



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی شیمی

## ساخت و مشخصه یابی غشا سرامیکی مسطح نانو حفره با استفاده از روش قالبریزی ژلی اصلاح شده

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

حمیده اسکندری

اساتید راهنما

دکتر احمد محب

دکتر سید غلامرضا اعتماد

بهار ۱۳۹۰

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	هشت
چکیده.....	۱
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۱-۱ کلیات.....	۲
۲-۱ ساخت غشاهای سرامیکی با استفاده از روش قالب‌ریزی ژلی.....	۳
۳-۱ هدف پژوهش.....	۴
<b>فصل دوم: غشا و فرایندهای غشایی</b>	
۱-۲ مقدمه.....	۶
۲-۲ مفاهیم کلی.....	۷
۱-۲-۲ تاریخچه پیدایش و استفاده از غشا.....	۷
۲-۲-۲ تعریف غشا.....	۹
۳-۲ تقسیم‌بندی فرایندهای غشایی بر اساس نیروی محرکه.....	۱۰
۱-۳-۲ مایکروفلتراسیون.....	۱۱
۲-۳-۲ اولترافیلتراسیون.....	۱۱
۳-۳-۲ نانو فیلتراسیون و اسمز معکوس.....	۱۲
۴-۳-۲ الکترودیالیز.....	۱۲
۵-۳-۲ دیالیز.....	۱۲
۶-۳-۲ جداسازی گازی.....	۱۲
۷-۳-۲ تراوش بخار و تراوش تبخیری.....	۱۳
۴-۲ تقسیم‌بندی غشاها بر اساس ریز ساختار.....	۱۳
۱-۴-۲ غشاهای متخلخل.....	۱۴
۲-۴-۲ غشاهای متراکم.....	۱۵
۳-۴-۲ غشاهای حامل.....	۱۵
۴-۴-۲ غشاهای متقارن و نامتقارن.....	۱۶
۵-۲ تقسیم‌بندی غشاها بر اساس جنس آنها.....	۱۷
۱-۵-۲ غشاهای آلی.....	۱۸
۲-۵-۲ غشاهای غیر آلی.....	۱۹
<b>فصل سوم: غشاهای سرامیکی</b>	
۱-۳ غشاهای سرامیکی.....	۲۲

صفحه	عنوان
۲۳	۲-۳ : روشهای ساخت غشاهای سرامیکی ..... هشت
۲۴	۱-۲-۳ : حک اثر .....
۲۴	۲-۲-۳ : اکستروژن .....
۲۴	۳-۲-۳ : اکسیداسیون آندی .....
۲۵	۴-۲-۳ : ریخته گری نواری .....
۲۵	۵-۲-۳ : قالبگیری فشاری .....
۲۵	۶-۲-۳ : قالبریزی دوغابی .....
۲۶	۷-۲-۳ : قالبریزی تزریقی .....
۲۷	۸-۲-۳ : روش سل ژل .....
۲۹	۹-۲-۳ : قالبریزی ژلی .....
۲۹	۳-۳ : فرایند قالبریزی ژل .....
۳۰	۱-۳-۳ : انواع قالبریزی ژل .....
۳۳	۲-۳-۳ : مرور مقالات .....
۳۸	۴-۳ : تشکیل فیلم با حفره‌هایی در ابعاد نانو .....
۳۹	۱-۴-۳ : روش پوشش دهی چرخشی .....
۴۰	۲-۴-۳ : روش پوشش دهی غوطه وری .....
۴۱	۵-۳ : رئولوژی و پایداری سوسپانسیون‌های سرامیکی در فرایند قالبریزی ژل .....
۴۳	۱-۵-۳ : پایداری الکترواستاتیکی .....
۴۵	۲-۵-۳ : پایداری فضایی .....
۴۵	۳-۵-۳ : پایداری الکتروفضایی .....
۴۷	۴-۵-۳ : رئولوژی سوسپانسیون ها .....
۵۰	۶-۳ : بررسی رفتار ژل شدن .....
۵۰	۷-۳ : خشک کردن قطعات خام ژل ریزی شده .....
۵۱	۸-۳ : خروج حامل پلیمری .....
۵۲	۱-۸-۳ : تخریب حرارتی .....
۵۴	۲-۸-۳ : تخریب اکسایشی .....
۵۵	۳-۸-۳ : تبخیر .....
۵۵	۴-۸-۳ : استخراج حلال .....
۵۵	۵-۸-۳ : معایب قابل پیش بینی هنگام خروج حامل .....
۵۵	۹-۳ : تف جوشی .....
۵۶	۱-۹-۳ : ساز و کار تف جوشی .....

۵۸.....	: نحوه رشد دانه ها.....	۲-۹-۳
۵۹.....	: اثر جو و دما و زمان در عملیات تف جوشی.....	۳-۹-۳
<b>صفحه</b>	<b>عنوان</b>	
۶۰.....	: عوامل کمکی در عملیات تف جوشی.....	۴-۹-۳
۶۰.....	: طراحی آزمایش.....	۱۰-۳
۶۱.....	: تاریخچه استفاده از طراحی آزمایش.....	۱-۱۰-۳
۶۱.....	: کاربردها و فوائد طراحی آزمایش.....	۲-۱۰-۳
۶۲.....	: تعاریف و اصطلاحات.....	۳-۱۰-۳
۶۳.....	: مراحل طراحی آزمایش.....	۴-۱۰-۳
۶۵.....	: انواع طراحی آزمایش.....	۵-۱۰-۳

**فصل چهارم: مواد و روشها**

۷۰.....	: مقدمه.....	۱-۴
۷۰.....	: مواد به کار رفته.....	۲-۴
۷۱.....	: پودر آلومینای فعال.....	۱-۲-۴
۷۲.....	: عامل پراکنده کننده.....	۲-۲-۴
۷۳.....	: چسب.....	۳-۲-۴
۷۳.....	: پلی اتیلن گلاکول.....	۴-۲-۴
۷۴.....	: تجهیزات.....	۳-۴
۷۴.....	: مراحل ساخت پایه.....	۴-۴
۷۵.....	: تهیه قالب مورد نیاز جهت ساخت پایه.....	۱-۴-۴
۷۶.....	: بهینه کردن مقدار عامل پراکنده کننده.....	۲-۴-۴
۷۷.....	: ساخت سوسپانسیون و قالبگیری آن.....	۳-۴-۴
۷۷.....	: خشک کردن قطعات خام ژل ریزی شده در محلول مایع خشک کننده.....	۴-۴-۴
۷۸.....	: تف جوشی.....	۵-۴-۴
۷۸.....	: لایه نشانی و اصلاح سطح به روش غوطه وری.....	۵-۴
۷۹.....	: اعمال روش تاگوجی در پژوهش حاضر.....	۶-۴
۸۰.....	: مشخصه یابی ساختار.....	۷-۴
۸۲.....	: ساخت سل جهت انجام آزمایشات جداسازی.....	۸-۴
۸۴.....	: انجام آزمایشات جداسازی.....	۹-۴

**فصل پنجم: نتایج و بحث**

۸۶.....	: مقدمه.....	۱-۵
۸۶.....	: نتایج آزمایشات ساخت پایه.....	۲-۵
۸۶.....	: نتایج آزمون ته نشینی.....	۱-۲-۵

