به هزینه‌های جداسازی و خالص سازی آن محصول است. به همین دلیل یافتن یک روش جداسازی ساده‌تر و با هزینه کمتر، می‌تواند قابل تأمل باشد. در انتخاب یک روش جداسازی مناسب، باید بازدهی آن روش، دسترسی به تجهیزات، هزینه‌های جداسازی، هزینه‌های ساخت و هزینه‌های انرژی، با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی و مسائل سیاسی مورد ارزیابی کامل قرار بگیرد. همچنین باید اهداف جداسازی در فرآیند مشخص شود. در یک فرآیند جداسازی، اهداف متفاوتی مانند تغلیظ، تخلیص، تفکیک و جا به جایی تعادل واکنش می‌تواند مد نظر باشد. در این راستا، غشاها برای جداسازی گونه‌های مختلفی از مواد در حالات جامد، مایع و گاز توسعه یافته‌اند. با این که روش جداسازی با غشاها نسبت به روش‌های دیگری تقطیر، جذب سطحی، کریستالیزاسیون و استخراج

مایع - مایع جدیدتر است، ولی با توجه به کارایی و سهولت استفاده طی دو دهه‌ی اخیر، گسترش چشمگیری در استفاده از آن مشاهده شده است. [۱]

غشاء به عنوان ماده‌ای که از میان آن یک نوع ذره می‌تواند آسان‌تر از دیگر ذرات عبور کند، معرفی می‌شود.

بنابراین مبنای فرآیندهای جداسازی غشایی، عبور انتخابی ذرات از میان غشاء است. ذراتی که از میان حفرات غشاء عبور می‌کنند تراوه<sup>۱</sup> و ذراتی که از غشاء عبور نمی‌کنند، ناتراوه<sup>۲</sup> یا باقیمانده نامیده می‌شوند. مشخصه‌ی کلیدی غشاء، توانایی در کنترل نرخ تراوش اجزاء شیمیایی از آن می‌باشد که آن را برجسته می‌کند. در فرآیندهای جداسازی غشایی، مخلوط گاز یا مایع با سمت خوراک غشاء در تماس قرار می‌گیرد و تراوه از یکی از اجزاء مخلوط غنی شده و به سمت دیگر غشاء می‌رود. چندین عامل برای استفاده‌ی موفق با عملکرد بالا از یک مدول غشایی وجود دارد. اولین عامل، جنس غشاء می‌باشد که باید از لحاظ خصوصیات شیمیایی، مکانیکی و تراوایی به طور مناسب انتخاب شود که این انتخاب بسیار به نوع فرآیند جداسازی وابسته بوده و می‌تواند بسته به فرآیند تغییراتی داشته باشد. پس از انتخاب ماده سازنده، به فناوری نیاز است که بتواند این ماده را به طور ظریف، بدون نقص و با مقاومت مناسب به غشاء تبدیل کند. در نهایت غشای ساخته شده را باید به طور بهینه، اقتصادی و با سطح مؤثر بالا برای استفاده در همه فرآیندهای غشایی مدول کرد. [۲]

---

1. Permeate.

2. Retentate.



# فصل اول

---

## تاریخچه غشاء



تا اواسط قرن ۱۸ میلادی غشاء تنها به عنوان یک جدا کننده و حائل مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گرفت. [۲]

در قرن ۱۹ میلادی و اوایل قرن ۲۰ نیز استاده‌ی صنعتی و تجاری خاصی از غشاء صورت نگرفت اما از آن به عنوان ابزاری آزمایشگاهی برای تکمیل تئوری‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده شد. [۲]

