

\*

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی شیمی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
<sup>۳</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی شریف  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
(تاریخ دریافت ۸۷/۱۲/۱۸ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۸/۱۲ ، تاریخ تصویب ۸۸/۱۱/۲۵)

امروزه از فرایندهای غشایی به عنوان یک روش متداول برای تولید نیتروژن با خلوص بالا استفاده می‌شود. فرآیند جداسازی هوا با استفاده از غشا یک فرایند انعطاف‌پذیر بوده که هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی آن بسیار کمتر از فرایندهایی مانند جذب سطحی و فرایندهای تیریدی است. این فرآیند بر پایه شدت تراوش‌پذیری نسبی اجزای موجود در هوا استوار است و به دلیل اختلاف فشار دو طرف غشا انجام می‌گیرد. معادلات ریاضی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی جداسازی غشایی هوا با استفاده از شبیه‌ساز HYSYS بدون نیاز به برنامه‌نویسی در خارج از محیط شبیه‌ساز و همچنین از راه برقراری ارتباط بین نرم‌افزار Excel و ASPEN PLUS بدون نیاز به همگردانی و پردازش چند باره حل شده است. جریان عبوری از غشا به صورت ناهمسو در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی بر اساس مشخصات غشای فیبری توخالی انجام شد. با استفاده از این شبیه‌سازی می‌توان درصد جداسازی اجزای موجود در هوا را در دو جریان خروجی از غشا و درصد خلوص هر جریان را تعیین کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک این دو نرم‌افزار با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده است که تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد. روش پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند در شبیه‌سازی سیستم‌های غیر ایده‌آل مورد استفاده قرار گیرد.

: جداسازی غشایی هوا، شبیه‌سازی، مدل‌سازی، نرم‌افزار HYSYS و ASPEN PLUS، غشای فیبری

توخالی، جریان ناهمسو

و آن را گسترش داد [۵]. تحقیقات گراهام در زمینه غشاهای متخلخل به ثبت قانون نفوذ گراهام<sup>۱</sup> منجر شد. در خلال سال‌های ۱۹۴۳ تا ۱۹۴۵، قانون نفوذ گراهام برای اولین بار در فرایند غنی‌سازی اورانیوم به کار گرفته شد. در این تحقیق از غشاهای فلزی استفاده شد که به عنوان اولین فرایند جداسازی گاز به کمک غشا در مقیاس صنعتی که تا ۴۰ سال رکورد بزرگ‌ترین واحد غشایی در جداسازی را داشت، شناخته می‌شود. روند پیشرفت فناوری غشایی در جدول (۱) آورده شده است. با توسعه و تکامل غشاهای نامتقارن، واحدهای غشایی با سطح در دسترس زیاد و در نتیجه شار بالا، فراهم شد. اولین شرکتی که توانست حضور خود را در عرصه صنعت آشکار کند، شرکت مونسانتو با سامانه غشایی پریسم®<sup>۱</sup> برای جداسازی هیدروژن از گازهای بدون استفاده واحد آمونیاک، بود. شکل (۱) خلاصه‌ای از روند تکامل سیستم‌های غشایی جداسازی گاز را نشان می‌دهد.

مطالعه غشا برای اولین بار در اوایل قرن ۱۸ انجام شد. این غشاها در خلال قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ کاربرد صنعتی یا تجاری نداشته و فقط در مقیاس آزمایشگاهی برای پیشبرد نظریه‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در ابتدا از غشای طبیعی موجود در بدن حیوانات استفاده می‌شد تا اینکه نیتروسولولوز<sup>۱</sup> به عنوان غشا مطرح شد. با تلاش افرادی مانند الفورد<sup>۲</sup> [۵و۱]، زیگموندی<sup>۳</sup> [۵و۲]، بچمن<sup>۴</sup> [۵و۳] و فری<sup>۵</sup> [۵و۴]، سرانجام در اوایل دهه ۱۹۳۰، غشاهای نیتروسولولوز ریز حفره<sup>۶</sup> به صورت تجاری تولید و به بازار عرضه شد. در سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰، فناوری غشا به دیگر پلیمرها مانند سلولز استات<sup>۷</sup> نیز توسعه یافته [۵] و جداسازی گازها به کمک غشا در ۲۰ سال اخیر کاربردهای صنعتی فراوانی پیدا کرد. توماس گراهام<sup>۸</sup>، در حدود ۲۰ سال پیش شدت تراوش‌پذیری بسیاری از گازها را اندازه‌گیری کرد. وی اولین فردی بود که مدل انحلال-نفوذ را توصیف کرده