نتایج آزمایش‌های بررسی اثر میزان جامد بارگذاری شده بر روی میزان تخلخل.....	۲-۲-۵	۸۸
نتایج آزمایش‌های بررسی اثر اندازه پودر بارگذاری شده بر روی میزان تخلخل.....	۳-۲-۵	۹۰
<b>عنوان</b>		
<b>صفحه</b>		
نتایج آزمایشات بررسی اثر دمای پخت ده خل.....	۴-۲-۵	۹۱
نتایج آزمایشات بررسی اثر افزایش ژلا' تخلخل.....	۵-۲-۵	۹۲
نتایج آزمایشات بررسی اثر دمای پخت بر روی میزان جمع شدگی.....	۶-۲-۵	۹۳
نتایج آزمایشات بررسی اثر وزن مولکولی PEG بر روی زمان خشک شدن اولیه.....	۷-۲-۵	۹۳
نتایج آزمایشات بررسی اثر درصد PEG بر زمان خشک شدن اولیه.....	۸-۲-۵	۹۴
بررسی ساختار پایه غشا سرامیکی ساخته شده با استفاده از تصاویر SEM.....	۹-۲-۵	۹۵
نتایج آزمایشات مربوط به اصلاح سطح و لایه نشانی به روش غوطه وری.....	۳-۵	۹۶
تعیین ضخامت لایه های تشکیل شده در اثر لایه نشانی.....	۱-۳-۵	۹۷
بهینه سازی میزان پس زنی با کاربرد روش تاگوچی.....	۲-۳-۵	۹۸
بهینه سازی میزان فلاکس با کاربرد روش تاگوچی.....	۳-۳-۵	۱۰۰
تعیین MWCO و تخمین اندازه حفرات غشاهای ساخته شده.....	۴-۳-۵	۱۰۳
بررسی ساختار غشا سرامیکی ساخته شده با استفاده از تصاویر SEM.....	۵-۳-۵	۱۰۴
<b>فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>		
نتیجه گیری.....	۱-۶	۱۰۶
پیشنهادات.....	۲-۶	۱۰۷
مراجع.....		۱۰۹

### فهرست اشکال

<b>عنوان</b>		
<b>صفحه</b>		
شکل (۱-۲) شمایی کلی از جداسازی غشایی.....		۹
شکل (۲-۲): نمودارهای شماتیکی غشاهای متخلخل و غیر متخلخل.....		۱۵
شکل (۳-۲): نمودار برش مقطعی غشاهای متقارن.....		۱۷
شکل (۴-۲): تقسیم بندی انواع غشاها بر اساس جنس آنها.....		۱۷
شکل (۱-۳): انواع مختلف فرایند سل ژل: الف- روش کلونیدی به روش پلیمری.....		۲۸
شکل (۲-۳): نمودار کلی فرایند قالب‌ریزی ژل.....		۲۹
شکل (۳-۳): شمای کلی از روش کار پوشش دهی چرخشی.....		۴۰
شکل (۴-۳): نمایش مراحل فرایند پوشش دهی غوطه‌وری به صورت شماتیک.....		۴۱

شکل (۳-۵ الف): پایداری الکترواستاتیکی ذرات سرامیکی با بار منفی	۴۲
شکل (۳-۵ ب): پایداری الکتروفضایی ذرات سرامیکی	۴۳
شکل (۳-۶): تغییرات پتانسیل زتا با pH برای سرامیک‌های اکسیدی	۴۴
شکل (۳-۷): نمایشی از تفکیک یونی نمک سدیمی پلی متا کریلیک اسید در آب	۴۶
<b>عنوان</b>	
شکل (۳-۸): تغییر ترکیب درصد گروه‌های عاملی تفکیک شده نمک سدیم PMAA در برابر تغییرات pH	۴۶
شکل (۳-۹): طبقه‌بندی رفتار رئولوژیکی در برش پایا	۴۸
شکل (۳-۱۰): اثر مقدار پلی آکریلیک اسید بر روی گرانشی	۴۹
شکل (۳-۱۱): مدل پیشنهاد شده برای مرحله اول فرایند تفجوشی	۵۷
شکل (۳-۱۲): مراحل روش تاگوشی	۶۸
شکل (۴-۱): ساختار شیمیائی ژلاتین	۷۳
شکل (۴-۲): ساختار شیمیایی پلی اتیلن گلاکول	۷۴
شکل (۴-۳): تصویر قالب ساخته شده برای ساخت پایه‌ی غشا سرامیکی	۷۶
شکل (۴-۴): نمای شماتیک از دستگاه مورد استفاده جهت عملیات غوطه وری	۷۸
شکل (۴-۵): نمودار رابطه بین MWCO و اندازه متوسط حفرات	۸۲
شکل (۴-۶): سل ساخته شده برای آزمون جداسازی غشاها در حالت باز	۸۳
شکل (۴-۷): سل ساخته شده برای آزمون جداسازی غشاها در حال بسته	۸۳
شکل (۴-۸): نمایی شماتیک از سل ساخته شده جهت انجام آزمون جداسازی	۸۳
شکل (۴-۹): شکل شماتیکی از سامانه جداسازی به کار رفته در این پژوهش	۸۴
شکل (۵-۱): اثر میزان عامل پراکنده ساز بر ارتفاع رسوب برای سوسپانسیونی با غلظت ۴۰٪ وزنی آلومینا	۸۷
شکل (۵-۲): اثر میزان عامل پراکنده ساز بر ارتفاع رسوب برای سوسپانسیونی با غلظت ۵۰٪ وزنی آلومینا	۸۷
شکل (۵-۳): اثر میزان عامل پراکنده ساز بر ارتفاع رسوب برای سوسپانسیونی با غلظت ۵۵٪ وزنی آلومینا	۸۸
شکل (۵-۴): تاثیر میزان بارگذاری جامد با اندازه ۳ میکرون بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی	۸۹
شکل (۵-۵): تاثیر میزان بارگذاری جامد با اندازه ۴ میکرون بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی	۸۹
شکل (۵-۶): تاثیر میزان بارگذاری جامد با اندازه ۵ میکرون بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی	۸۹
شکل (۵-۷): تاثیر اندازه پودر سرامیک بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی با میزان بارگذاری ۴۰٪	۹۰
شکل (۵-۸): تاثیر اندازه پودر سرامیک بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی با میزان بارگذاری ۵۰٪	۹۰
شکل (۵-۹): تاثیر اندازه پودر سرامیک بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی با میزان بارگذاری ۵۵٪	۹۱
شکل (۵-۱۰): تاثیر دمای پخت بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی با اندازه ذره ۳ میکرون و میزان بارگذاری ۴۰٪	۹۱
شکل (۵-۱۱): تاثیر میزان ژلاتین بر روی میزان تخلخل پایه غشا سرامیکی با اندازه ذره ۳ میکرون و میزان بارگذاری ۴۰٪	۹۲
شکل (۵-۱۲): تاثیر دمای پخت بر روی میزان جمع شدگی پایه غشا سرامیکی با اندازه ذره ۳ میکرون و میزان بارگذاری ۴۰٪	۹۳
شکل (۵-۱۳): اثر افزایش وزن مولکولی PEG مورد استفاده در محلول مایع خشک کننده بر زمان خشک شدن اولیه	۹۴
شکل (۵-۱۴): اثر افزایش درصد PEG مورد استفاده در محلول مایع خشک کننده بر زمان خشک شدن اولیه	۹۵