محققان در ابتدا از هر نوع دیافراگمی که در دسترس آن‌ها بود از جمله کتان‌هی خوک، گاو و یا ماهی برای آزمایش‌ها استفاده می‌کردند. بعدها غشاهای نیتروسولولز<sup>۱</sup> به دلیل تکرارپذیری و شرایط ساخت مورد توجه قرار گرفت. در ۱۹۰۷ بچهلد<sup>۲</sup> روشی برای ساخت غشاهای نیتروسولولزی پیشنهاد داد که دارای اندازه‌ی حفره مشخص بود و آن را به روش حباب مورد آزمایش قرار داد. در طول ۲۰ سال بعد فناوری ساخت این نوع غشای میکروفیلتر به پلیمرهای دیگر به ویژه استات سلولز گسترش یافت. اولین استفاده قابل توجه از غشاها برای آزمایش آب آشامیدنی در پایان جنگ جهانی دوم بود؛ زمانی که منابع آب مراکز بزرگی در آلمان و مناطق مختلف اروپا تخریب شده بود و نیازی فوری به فیلترهایی داشتند تا سلامتی آب را آزمایش کنند. محققان با حمایت‌های ارتش آمریکا تلاش‌هایی را در جهت ساخت این فیلترها انجام دادند. که در سال‌های بعد توسط شرکت

---

1. Nitro cellulose.

2. Bechhold.

میلی پور<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. در ۱۹۰۶ عناصر علم غشایی مدرن پیشرفت نمود، اما همچنان غشاها تنها در آزمایشگاه و برخی صنایع کوچک و خاص مورد استفاده قرار می گرفت. کشف اصلی که باعث انتقال جداسازی غشایی از حالت آزمایشگاهی به صنعتی شد در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ توسط لوئب<sup>۲</sup> و سوریراجان<sup>۳</sup> انجام گرفت و آن ساخت غشای نامتقارن بود [۲].

این غشاء از یک لایه‌ی نازک متراکم فوقانی (با ضخامت کمتر از ۰.۵ میکرومتر) بر روی یک نگهدارنده‌ی متخلخل به عنوان زیر لایه (ضخامت: ۵۰-۲۰۰ میکرومتر) تشکیل می شد.

لایه فوقانی مشخص کننده‌ی نرخ انتقال و زیر لایه‌ی متخلخل تنها نقش نگهدارنده و تأمین کننده‌ی استحکام مکانیکی [۲ و ۳] را داشت. شار اولین غشای اسمز معکوس لوئب و سوریراجان ده برابر بیشتر از غشاهای موجود در آن زمان بود که این خود نشان می داد که این فرآیند به عنوان روشی عملی برای نمک زدایی از آب می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در فاصله زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ تغییرات چشمگیری در فناوری‌های غشایی صورت گرفت. از جمله آن می توان به روش‌های دیگر ساخت غشاها مانند پلیمریزاسیون بین سطحی و فیلم کشی چند لایه به همراه پوشش دهی اشاره کرد [۲].

با انجام این پیشرفت‌ها و ساخت غشاهای مختلف از جنس‌های متنوع، فرآیندهای غشایی مختلفی نیز بسته به نیاز صنایع شکل گرفت که در جدول ۱-۱ نحوه‌ی شکل‌گیری اولیه‌ی هر فناوری ارائه شده است [۳].

---

1. Milipore.

2. Loed.

3. Sourrajan.

## جدول ۱-۱: روند پیشرفت در فرآیندهای غشایی [۳]

کاربرد	سال	کشور	فرآیند غشایی
استفاده‌ی آزمایشگاهی	۱۹۲۰	آلمان	میکروفیلتراسیون
استفاده‌ی آزمایشگاهی	۱۹۳۰	آلمان	اولترافیلتراسیون (مقیاس آزمایشگاهی)
کلیه مصنوعی	۱۹۵۰	هلند	همودیالیز
نمک زدایی	۱۹۵۵	آمریکا	الکترودیالیز
نمک زدایی از آب دریا	۱۹۶۰	آمریکا	اسمز معکوس
تغلیظ ماکرولکولها	۱۹۶۰	آمریکا	اولترافیلتراسیون (مقیاس صنعتی)
بازیابی هیدروژن	۱۹۷۹	آمریکا	جداسازی گازی
تغلیظ محلول‌های آبی	۱۹۸۱	آلمان	تقطیر غشایی
آب زدایی از حلال‌های آلی	۱۹۸۲	آلمان / هلند	تراوش تبخیری

## مقدمه‌ای بر فرآیندهای غشایی

در مقایسه با روش‌های دیگر جداسازی، فرآیندهای نسبتاً جدید هستند. امروزه این فرآیندها در محدوده‌ی وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند که برخی از آنها همچنان رو به پیشرفت می‌باشد.