: [ ]

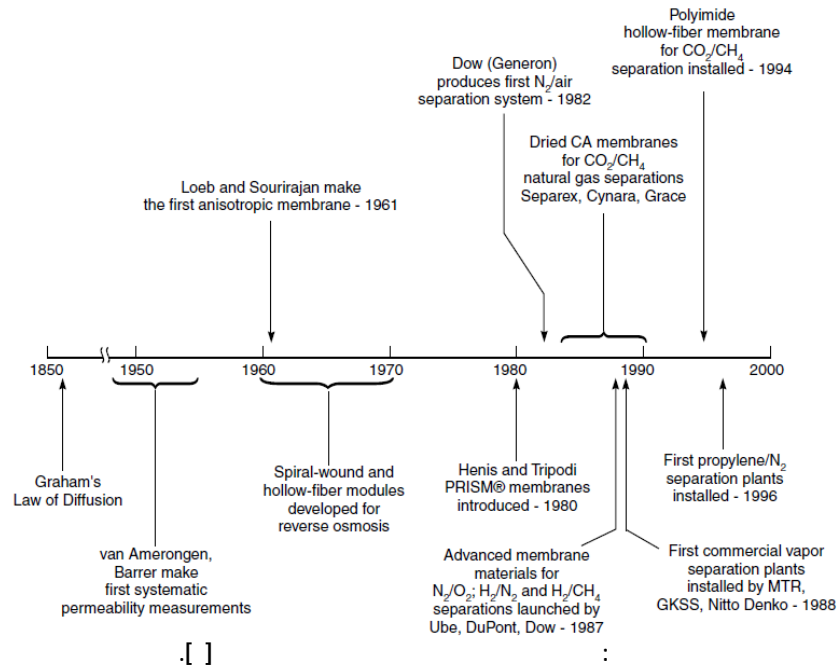
نوع	فرایند	وضعیت
فناوری های توسعه یافته جداسازی بوسیله غشا	میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون اسمز معکوس و الکترودیالیز	واحدهای عملیاتی به خوبی مستقر بوده و مشکل خاصی به نظر نمی رسد
فناوری های در حال توسعه جداسازی بوسیله غشا	جداسازی گاز تبخیر همراه تراوش	تعدادی واحد نصب شده اند. بازار مصرف و تعداد کاربردها رو به افزایش است
فناوری های توسعه نیافته و جدید	انتقال تسهیل یافته بوسیله حامل تماس دهنده های غشایی دیالیز کریستالی	بزرگسازي واحد و یکپارچگی فرایند در مقیاس صنعتی هنوز حل نشده است.
کاربردهای پزشکی غشا	کلیه و شش مصنوعی آزادسازی دارو بصورت کنترل شده	فرایندهای کاملاً اثبات شده بوده و فقط تحقیقات در زمینه هایی مانند زیست سازگاری ادامه دارد

کربنات<sup>۱۹</sup> (۷/۵) اشاره کرد که انتخاب پذیری هر یک در داخل پراتنز آمده است. تلاش برای دستیابی به مواد با انتخاب گری و تراوش پذیری بیشتر همچنان ادامه دارد. به عنوان نمونه می توان به کولپلیمرهایی که به وسیله پلیمریزاسیون دوغاب تحت فشار اتمسفر و با حضور کاتالیزور زیگلر نانا ساخته می شوند، اشاره کرد.