شکل (۵-۱۵): تصویر SEM سطح مقطع عرضی پایه ساخته شده با پودر ۳ میکرومتر و سوسپانسیون ۴۰٪.....	۹۶
شکل (۵-۱۶): تصویر SEM سطح بیرونی پایه ساخته شده با پودر ۳ میکرومتر و سوسپانسیون ۴۰٪.....	۹۶
شکل (۵-۱۷): اثر عوامل مورد بررسی بر مقدار S/N برای نتایج پس زنی.....	۹۹
شکل (۵-۱۸): درصد اثر متغیرهای مختلف برای بهینه سازی میزان پس زنی بر اساس آنالیز واریانس.....	۱۰۰
شکل (۵-۱۹): اثر عوامل مورد بررسی بر مقدار S/N برای نتایج فلاکس.....	۱۰۱
<b>عنوان</b>	<b>صفحه</b>
شکل (۵-۲۰): درصد اثر متغیرهای مختلف برای بهینه سازی میزان فلاکس بر اساس آنالیز واریانس.....	۱۰۲
شکل (۵-۲۱): تصویر SEM سطح روئی غشا با سوسپانسیون دوازده شدن از سوسپانسیون ۷۲ میلیمتر بر ثانیه، زمان ماند ۱۰ ثانیه و ۲ بار لایه نشانی.....	۱۰۵
شکل (۵-۲۲): تصویر SEM سطح مقطع عرضی غشا با سوسپانسیون ۲۵٪، سرعت خارج شدن از سوسپانسیون ۷۲ میلیمتر بر ثانیه، زمان ماند ۱۰ ثانیه و ۲ بار لایه نشانی.....	۱۰۵

### فهرست جداول

<b>عنوان</b>	<b>صفحه</b>
جدول (۲-۱): مزایا و معایب غشاهای غیر آلی در مقایسه با غشاهای پلیمری.....	۱۹
جدول (۳-۱): مزایا و معایب غشاهای سرامیکی.....	۲۳
جدول (۳-۲): مزایا و معایب روش قالب‌ریزی نسبت به روش های پیشرفته و مرسوم شکل دهی سرامیکهای مهندسی.....	۳۲
جدول (۳-۳): نقطه همباری، (IEP)، اسمی بعضی اکسیدها در آب.....	۴۴
جدول (۳-۴): عوامل کنترل کننده گرانروی سوسپانسیون‌ها.....	۴۸
جدول (۳-۵): مسیر حرکت اتم‌ها در مرحله اول عملیات تف‌جوشی.....	۵۹
جدول (۴-۱): خصوصیات مواد مورد استفاده.....	۷۱
جدول (۴-۲): ترکیب شیمیایی پودرهای $\alpha$ -آلومینای مورد استفاده.....	۷۲
جدول (۴-۳): عوامل و سطوح استفاده شده در آزمایش.....	۷۹
جدول (۴-۴): آرایه اصلاح شده L تاگوچی برای پژوهش حاضر.....	۷۹
جدول (۵-۱): ضخامت لایه نشانده شده بر روی پایه سرامیکی با روش پوشش دهی غوطه وری طبق جدول تاگوچی.....	۹۷
جدول (۵-۲): مقادیر اندازه گیری شده میزان پس زنی در جداسازی PEG از آب و مقدار S/N برای آزمایشات جدول تاگوچی.....	۹۸
جدول (۵-۳): آنالیز واریانس برای نتایج پس زنی، بر حسب مقادیر S/N.....	۹۹
جدول (۵-۴): میزان فلاکس اندازه گیری شده در جداسازی PEG از آب و مقدار S/N برای آزمایشات جدول تاگوچی.....	۱۰۱
جدول (۵-۵): آنالیز واریانس برای نتایج فلاکس بر حسب مقادیر S/N.....	۱۰۲
جدول (۵-۶): مقایسه میزان پس زنی غشاها در دو آزمون جداسازی PEG1000 و PEG6000 از آب برای غشاهای سه لایه.....	۱۰۴

## سیزده

## چکیده

در بسیاری از علوم و صنایع، جداسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با توجه به توسعه فناوری و همچنین نیاز بشر به ترکیبات جدیدتر و در نتیجه تولید مواد جدید به روش‌های متنوع، روش‌های گوناگون جداسازی هر روزه تکمیل و تصحیح می‌شوند و انتخاب شیوه مناسب به متغیرهایی مثل طبیعت اجزای سازنده مخلوط، حجم محلولی که باید تصفیه شود، درجه جداسازی مورد نیاز، هزینه فرایند (خصوصاً در عملیات صنعتی با ابعاد بالا) و مسائل زیست محیطی بستگی دارد و در بیشتر موارد غشا و فرایند غشایی، انتخابی بسیار مناسب است.

هدف از انجام این پژوهش ساخت غشای سرامیکی مسطح نانو حفره با استفاده از پلیمرهای طبیعی و بی‌خطر به عنوان عامل ژل‌کننده در فرایند قالب‌ریزی ژلی و بررسی عوامل مؤثر در این فرایند می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به شناخت نسبت به فرایند و عوامل تأثیرگذار و همچنین استفاده از تجربیات دیگران، عوامل تأثیرگذار نظیر دمای پخت، اندازه متوسط ذرات پودر، میزان جامد در دوغاب و میزان عامل ژل‌کننده، شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، در مرحله‌ی خشک کردن پایه‌ها، از روش جدید محلول مایع خشک‌کننده استفاده شده است و اثر وزن مولکولی و غلظت PEG بر زمان خشک شدن پایه‌ها در این روش مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها برای اصلاح منافذ سطحی از پوشش دهی به روش غوطه‌وری استفاده شده است و عواملی نظیر غلظت سوسپانسیون، زمان غوطه‌وری در سوسپانسیون و سرعت بالا کشیدن از سوسپانسیون و تعداد لایه‌های پوشش داده شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مرحله به منظور کاهش تعداد آزمایشات، تخمین شرایط بهینه و تعیین اهمیت نسبی عوامل مستقل، از روش طراحی آزمایشات تاگوشی استفاده شده است. نهایتاً کارایی غشاها در جداسازی پلی‌اتیلن گلاکول از آب آزمایش شده است و اندازه متوسط حفرات برآورد شده است. بر اساس نتایج حاصل، مقادیر



بدست آمده برای پایه غشا سرامیکی بهینه عبارتست از ۰/۴۰٪ وزنی میزان بارگذاری پودر سرامیک، ۵٪ وزنی ژلاتین و دمای پخت ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد. همچنین در مورد بخش پوشش دهی و اصلاح سطح غشا، از محلول PEG برای انجام آزمون جداسازی استفاده شد و بیشترین میزان پس زنی در جداسازی PEG10000 از آب با مقدار ۰/۹۸ در غشایی پوشش داده شده با شرایط غلظت سوسپانسیون ۰/۲۵٪، زمان غوطه وری ۳۰ ثانیه، سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه و با سه بار لایه نشانی بدست آمد و غشاء لایه نشانی شده با سوسپانسیون ۰/۲۵٪، زمان غوطه وری ۲۰ ثانیه، سرعت بالا کشیدن ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه و یک بار لایه نشانی، بیشترین فلاکس را به میزان  $(10^6 \times \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s})$  ۴/۰۲ داشت. علاوه بر موارد فوق غشا مطلوب در شرایط عملیاتی (بیشترین فلاکس ممکن به همراه حداقل پس زنی ۹۰ درصد) با شرایط سوسپانسیون ۰/۲۵٪، زمان غوطه وری ۳۰ ثانیه، سرعت بالا کشیدن ۳۶ میلی‌متر بر دقیقه و یک بار لایه نشانی بدست آمد که از نکات قابل تعمق در مورد این غشا این بود که این شرایط تنها با یکبار لایه نشانی محقق شد.