فرآیندهای غشایی زیادی وجود دارند که هر کدام بر پایه‌ی اصول یا سازو کارهای متفاوت جداسازی استوار بوده و برای محدوده‌ی متفاوتی از اندازه‌ی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پس این تفاوت‌ها تمام فرآیندهای غشایی دارای یک عنصر مشترک می‌باشند که آن غشاء است. غشاء به عنوان قلب هر فرآیند غشایی بوده و به عنوان یک حائل انتخاب‌گر تراوا بین دو فاز قرار می‌گیرد [۳].

فاز ۱ معمولاً خوراک در نظر گرفته می‌شود در حالی که فاز ۲ تراوه نام دارد. عمل

جداسازی به دلیل توانایی غشاء در انتقال سریعتر یک جزء از مخلوط خوراک نسبت به جزء یا اجزاء دیگر صورت می‌گیرد. عملکرد یا بازدهی غشاء به وسیله‌ی دو مشخصه انتخاب‌گری<sup>۱</sup> و جریان در طول غشاء، که به شار<sup>۲</sup> یا نرخ تراوایی معروف است، بیان می‌شود. شار به صورت حجم عبوری از غشاء بر واحد سطح و زمان تعریف می‌گردد. شار حجمی را می‌توان به وسیله‌ی دانسیته‌ی ( $\rho$ ) و وزن مولکولی ( $M$ ) به شار جرمی و مولی تبدیل کرد:

$$۱: \frac{lit}{m^2 h} = \rho \frac{kg}{m^3 h} = \rho / M \quad (۱-۱)$$

انتخاب‌گری غشاء در مقابل یک مخلوط به طور معمول به وسیله‌ی یکی از دو مشخصه‌ی دفع<sup>۳</sup> ( $R$ ) یا عامل جداسازی<sup>۴</sup> ( $\alpha$ ) بیان می‌شود.

برای مخلوط‌های رقیق که شامل حلال (معمولاً آب) و حل شونده می‌باشند، بیشتر متداول است که انتخاب‌گری به صورت ضریب دفع حل شونده بیان شود. در این حالت حل شونده به طور جزئی و یا کلی باقی می‌ماند در حالی که مولکول‌های حلال به طور آزادانه از میان غشاء عبور می‌کنند.

ضریب دفع به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$R = \frac{C_F - C_P}{C_F} = ۱ - \frac{C_P}{C_F} \quad (۲-۱)$$

که  $C_F$  غلظت حل شونده در خوراک و  $C_P$  غلظت آن در تراوه می‌باشد. انتخاب‌گری غشاء در مخلوط‌های گازی و مایعات آلی معمولاً به وسیله‌ی عامل جداسازی بیان می‌شود که برای مخلوطی شامل اجزاء A و B عامل جداسازی به صورت زیر بیان می‌شود:

---

1. Selectivity.

2. Flux.

3. Retention.

4. Separation Factor.

$$\alpha_{AB} = \frac{Y_A/Y_B}{X_A/X_B} \quad (3-1)$$

(۳-۱)

که در آن  $Y_A$  و  $Y_B$  غلظت A و B در تراوه  $X_A$  و  $X_B$  غلظت آن در خوراک می‌باشد [۲].

### تعریف غشاء

هرچند که بیان یک تعریف دقیق برای غشاء کاری دشوار است اما به عنوان تعریف کلی می‌توان گفت غشاء عبارت است از یک مانع فیزیکی انتخاب‌گر بین دو فاز که این کلمه‌ی «انتخاب‌گر» ذات غشاء یا فرآیند غشایی می‌باشد. باید توجه داشت که این بیان، یک تعریف ماکروسکوپی می‌باشد در حالی که جداسازی باید در مقیاس میکروسکوپی نیز در نظر گرفته شود. زیرا این تعریف چیزی در مورد ساختار یا نحوه‌ی عملکرد غشاء بیان نمی‌کند.