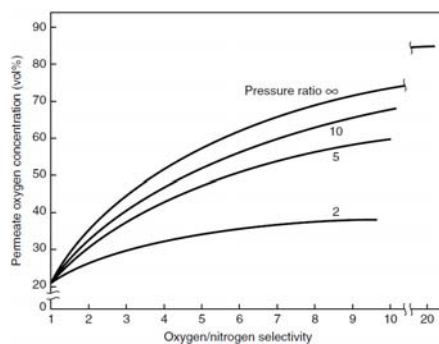
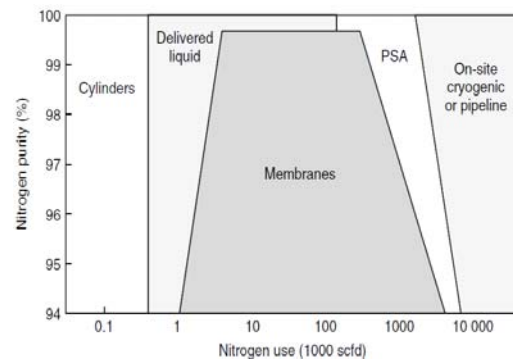
با توجه به دائمی بودن دسترسی به هوا، هزینه تهیه مواد اولیه بسیار کاهش یافته و قیمت نیتروژن و اکسیژن تولیدی فقط به هزینه های عملیاتی و تحویل به مشتریان وابسته است. فناوری غشایی، هزینه عملیاتی کمی داشته و قابلیت رقابت با فرایندهایی همچون فرایندهای تبریدی تولید گاز را دارد. در شکل (۲) محدوده رقابتی روش های گوناگون تولید نیتروژن آمده است. در شدت جریان های زیاد یا خلوص بالای ۹۹ درصد، فرایندهای غشایی هنوز نتوانسته اند از فرایندهایی نظیر سردسازی فوق پایین و جذب سطحی پیشی بگیرند، اما در محدوده وسیعی از شدت جریان ها و غلظت ها، نقش کلیدی دارند. فرایند تولید نیتروژن از هوا به کمک غشاها، جریانی غنی از اکسیژن را نیز به همراه خواهد داشت. در واقع محصول جانبی مفیدی با خلوص تقریباً ۳۵ درصد اکسیژن حاصل می شود که خالص سازی و استفاده در سایر بخش های فرایند و یا فروش مستقیم آن، توجیه پذیری اقتصادی فرآیند را بیشتر می کند. برخی کاربردهای صنعتی اکسیژن عبارتند از: ذوب و خالص سازی فولاد و سایر فلزات، در تهیه مواد شیمیایی با اکسیداسیون کنترل شده، سوخت موشک ها، در استخراج سنگ های معدنی، تولید محصولات سنگی و شیشه ای و غیره [۵]. در شکل (۳) نهایت خلوص قابل دسترسی اکسیژن توسط غشاها با انتخاب پذیری گوناگون، بیان شده است.

همان طور که مشاهده می شود از غشا برای جداسازی نیتروژن/اکسیژن، هیدروژن/نیتروژن، متان از دی اکسید کربن و در فرایند اسمز معکوس استفاده می شود. امروزه از فرایندهای غشایی به عنوان یک روش بهینه اقتصادی برای تولید نیتروژن با خلوص تقریباً ۹۹/۵ درصد و اکسیژن ۵۰-۳۰ درصد استفاده می شود [۵]. جداسازی هوا بر پایه شدت تراوش پذیری نسبی اجزای موجود در هوا استوار است و به دلیل اختلاف فشار دو طرف غشا انجام می گیرد. در خلال دهه ۸۰، شرکت دو<sup>۱۱</sup>، سامانه غشایی جنرون®<sup>۱۲</sup> را عرضه کرد که اولین واحد غشایی صنعتی برای جداسازی نیتروژن از هوا بود. در ابتدا این سامانه رقیب چندانی نداشت، اما دیری نپایید که شرکت های اوبه<sup>۱۳</sup> و دو پونت<sup>۱۴</sup> با ساخت غشاهایی با انتخاب پذیری بالا، پا به عرصه رقابت گذاشته و در همان سال ها، در مجموع نیمی از بازار تولید نیتروژن را فرایندهای غشایی به دست گرفت.

بزرگترین واحدهای غشایی جداسازی گاز در حال حاضر برای تولید نیتروژن از هوا مورد استفاده قرار می گیرند. اولین غشایی که بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت، پلی(۴-متیل-۱-پنتن)<sup>۱۵</sup> و اتیل سلولز با انتخاب پذیری  $O_2/N_2$  ۴ بوده (نسبت نفوذ پذیری گاز اکسیژن به نیتروژن، دارای محدوده متفاوت برای غشاها گوناگون)، که در این واحد، سطح کل درآمد با کل هزینه برابر می شد. نسل دوم مواد پلیمری سازنده غشا که اکنون مورد استفاده قرار می گیرند، دارای انتخاب پذیری ۶-۷ بوده و صرفه اقتصادی بالایی را، بخصوص برای واحدهای صنعتی کوچک با ظرفیت تولید ۸۵۰-۸/۵ متر مکعب در ساعت، دارند. از جمله این مواد می توان به پلی ایماید<sup>۱۶</sup> (۶/۲)، پلی سولفون<sup>۱۷</sup> (۶/۲)، پلی آراماید<sup>۱۸</sup> (۶/۸) و تترابروم بیس پلی