**کلمات کلیدی:** غشا سرامیکی مسطح، ژلاتین، قالب‌ریزی ژلی، محلول مایع خشک کننده، پوشش دهی غوطه‌وری، تاگوچی

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ کلیات

رقابت فراینده جهانی در تولید، صنایع را مجبور به بهینه سازی طراحی واحدهای موجود نموده است. در نتیجه طراحی واحدهای جدید و یا سازمان دهی مجدد واحدهای موجود، اهمیت روبه رشدی در صنایع داشته است. در این میان فرآیندهای جداسازی و به ویژه جداسازی توسط فرآیندهای غشایی در سالهای اخیر توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. فناوری های غشایی نسبت به سایر فرآیندهای جداسازی معمول مزایای زیر را دارا هستند:

انتخاب گری در این فرآیندها بالا است.

مصرف انرژی در فرآیندهای غشایی پایین می باشد.

نسبت هزینه به کارایی در این فرآیندها متعادل است.

فرآیندهای غشایی قابلیت طراحی به صورت مدول را دارند [۱].

مطالعه قانونمند روی فرآیندهای غشایی را باید در قرن ۱۸ جستجو نمود اما تا قرن ۱۹ و حتی اوایل قرن ۲۰، غشاها هنوز در صنایع جایی نداشتند. غشاء می تواند به صورت یک جداکننده نیمه تراوای فعال یا غیر فعال تعریف شود که تحت یک نیروی محرکه معین اجازه عبور انتخابی یک یا بیش از یک گونه از یک مخلوط گازی و یا محلول مایع را از درون خود می دهد.

جریانی که در پشت غشاء می ماند به جریان باقیمانده<sup>۱</sup> و جریان عبوری از آن به جریان تراوش<sup>۲</sup> کرده معروف است. از دهه ۶۰ بازار غشاها به وسیله غشاهای پلیمری اشغال شده بود که کاربردهای زیادی در نمک زدایی آب دریا، فرآوری غذاها و نوشیدنی ها تا جداسازی مخلوط های مایع با اجزاء دارای نقاط جوش نزدیک به هم، جداسازی گازی و همودیالیز داشته اند. اگرچه پژوهش های غشایی هنوز بر روی غشاهای پلیمری متمرکز است اما یکی از مهمترین اهداف پژوهشی در علم غشاها در سال های اخیر گسترش غشاهای معدنی با اندازه حفرات در حد زیر میکرونی بوده است. به ویژه استفاده از این نوع غشاها در فرآیندهایی که شرایط دما، فشار و یا محیط شیمیایی آنها امکان استفاده از غشاهای پلیمری را (به دلیل عدم پایداری آنها در این شرایط) محدود می کند، بسیار مورد توجه بوده است. از میان غشاهای غیرآلی، غشاهای سرامیکی به خاطر خصوصیات منحصر به فرد سرامیک ها (خاصیت غربالگری مولکولی و پایداری گرمایی و شیمیایی و...) در دهه های اخیر توسط بسیاری از گروه های پژوهشی و صنعتی مورد توجه ویژه قرار گرفته اند [۲].

## ۱-۲ ساخت غشا سرامیکی با استفاده از روش قالب ریزی ژلی<sup>۳</sup>

برای ساخت غشاهای سرامیکی روش های مختلفی وجود دارد که در طی دهه اخیر روش جدیدتری به نام قالب ریزی ژلی مورد توجه قرار گرفته است که در آن فرایند ژل شدن با سازوکار طبیعی صورت نمی پذیرد بلکه به کمک پدیده ای به نام پلیمریزاسیون درجا<sup>۴</sup> فرایند ژل شدن را تسریع می کنند به طوری که عمل ژل شدن به جای چندین ساعت در عرض چندین دقیقه صورت می پذیرد [۳]. روش کلی کار در فرایند قالب ریزی ژلی به این صورت است که ابتدا پودر سرامیک را با حلال مناسب مخلوط کرده و سپس یک مونومر آلی مناسب به همراه یک آغازگر و شتاب دهنده به محلول اضافه

<sup>۱</sup> Retentate

<sup>۲</sup> Permeate

<sup>۳</sup> Gel-casting

<sup>۴</sup> In-situ polymerization

می‌شود در این صورت فرایند پلیمریزاسیون درجا به کمک مونومر و آغازگر شروع شده و محلول حالت ژله‌ای به خود می‌گیرد. در این هنگام قالب ریزی انجام می‌گیرد و پس از آن به کمک حرارت دهی در کوره، پلیمر موجود سوخته و یک بدنه متخلخل از سرامیک حاصل می‌گردد[۴].

جینی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰، برای اولین بار از لفظ قالب‌ریزی ژل استفاده کرد[۵]. او با استفاده از مونومرهای قابل حل در حلال‌های آلی و ایجاد مخلوطی روان<sup>۲</sup> از پودر سرامیک و محلول مونومری و انتقال آنها به قالب و حرارت دادن، توانست پودر سرامیکی را در شبکه اتصال عرضی یافته‌ای از پلیمر تثبیت کند. قطعه خام بدست آمده از این روش قابلیت ماشینکاری در حالت خام را داشت[۵]. علاوه بر این اوماته<sup>۳</sup> و همکارانش در همان سال، به دلیل مشکلاتی که در خشک کردن و خروج حلال‌های آلی از قطعه قالب‌ریزی شده وجود داشت از قالب‌ریزی ژل آبی استفاده کردند[۶]. در سال‌های بعد نیز پژوهش‌های فراوانی در این زمینه انجام گرفته است و در اکثر این پژوهش‌ها از موادی مانند مونومراکریل آمید<sup>۴</sup> و همچنین متیلن بیس اکریل آمید<sup>۵</sup> که یک مونومر دو ظرفیتی است به عنوان عامل اتصال دهنده‌ی عرضی (شبکه ساز)، آمونیوم پرسولفات<sup>۶</sup> به عنوان آغازگر و تترامتیل اتیلن دی آمین<sup>۷</sup> به عنوان کاتالیست استفاده شده است. ولی این مواد و روش‌ها بی نقص نیستند و مشکلاتی را دارا می‌باشند، به طور مثال عامل بسیار مهمی که در این زمینه مطرح است، سمی و خطرناک بودن مواد مورد استفاده در این روش برای انسان است. متداولترین مونومر مورد استفاده در این فرایند آکریل آمید می‌باشد. این ماده با وجود آنکه برای این فرایند بسیار مناسب است، ماده‌ای سمی است و برای انسان بسیار خطرناک می‌باشد. این ماده در بدن تجزیه شده و ماده‌ای به نام گلاسید آمید را تولید کرده که می‌تواند با اثر بر روی DNA و ایجاد جهش در ژن‌ها باعث بروز سرطان و آسیب سیستم عصبی گردد، لذا مناسب است که بتوانیم از پلیمرهای طبیعی که بی خطر هستند یا پلیمرهای سنتزی کم خطر استفاده کنیم.