### انواع غشاها

غشاء می‌تواند نازک یا ضخیم و دارای ساختار همگن<sup>۱</sup> یا ناهمگن<sup>۲</sup> باشد. علاوه بر این‌ها غشاء می‌تواند طبیعی یا سنتزی، دارای بار و یا خنثی نیز باشد. برای دستیابی به درک بهتر، غشاها را می‌توان از جهات مختلف دسته‌بندی کرد. اولین دسته‌بندی براساس طبیعی یا سنتزی بودن غشاء است. این تفاوت واضح‌ترین راه تشخیص می‌باشد. از انواع غشاهای طبیعی می‌توان به غشاهای بیولوژیکی اشاره کرد و به عنوان یک زیرمجموعه از آن‌ها می‌توان غشاهای زنده یا غیرزنده را بیان کرد.

---

1. Homogenous.

2. Heterogeneous.

غشاهای سنتزی نیز به زیر مجموعه‌هایی از جمله، غشاهای آلی<sup>۱</sup> (پلیمری و مایع) و غشاهای معدنی<sup>۲</sup> (سرامیکی و فلزی) تقسیم بندی می‌شوند.

دسته‌بندی دیگر غشاها براساس ساختار و مورفولوژی آن‌ها می‌باشد. این دسته‌بندی به دلیل این که مشخص کننده‌ی ساز و کار جداسازی و در نتیجه کاربرد غشاء می‌باشد. حائز اهمیت بسیاری است. براساس ساختار می‌توان غشاها را نیز به دو دسته‌ی متقارن<sup>۳</sup> و نامتقارن<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرد [۳].

ضخامت غشاهای متقارن (متخلخل و غیزمتخلخل) بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرومتر می‌باشد. مقاومت در مقابل انتقال جرم به وسیله‌ی ضخامت کلی غشاء بیان می‌شود به طوری که کاهش ضخامت غشاء منجر به افزایش نرخ تراوایی می‌شود.

آنچه در استفاده صنعتی از غشاء به عنوان نقطه‌ی عطف بیان می‌گردد، توسعه‌ی غشاهای نامتقارن است. این غشاها دارای لایه‌ی متراکم فوقانی به ضخامت ۰,۱ تا ۰,۵ میکرومتر می‌باشند که به وسیله‌ی زیرلایه‌ی متخلخل به ضخامت ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر نگهداری می‌شود. درواقع این غشاها دو مولفه‌ی انتخاب‌گری بالای غشای متراکم و نرخ تراوایی بالای غشای متخلخل را با هم تلفیق کرده‌اند.

همچنین غشاهای ترکیبی<sup>۵</sup> نیز در گروه غشاهای نامتقارن قرار می‌گیرند. در غشاهای ترکیبی ماهیت لایه‌ی بالایی و زیرین از مواد پلیمری متفاوت می‌باشد. به طور معمول لایه‌ی نگهدارنده یک غشای نامتقارن آماده بوده و لایه‌ی متراکم بر روی آن نشانده می‌شود. جهت دستیابی به این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله می‌توان به

---

1. Organic membrane.

2. Inorganic membrane.

3. Symmetric membrane.

4. Asymmetric membrane.

5. Composite membrane.



پوشش دهیبه وسیله‌ی غوطه‌وری<sup>۱</sup>، پلیمریزاسیون بین سطحی<sup>۲</sup>، پلیمریزاسیون ارجا<sup>۳</sup> و پلیمریزاسیون پلاسما<sup>۴</sup> اشاره کرد [۳].