### ۳-۱ هدف پژوهش

هدف پژوهش حاضر استفاده از پلیمرهای طبیعی و بی خطر به عنوان عنوان عامل ژل کننده در فرایند قالب ریزی ژلی و بررسی متغیرهای مؤثر در این فرایند می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر، متغیرهای تاثیرگذار نظیر دمای پخت، اندازه متوسط ذرات پودر<sup>۸</sup>، میزان جامد در دوغاب<sup>۹</sup> و میزان عامل ژل کننده، شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در پژوهش‌های

<sup>۱</sup> Janney

<sup>۲</sup> Slurry

<sup>۳</sup> Omatete

<sup>۴</sup> Acrylamide

<sup>۵</sup> Methylene Bisacrylamide

<sup>۶</sup> Ammonium Persulfate

<sup>۷</sup> TetramethylethyleneDiamine

<sup>۸</sup> Median Particle Size

<sup>۹</sup> Solid Loading

قبلی که انجام شده است، بررسی این متغیرها کمتر مورد توجه قرار گرفته اند و بیشتر به بررسی خواص رئولوژیکی دوغاب پرداخته اند و اثر متغیرهای فوق بر مورفولوژی<sup>۱</sup> ساختار تشکیل شده به طور کامل و هم‌زمان مورد توجه قرار نگرفته است. هم‌زمان با این آزمایشات، تعدادی آزمایش برای تعیین مقدار بهینه‌ی عامل پراکنده ساز داروان<sup>۲</sup> که ماهیتاً یک محلول آبی ۴۰٪ وزنی از آمونیوم پلی اکریلات می باشد، انجام شده است. علاوه بر این در مرحله‌ی خشک کردن پایه‌ها از روش جدید محلول مایع خشک کننده استفاده شده است و اثر تعدادی از متغیرهای مؤثر در این روش مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها برای اصلاح منافذ سطحی از پوشش دهی به روش غوطه وری<sup>۳</sup> استفاده شده است و متغیرهایی نظیر غلظت سوسپانسیون، زمان غوطه وری<sup>۴</sup> در سوسپانسیون و سرعت بالا کشیدن<sup>۵</sup> از سوسپانسیون و تعداد لایه-های پوشش داده شده مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مرحله به منظور کاهش تعداد آزمایشات، تخمین شرایط بهینه و تعیین اهمیت نسبی متغیرهای مستقل، از روش طراحی آزمایشات تاگوچی<sup>۶</sup> استفاده شده است. نهایتاً کارایی غشاهای جداسازی پلی اتیلن گلیکول<sup>۷</sup> از آب آزمایش شده است و اندازه متوسط حفرات برآورد شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل در این پایان‌نامه ارائه می گردد.

در فصل دوم توضیحاتی در مورد غشاهای، انواع آن از نظر جنس و ساختار، انواع فرایندهای غشایی و خواص غشاهای ارائه شده است. فصل سوم به بررسی غشاهای سرامیکی و روش‌های اصلی ساخت غشا سرامیکی می پردازد و سپس فرایند قالب ریزی ژلی و متغیرهای مؤثر در آن، به تفصیل توضیح داده خواهد شد و پس از آن، در مورد روش‌های اصلاح منافذ سطحی و به طور خاص روش پوشش دهی غوطه وری و مسائل مربوط به ساخت غشا نظیر خشک شدن و پخت آن مطالبی آورده خواهد شد. در فصل چهارم، مشخصات مواد، دستگاه‌های به کار رفته، روش انجام آزمایشات و روش‌های مختلف مشخصه‌یابی غشاء ذکر شده اند و ارائه نتایج به دست آمده از آزمایشات و بررسی آنها در فصل پنجم صورت گرفته است. نهایتاً فصل ششم به نتیجه‌گیری کلی و ارائه پیشنهادات برای ادامه کار تخصیص یافته است.

---

<sup>۱</sup>Morphology

<sup>۲</sup>Darvan 821

<sup>۳</sup>Dip-Coating

<sup>۴</sup>Dipping Time

<sup>۵</sup>Withdrawal Speed

<sup>۶</sup>Taguchi

<sup>۷</sup>Poly Ethylene Glycol (PEG)

## فصل دوم

### غشاها و فرآیندهای غشایی

#### ۲-۱- مقدمه

در بسیاری از علوم و صنایع، جداسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری‌که در اکثر صنایع محصول حاصله از فرایندهای مختلف، غالباً نیازمند تفکیک و تخلیص است و در صورت عدم جداسازی مواد مختلف از محصول، کیفیت محصول کاهش خواهد یافت. در بسیاری موارد عملیات جداسازی به منظور بدست آوردن اجزای یک مخلوط که هر کدام می‌توانند با ارزش باشند، به کار برده می‌شوند. روش‌های معمول جداسازی بکار گرفته شده در صنایع مختلف هر یک محاسن، معایب و محدودیت‌هایی دارند. تمامی روش‌های جداسازی در همه حالات قابل استفاده نبوده و باید بهترین

روش‌ها را با در نظر قرار دادن کلیه محدودیت‌ها و ملاحظات انتخاب نمود. با توجه به توسعه فناوری و همچنین نیاز بشر به ترکیبات جدیدتر و در نتیجه تولید مواد جدید به روش‌های متنوع، روش‌های گوناگون جداسازی هر روزه تکمیل و تصحیح می‌شوند و یافتن شیوه‌های جدید جداسازی همگام با گسترش نیازها و بهبود روش‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. با این وجود در حالت عمومی برای یک جداسازی خاص بیش از یک راه وجود دارد و انتخاب شیوه مناسب به متغیرهایی مثل طبیعت اجزای سازنده مخلوط، حجم محلولی که باید تصفیه شود، درجه جداسازی مورد نیاز و هزینه فرایند (خصوصاً در عملیات صنعتی با ابعاد بالا) بستگی دارد و در بیشتر موارد غشا و فرایند غشایی، انتخابی بسیار مناسب است [۱].

## ۲-۲- مفاهیم کلی

### ۱-۲-۲ تاریخچه پیدایش و استفاده از غشا

غشا و فرایندهای مرتبط با آن از گذشته‌های بسیار دور مورد استفاده بشریت قرار گرفته است، به‌عنوان مثال: فیلترهای شنی طی سالیان طولانی در تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این روش که در واقع از طبیعت الهام گرفته شده است، لایه‌های مختلف شن با اندازه‌های گوناگون در مسیر عبور آب ناخالص قرار گرفته و ناخالصی‌ها در لابه لای لایه‌ها باقی می‌مانند، بنابراین آب خروجی از فیلتر، آب نسبتاً خالصی می‌باشد. نفوذ آب‌های سطحی به داخل زمین و عبور از لایه‌های مختلف خاک که مانند یک فیلتر عمل می‌نمایند، موجب می‌شود که آب جمع شده در زیر زمین نسبتاً خالص و قابل استفاده باشد.

فکر ایجاد یک فیلتر که بتواند ذرات کوچک را از آب یا هر سیال دیگر جدا نماید، به گذشته‌های دور برمیگردد. صافی‌های مختلف صنعتی و خانگی ساخته شده از مواد مختلف همچون فلز، پارچه، کاغذ و غیره نمایش به ثمر رسیدن این فکر در ادوار مختلف هستند [۴].

مطالعات ابتدایی پدیده‌های غشایی توسط دانشمندان قرن هجدهم انجام شده است ولی در طی قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، غشاها هیچ استفاده صنعتی یا تجاری نداشتند اما به عنوان ابزار آزمایشگاهی برای پیشبرد فرضیه‌های فیزیکی و شیمیایی به کار برده می‌شدند. به عنوان مثال، غشاهایی که توسط تروبه<sup>۱</sup> و ففر<sup>۲</sup> ساخته شده بودند، اولین بار برای اندازه گیری فشار اسمزی به کار گرفته شدند که بعدها در سال ۱۸۸۷ تغییراتی در این غشاها توسط وانتهف<sup>۳</sup> به وجود آمد که

<sup>۱</sup> Traube

<sup>۲</sup> Pfeffer

<sup>۳</sup> Van't Hoff

توانست محلولهای ایده‌ال خیلی رقیق را نیز جداسازی نماید. در همان زمان مفهوم غشای نیمه تراوای انتخاب پذیر توسط ماکسول<sup>۱</sup> و همکارانش در توسعه تئوری سنیتیک گازها بیان شد.

در اوایل پژوهشگران از هر نوع دیافراگمی که در دسترسشان بود، از جمله مئانه خوک، گاو، ماهی و یا روده حیوانات بعنوان غشا استفاده نموده و آزمایش‌های غشایی را انجام می‌دادند. پس از آن غشاهای نیتروسولوزی، به دلیل قابل استفاده بودن مجدد آنها به کار برده شدند و ۲۰ سال بعد از آن، دانشمندان فناوری غشاهای میکرو فیلتراسیون را با استفاده از پلیمر توسعه دادند.

در اولین کاربرد عمومی، در پایان جنگ جهانی دوم غشاها برای آزمون سالم و تمیز بودن آب مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۹۶۰ علم غشاها تا حدودی توسعه یافت اما تنها در آزمایشگاه‌های کوچک و برای کاربردهای خاص در صنعت به کار برده شدند زیرا در آن زمان غشاهای مورد استفاده دارای مشکلات اساسی بودند، به طوری که نمی‌توانستند بطور متداول از آنها در مصارف مختلف استفاده کنند. از جمله مشکلات اساسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

غیر قابل اطمینان بودند،

روش‌های جداسازی توسط آنها به کندی انجام می‌گرفت،

انتخاب پذیری پایینی داشتند،

بسیار گران قیمت بودند.

دانشمندان برای اینکه بتوانند این مشکلات را تا حدودی حل کنند، در طی ۳۰ سال گذشته تلاش‌های زیادی کرده‌اند به طوری که امروزه فرایندهای جداسازی غشایی توسعه چشمگیری داشته است. در سال ۱۹۶۰ غشاهای اسمزی بدون نقص با میزان نفوذ پذیری بالا توسط سوریراجین<sup>۲</sup> ساخته شدند، که این امر فناوری غشاها را به کلی دگرگون ساخت و منجر به سوق یافتن فرایندهای جداسازی غشایی از مقیاس‌های آزمایشگاهی به مقیاس‌های صنعتی شدند. مهمترین خصوصیت این غشاها، این بود که شامل یک لایه داخلی با ضخامت خیلی کم و یک لایه ضخیم بیرونی بودند. لایه داخلی انتخاب پذیر بوده و عملیات جداسازی و لایه ضخیم بیرونی نقش یک محافظ برای لایه داخلی را داشت و همچنین باعث افزایش استحکام مکانیکی غشاها می‌شد. میزان نفوذ پذیری ذرات از اولین غشای اسمزی ۱۰ برابر غشاهای دیگر بود و با ساخت غشاهای اسمزی برگشت پذیر فرایندی به وجود آمد که عملیات نمک زدائی از آب دریا را به خوبی انجام می‌داد. با توسعه کاربردهای صنعتی غشاها این فرایند در علم پزشکی نیز برای فرایندهای جداسازی نظیر ساخت کلیه مصنوعی به کار گرفته شد. امروزه بیش از ۸۰۰۰۰۰ نفر با کلیه مصنوعی زندگی می‌کنند و سالانه بیش از میلیونها نفر تحت عمل جراحی باز قلب قرار می‌گیرند که این نوع طراحی همراه با اکسیژن دهی خون توسط غشا انجام می‌شود.

<sup>۱</sup> Maxwell

<sup>۲</sup> Sourirajane

در سالهای ۱۹۷۰ با به کارگیری غشاهای اولترافیلتراسیون در صنایع لبنی به منظور تغلیظ پروتئین موجود در آب پنی این فرایند توسعه سریعی پیدا نمود [۸]. بسیاری از پلیمرها برای ساخت غشاها مورد آزمایش قرار گرفتند و کارهای پژوهشی فراوانی در این زمینه صورت پذیرفت [۹] و در نتیجه تئوری‌های مربوط به فرایندهای غشایی که با استفاده از فشار کار می‌کنند و نیز جداسازی گازها پایه گذاری گردید و توسعه یافت و مقالات فراوانی در زمینه‌های گوناگون مربوط به غشاها منتشر گردید [۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۲].

از سالهای ۱۹۹۰ به بعد، ساخت و استفاده از غشاها به طور عمده بین سه منطقه آمریکا، اروپا و ژاپن تقسیم شده و آمریکا هنوز بیشترین سهم را در تولید غشاها دارد. هر روزه غشاهای جدیدی ساخته و معرفی می‌شوند و به دلیل مزایای عمده‌ای که غشاهای غیر آلی نسبت به غشاهای آلی دارند (در بخش‌های آتی ارائه می‌شود)، جهت‌گیری تولید غشاها طوری است که به سمت توسعه غشاهای غیر آلی به جای غشاهای آلی می‌رود.

در حال حاضر کارهای پژوهشی زیادی در مراکز مختلف دنیا، روی فناوری‌های نوین ساخت غشاها از جمله غشاهای فیلتراسیون متمرکز شده تا بتوانند کارایی آنها را بالا ببرند. بنابراین انتظار می‌رود با گذشت زمان به تدریج فرایندهای جداسازی غشایی جایگزین سایر روش‌های جداسازی شوند.