## غشاهای متقارن

### غشاهای میکرومتخلخل<sup>۵</sup>

غشاهای میکرومتخلخل از نظر ساختار و عملکرد تقریباً مشابه فیلترهای معمولی هستند. این نوع غشاها دارای ساختار سخت با فضای خالی زیاد و حفرات پیوسته با توزیع تصادفی هستند. حفرات این نوع غشاها نسبت به فیلترهای معمولی بسیار کوچک‌تر بوده و قطری در حدود ۰٫۱ تا ۱۰ میکرومتر دارند. تمام اجزاء و ذرات بزرگ‌تر از حفرات توسط غشاء دفع می‌شود. میزان دفع به توزیع اندازه‌ی حفرات بستگی دارد. اجزایی که از حفرات بزرگ، کوچک‌تر بوده ولی از کوچک‌ترین حفرات بزرگ‌تر هستند به طور نسبی حذف می‌شوند. بنابراین جداسازی اجزای محلول توسط غشاهای میکرومتخلخل تابعی از اندازه‌ی مولکولی و توزیع اندازه‌ی ذرات می‌باشد [۲].

### غشاهای متراکم نامتخلخل<sup>۶</sup>

غشاهای متراکم نامتخلخل شامل لایه‌ی متراکمی می‌باشند که جریان تراوه توسط ساز و کار نفوذ ناشی از گرادیان فشار، غلظت و یا پتانسیل الکتریکی از درون غشاء عبور می‌کند. جداسازی اجزای مختلف مخلوط تابعی از نرخ انتقال نسبی آن‌ها از میان غشاء

- 
1. Dip coating.
  2. Interfacial polymerization.
  3. In-situ polymerization.
  4. Plasma polymerization.
  5. Microporous membrane.
  6. Nonporous dense membrane.

می‌باشد. در این غشاها انتقال توسط ساز و کار انحلال - نفوذ صورت می‌گیرد. بنابراین غشاهای متراکم نامتخلخل قادر به جداسازی مواد مختلف با اندازه‌ی مولکولی یکسان هم می‌باشند به شرط آن که حلالیت آن‌ها در غشاء به میزان قابل توجهی متفاوت باشد. در اغلب جداسازی‌های گازی، فرآیندهای تراوش تبخیری و اسمز معکوس از غشاهای متراکم استفاده می‌شود [۲].

### غشاهای باردار به طور الکتریکی<sup>۱</sup>

غشاهای دارای بار الکتریکی ممکن است به صورت متراکم و یا میکرومتخلخل باشند ولی عمدتاً به صورت میکرومتخلخل با حفرات زیاد می‌باشند که دیواره‌ی حفرات دارای یون‌های باردار مثبت و یا منفی است. غشایی که دارای یون‌های با بار مثبت می‌باشد، غشای تبادل آنیون<sup>۲</sup> نامیده می‌شود زیرا آنیون موجود در سیال را جذب می‌کند. همچنین غشای دارای بار منفی را غشای تبادل کاتیون<sup>۳</sup> می‌گویند. جداسازی توسط غشاهای باردار به طور عمده با دفع آنیون با بار مشابه با یون موجود در ساختار غشاء انجام شده و به میزان کمتری توسط اندازه‌ی حفرات صورت می‌گیرد. در این غشاها جداسازی تابعی از بار و غلظت یون‌ها و همچنین غلظت محلول می‌باشد. در محلول‌هایی با قدرت یونی بالا میزان انتخاب‌گری کاهش می‌یابد. از غشاهای باردار برای فرآوری محلول‌های الکترولیتی در الکترودیالیز استفاده می‌شود [۲].

### غشاهای نامتقارن

به دلیل این که میزان انتقال در طول غشاء با ضخامت آن نسبت عکس دارد و با توجه به این که اقتصاد فرآیند حکم می‌کند که نرخ انتقال مواد در جداسازی غشایی باید بالا