#### ۲-۲-۲ تعریف غشا

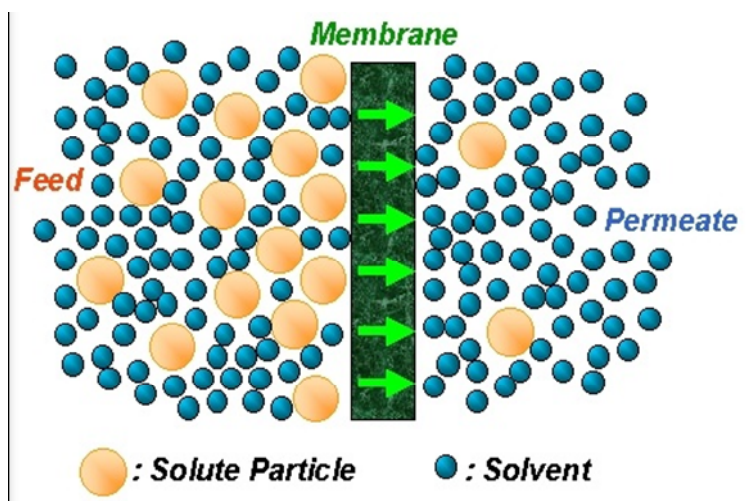
غشا به عنوان یک فاز یا یک مانع که اجزای خوراک به صورت انتخابی از آن عبور می‌کنند، تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر سرعت نفوذ یک گونه شیمیایی در داخل یک غشا کنترل می‌شود. در یک فرایند غشایی عموماً دو فاز وجود دارد که به وسیله فاز سوم (غشا) به طور فیزیکی از یکدیگر جدا شده‌اند و وظیفه غشا کنترل انتقال جرم بین دو فاز را کنترل می‌باشد. در کاربردهای جداسازی هدف عمده این است که یک جز مخلوط آزادانه از غشا عبور نماید به طوری که از نفوذ سایر اجزا جلوگیری شود. به عبارت بهتر یکی از اجزای موجود در مخلوط بیش از سایرین انتقال می‌یابد و غشا نسبت به آن جز انتخابگر<sup>۱</sup> خواهد بود. در این صورت انتقال آن جز از یک فاز به فاز دیگر از طریق غشا انجام خواهد شد. به این ترتیب یکی از فازهای بطور نسبی غنی از آن جز و دیگری از آن تهی می‌گردد. فرایندهایی که بر اساس استفاده از غشاها پایه گذاری شده‌اند، می‌توانند در کاربرد و نیز نیروی محرکه لازم برای انجام جداسازی کاملاً متفاوت باشند. انتقال جرم در طول غشا ممکن است به وسیله نفوذ و یا جابجایی حاصل شود. جابجایی می‌تواند در اثر اختلاف پتانسیل الکتریکی، غلظت، فشار یا درجه حرارت انجام شود. در شکل (۱-۲) شمایی کلی از جداسازی غشایی نشان داده شده است. به آن بخش از خوراک که از غشا عبور می‌کند، فاز نفوذ کرده<sup>۲</sup> و آن قسمتی که نتواند از غشا عبور کند، فاز باقیمانده<sup>۳</sup> می‌گویند. در فرایندهای غشایی هر دو جز می‌توانند به عنوان محصول جداسازی باشند.

<sup>۱</sup> Selective

<sup>۲</sup> Permeate

<sup>۳</sup> Retentive





شکل (۱-۲): شمایی کلی از جداسازی غشایی

به طور خلاصه کارایی اصلی یک غشا به میزان نفوذپذیری و انتخاب پذیری آن بستگی دارد. نفوذپذیری یا دبی عبور کرده از غشا: مقدار ماده‌ای که در واحد سطح در واحد زمان از واحد سطح عبور می‌کند. انتخاب پذیری غشا: به معنی توانایی غشا در جداسازی ماده تراوش یافته از ماده باقیمانده است. برای فرایندهای غشایی، گزینش پذیری معمولاً با ضریب دفع یا ضریب نگه داشته شدن ( $R$ ) بیان می‌شود.

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad 0 < R < 1 \quad (1-2)$$

در رابطه فوق  $C_f$  غلظت خوراک و  $C_p$  غلظت جریان نفوذ کرده است.

$R = 0$  یعنی جداسازی صورت نمی‌گیرد و غلظت جز مورد نظر در جریان‌های عبور کرده و باقیمانده برابر است.

$R = 1$  یعنی جز مورد نظر از غشا عبور نکرده و غلظت آن در جریان عبور کرده صفر است.

### ۲-۳ تقسیم‌بندی فرآیندهای غشایی بر اساس نیرو محرکه

عامل اساسی جداسازی در فرایندهای غشایی اختلاف شدت انتقال اجزا در طول غشا است. انتقال اجزا در اثر حرکت آنها حاصل می‌شود و حرکت هر جز از یک طرف غشا به طرف دیگر آن به علت وجود یک یا چند نیروی محرکه صورت می‌گیرد. نیروی محرکه نتیجه اختلاف پتانسیل شیمیایی یا الکتریکی بین دو فاز است که به وسیله غشا از یکدیگر جدا شده‌اند. گرادیان پتانسیل شیمیایی ممکن است به علت اختلاف غلظت، اختلاف فشار یا هر دو حاصل شود. از اختلاف دما نیز گاه به عنوان نیروی محرکه استفاده می‌شود.

اختلاف فشار بین فازهای موجود در دو طرف غشا باعث ایجاد شار حجمی می‌گردد. در صورتی که اجزای مختلف

دارای نفوذپذیری‌های متفاوتی در طول غشا باشند، از یکدیگر جدا خواهند شد.

اختلاف غلظت بین دو فازی که در طرفین غشا قرار دارند می‌تواند باعث انتقال ماده گردد. در صورتی که ضریب نفوذ و غلظت اجزای مختلف متفاوت باشد، آن دو جز از یکدیگر جدا خواهند شد. اختلاف پتانسیل الکتریکی بین فازها نیز می‌تواند باعث حرکت مواد گردد. اگر اجزای مختلف دارای بارهای متفاوتی باشند تحرک یکسانی نخواهند داشت و در نتیجه از یکدیگر جدا می‌شوند. اختلاف دما در دو فاز موجود در طرفین غشا باعث می‌شود که اجزای فرارتر در طرف گرمتر بخار شده و به طرف دیگر غشا منتقل گردند.

انتقال از میان غشاء، می‌تواند توسط جابجایی یا نفوذ مولکول‌های مجزا صورت گیرد که در اثر گرادیان‌های غلظت، دما، فشار و یا میدان الکتریکی ایجاد می‌شوند. در واقع وقتی یکی از این گرادیان‌ها به عنوان نیرو محرکه، به اجزای یک جریان اعمال شوند، انتقال این اجزاء از میان غشاء، صورت می‌گیرد. البته می‌توانیم گرادیان‌های فشار، غلظت و حتی دما را با کمیت گرادیان پتانسیل شیمیایی ( $\mu$ ) بیان نماییم [۱۳]. بر اساس این که نیرو محرکه برای عبور جریان از غشاء توسط چه عاملی ایجاد شود، فرآیندهای غشایی به صورت مایکرو فیلتراسیون<sup>۱</sup>، اولترافیلتراسیون<sup>۲</sup>، نانوفیلتراسیون<sup>۳</sup>، اسمز معکوس<sup>۴</sup>، دیالیز<sup>۵</sup>، الکترو دیالیز<sup>۶</sup>، تراوش تبخیری<sup>۷</sup> و جداسازی گازی<sup>۸</sup> تقسیم بندی می‌شوند [۱۳-۱۶]. نیرو محرکه برای چهار فرآیند اول اختلاف فشار، نیرو محرکه فرآیندهای تراوش تبخیری و جداسازی گازی اختلاف غلظت یا فعالیت و نیرو محرکه فرآیند الکترو دیالیز اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌باشد [۱۳]. در ادامه به معرفی اجمالی هر یک از فرایندهای نامبرده شده می‌پردازیم.

## ۲-۳-۱ مایکرو فیلتراسیون

معمولاً وقتی اندازه ذرات در حد ۱/۱۰ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد، از این تکنیک استفاده می‌شود [۱۴ و ۱۶]. مکانیسم جداسازی در این فرایند، غربال‌گری مولکولی است که ذرات را منحصراً بر اساس قطر و ابعادشان جدا می‌کند. غشاهای مورد استفاده در فرایند غشاهای متقارن با حفراتی در حدود اندازه ذرات جداشونده می‌باشند، که ضخامت آن‌ها در حدود ۱۰-۱۵۰ میکرومتر است [۱۳ و ۱۴]. غشاهای مایکرو فیلتراسیون از مواد مختلفی ساخته می‌شوند. این مواد می‌توانند مواد آلی (پلیمری) مانند تفلون، پلی پروپیلن، پلی اتیلن، پلی سولفون، استرهای سلولز، پلی آمید و... و یا معدنی مانند آلومینا، اکسید زیرکونیوم و تیتانیوم باشند. از جمله کاربردهای این فرآیند می‌توان به استریلیزاسیون و حذف ذرات مزاحم در تولید

<sup>۱</sup>Micro Filtration

<sup>۲</sup>Ultra Filtration

<sup>۳</sup>Nano Filtration

<sup>۴</sup>Reverse Osmosis

<sup>۵</sup>Dialysis

<sup>۶</sup>Electro Dialysis

<sup>۷</sup>Pervaporation

<sup>۸</sup>Gas Separation

نوشیدنی‌ها و داروها، شفاف سازی آب‌میوه، تولید آب فوق خالص در صنایع شبه رسانا<sup>۱</sup> و تصفیه فاضلاب اشاره نمود [۱۴ و ۱۶].

### ۲-۳-۲ اولترافیلتراسیون

این فرآیند وقتی استفاده می‌شود که ذرات جداشونده، اندازه‌ای کوچکتر از  $0.3$  میکرومتر داشته باشند. اولترافیلتراسیون، اساساً برای تغلیظ ماکرومولکول‌ها استفاده می‌شود، جایی که مولکول‌های بزرگ توسط غشاء نگه‌داشته می‌شوند و مولکول‌های کوچک و یا حلال آزادانه از آن عبور می‌کنند. غشاهای مورد استفاده برای مایکرو و اولترافیلتراسیون و اولترافیلتراسیون، غشاهای متخلخلی هستند که نگهداری ذرات در آن‌ها بر اساس اندازه و شکل ذرات حل شده، نسبت به اندازه منافذ غشاء، تعیین می‌شود و انتقال غشا مستقیماً متناسب با فشار اعمال شده است. اما تفاوت مهم این دو فرآیند این است که غشاهای اولترافیلتراسیون، ساختار نامتقارن، با یک لایه بالایی متراکم‌تر (منافذ کوچکتر و تخلخل سطحی کمتر) و تبعاً مقاومت هیدرودینامیکی بالاتر، دارند. ضخامت لایه بالایی در غشاهای این فرآیند، به طور کلی کمتر از  $1$  میکرومتر است و فلاکس عبوری از غشاء به طور مستقیم با اختلاف فشار اعمال شده مرتبط است. اغلب غشاهای به کار رفته در اولترافیلتراسیون از مواد پلیمری ساخته شده‌اند، اما سرامیک‌هایی از قبیل آلومینا و اکسیدزیرکونیوم نیز، در ساخت غشاهای این فرآیند استفاده می‌شوند. کاربرد غشاهای اولترافیلتراسیون در زمینه صنایع غذایی و لبنیات، صنایع دارویی، نساجی، صنایع کاغذ و چرم و... می‌باشد [۱۴ و ۱۶].

### ۲-۳-۳ نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس

این فرآیندها وقتی استفاده می‌شوند که حل شونده‌هایی با وزن مولکولی پایین مانند نمک‌های معدنی یا مولکول‌های کوچک آلی از قبیل گلوکز و ساکروز باید از حلال جدا شوند. فشارهای به کار رفته در اسمز معکوس در محدوده  $20$  تا  $100$  بار و در نانوفیلتراسیون در محدوده  $10$  تا  $20$  بار هستند. اسمز معکوس کاربردهای گسترده‌ای دارد که به دو صورت کلی خالص سازی حلال (جریان عبوری از غشاء، به عنوان محصول است) و تغلیظ حل شونده، دسته بندی می‌شوند. اغلب، در قسمت خالص سازی، نمک زدایی از آب دریا برای تولید آب آشامیدنی مطرح است. تغلیظ آب‌میوه و شکر و تولید آب خالص نیز از کاربردهای این فرآیند است. نانوفیلتراسیون نیز در نرم سازی آب، حذف ریز آلاینده‌ها و تصفیه فاضلاب کاربرد دارد [۱۴].

### ۲-۳-۴ الکترو دیالیز

نیرو محرکه در این فرآیند از اختلاف پتانسیل الکتریکی تأمین می‌شود. این فرآیند فقط وقتی کاربرد دارد که مولکول‌های جداشونده باردار باشند [۵ و ۱۵]. در این صورت یونها تحت اثر میدان الکتریکی در میان غشاء حرکت نموده و از یک محلول به محلول دیگر منتقل می‌شوند. معمولاً اختلاف ولتاژ به کاررفته در این فرآیند بین ۲-۱ ولت می‌باشد. از جمله کاربردهای الکترودیالیز می‌توان به بازیافت اسیدهای آلی از نمک‌ها، بازیافت فلزات سنگین و تولید آب دیونیزه اشاره نمود [۱۵].

### ۲-۳-۵ دیالیز

دیالیز فرآیندی است که در آن حل شونده از یک سمت غشاء (سمت خوراک) به سمت دیگر آن نفوذ می‌کند و عامل این حرکت و نفوذ، اختلاف غلظت موجود در دو سمت غشاء، می‌باشد. دیالیز اساساً برای جداسازی اجزای با وزن مولکولی پایین، از اجزایی که وزن مولکولی بالاتری دارند، استفاده می‌شود. جداسازی بر مبنای اصل حلالیت- نفوذ صورت می‌گیرد. معمولاً غشاهای مورد استفاده در این فرآیند از جنس پلیمرهای آبدوست، هستند. مهمترین کاربردهای دیالیز شامل همودیالیز ( برداشتن ترکیبات سمی از خون)، نمک‌زدایی از آنزیم‌ها و بازیافت بازهای محلول، در صنعت کاغذ می‌باشد [۱۴]. معمولاً ضخامت غشاهای مورد استفاده در اینجا بین ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر است [۱۳].

### ۲-۳-۶ جداسازی گازی

در این فرآیند، یک جزء از اجزای گازی، در اثر گرادیان فشار از مخلوط جدا می‌شود. در جداسازی گازی از دو نوع غشای کاملاً متفاوت، استفاده می‌شود. یکی غشای متراکم ( غیر متخلخل)، که انتقال در آن توسط مکانسیم حلالیت- نفوذ انجام می‌شود و دیگری غشای متخلخل، که مکانسیم عبور در آن بر اساس اندازه منافذ غشاء، می‌تواند یک یا بیش از یکی از ساز و کارهای نفوذ نودسن، جریان ویسکوز، نفوذ سطحی و یا غربال مولکولی باشد [۱۲ و ۱۳]. کاربرد تجاری این فرآیند در جداسازی هوا ( اکسیژن/نیتروژن)، بازیابی هیدروژن و جداسازی متان و دی‌اکسید کربن می‌باشد [۱۳ و ۱۴ و ۱۶].

### ۲-۳-۷ تراوش بخار و تراوش تبخیری<sup>۱</sup>

تراوش گاز یا بخار، فرآیندی است که در آن جریان پایین دست و بالادست غشاء هردو در حالت بخار یا گاز هستند [۱۳]. این فرآیند شباهت زیادی با تراوش تبخیری که خوراک در آن به صورت مایع است، دارد، با این تفاوت که فلاکس‌ها در تراوش بخار به فشار خوراک بستگی دارند، در حالی که در تراوش تبخیری این گونه نیست [۱۴]. در فرآیند تراوش بخار با توجه به این که خوراک در حالت بخار قرار دارد، هیچ تغییر فازی در حین تراوش اتفاق نمی‌افتد و این

<sup>۱</sup>Prevaporation