---

1. Electrically charged membrane.

2. Anion- exchange membrane.

3. Cation-exchange membrane.

باشد، غشاء باید تا حد ممکن نازک ساخته شود. روش‌های ساخت غشاء به شیوه‌های معمول، امکان ساخت نمونه‌ی بی‌عیب با استحکام مکانیکی بالا و ضخامت کمتر از ۲۰ میکرومتر را محدود می‌کند. غشاهای نامتقارن شامل لایه‌ی بسیار نازک به روی زیر لایه‌ی متخلخل ضخیم‌تر می‌باشد به طوری که لایه‌ی فوقانی و زیر لایه ممکن است در یک عملیات و یا به صورت جداگانه تهیه شود. در غشاهای مرکب، لایه‌ها از پلیمرهای گوناگون ساخته می‌شوند. خصوصیات جداسازی و شار غشاء توسط لایه‌ی سطحی مشخص می‌گردد و زیر لایه‌ی متخلخل به عنوان نگهدارنده‌ی مکانیکی عمل می‌کند. میزان شار در این نوع غشاها بالا است. بنابراین در اکثر فرآیندهای تجاری از این نوع غشاها استفاده می‌شود [۲].

### غشاهای سرامیکی، فلزی و مایع<sup>۱</sup>

مواد سازنده‌ی غشاها عمدتاً پلیمرهای آلی می‌باشند و بخش عمده‌ای از غشاهای مورد استفاده بر پایه‌ی مواد پلیمری هستند. با این وجود در سال‌های اخیر ساخت غشاهایی با جنس متفاوت مورد توجه قرار گرفته است. غشاهای سرامیکی نوع خاصی از غشاهای میکرومتخلخل هستند که در فرایندهای اولترافیلتراسیون، و میکروفیلتراسیون، در مواردی که به مقاومت در برابر حلال و یا پایداری گرمایی بالا نیاز است، استفاده می‌شوند.

غشاهای فلزی متراکم، به ویژه غشاهای پالادیوم، برای جداسازی هیدروژن از مخلوط‌های گازی به کار می‌روند. هم‌چنین فیلم‌های مایع برای استفاده در فرایند انتقال تسهیل یافته با حامل<sup>۲</sup> توسعه یافته‌اند [۲].

### فرآیندهای غشایی

غشاها توانایی انتقال سریع تر یک جزء نسبت به دیگر اجزاء را به دلیل وجود اختلافی در خصوصیات فیزیکی و یا شیمیایی بین غشاء و اجزای تراوش کننده، دارند. انتقال در

1. Ceramic, metal and liquid membranes.

2. Carrier-Facilitated transport processes.

طول غشاء نتیجه‌ی وجود نیروی وجود نیروی محرکه<sup>۱</sup> در سمت خوراک می‌باشد. در بسیاری از موارد نرخ تراوش در طول غشاء متناسب با نیروی محرکه می‌باشد. به عنوان مثال رابطه‌ی شار (J) را می‌توان به وسیله یک معادله خطی بیان کرد:

$$J = -A \frac{dX}{dx} \quad (۴-۱)$$

که در آن A ضریب پدیده‌ی انتقال مربوطه و  $\frac{dX}{dx}$  نیروی محرکه که نشان‌دهنده‌ی گرادیان مشخصه‌ی X (معمولا غلظت) در جهت X (جهت عمود بر غشاء) است، می‌باشد.

نیروی محرکه می‌تواند گرادیان فشاری ( $\Delta P$ )، غلظتی ( $\Delta C$ )، پتانسیل الکتریکی ( $\Delta E$ ) یا دمایی ( $\Delta T$ ) باشد. در جدول ۱-۲ نیروی محرکه‌ی فرآیندهای غشایی مختلف به طور خلاصه ارائه شده است [۳].

جدول ۱-۲: برخی از فرآیندهای غشایی به همراه نیروی محرکه‌ی آن‌ها [۳]

نیرو محرکه	فاز ۲ (تراوه)	فاز ۱ (خوراک)	فرآیند غشایی
$\Delta P$	L	L	میکرو فیلتراسیون
$\Delta P$	L	L	اولترا فیلتراسیون
$\Delta P$	L	L	نانو فیلتراسیون
$\Delta P$	L	L	اسمز معکوس
$\Delta P$	G	G	جداسازی گازی
$\Delta P$	G	G	تراوش بخار
$\Delta P$	G	L	تراوش تبخیری
$\Delta E$	L	L	الکترو دیالیز