سطح غشا را افزایش می‌دهند. نوع جریان ممکن است همسو یا ناهمسو باشد [۱۶، ۱۷]. برای دو سلول سری، خوراک با فشار بالا به سلول اول وارد شده و جریان ناتراوه به سلول دوم وارد می‌شود. مشخصه‌های عملیاتی باید به گونه‌ای انتخاب شوند که خلوص و دبی بالایی از جریان محصول حاصل شود [۲۰-۱۸].



از آنجایی که فرایندهای غشایی جداسازی هوا در محدوده بیان شده در شکل (۲)، نیاز به انرژی مصرفی کم و در نتیجه بسیار اقتصادی‌تر از سایر روش‌ها هستند (به عنوان مثال برای غشایی با انتخاب پذیری ۵/۲، ضریب عملکردی برابر  $10^{-3} * 0.149$  برای نیتروژن و  $10 * 0.784$  برای اکسیژن گزارش شده است [۶]) تحقیق‌های بسیاری روی نوع غشا و فرایند مورد استفاده، در حال انجام شدن است [۷-۱۰].

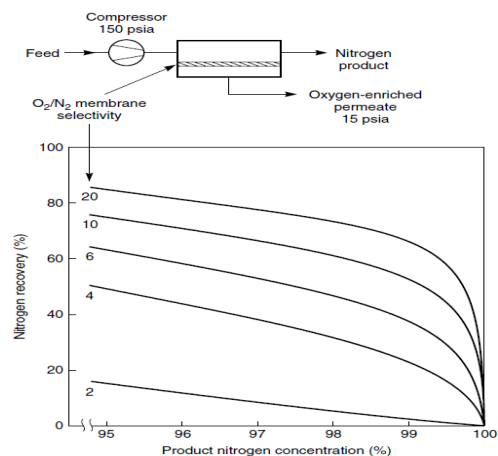
جداسازی هوا به اکسیژن و نیتروژن از فرایندهای بسیار مهم در صنعت است [۲۱-۲۳]. امروزه، فرایندهای غشایی مورد استفاده برای جداسازی هوا با هدف غنی‌سازی نیتروژن، در محدوده دبی تا حدود ۱۵ تن در روز و خلوص نیتروژن ۹۹/۹۵ درصد، از فرایندهایی نظیر سردسازی و جذب سطحی، از نظر اقتصادی مطلوب‌تر است [۲۴].

با توجه به این خصوصیات، غشاها در فرایندهای جداسازی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. جداسازی گازها به طور معمول در سلول‌های منفرد انجام می‌گیرد. این چیدمان از نظر بهره‌برداری و کنترل بسیار ساده است [۱۴ و ۱۵]. برای افزایش میزان تولید محصول،

با پیشرفت دانش تولید غشاهای مورد استفاده در جداسازی اجزای هوا، غشاهای زئولیتی [۲۵] و پلیمری [۲۶] از جایگاه ویژه‌ای بهره‌مند شده‌اند.

در فرایند جداسازی اجزای هوا، ابتدا هوا از یک فیلتر عبور داده شده تا گرد و غبار و ذرات درشت موجود در آن جدا شود. سپس توسط یک دمنده که به آن فشار  $1/0.3$  بار می‌دهد، به واحد خورنده می‌شود. جریان عبوری غنی از اکسیژن، توسط پمپ خلاء ( $0.3-0.2$  بار) مکیده می‌شود. این جریان گازی شامل  $37-27$  درصد اکسیژن است. این گونه واحدها برای استفاده صنعتی، به طور معمول  $100$  م<sup>2</sup> غشا داشته و سطحی برابر  $86$  م<sup>2</sup> فراهم می‌کنند. غشاهای انتخابی برای مصارف صنعتی تولید نیتروژن غنی‌شده، تراوش‌پذیری بالا و انتخاب‌گری  $1/2$  دارند، در حالی که به عنوان مثال برای مصارف پزشکی، تراوش‌پذیری کم و انتخاب‌پذیری حدود  $4$ ، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. به منظور اقتصادی بودن تولید نیتروژن از هوا، باید انتخاب‌گری  $O_2/N_2$  غشا، زیاد (بیشتر از  $4$ ) باشد.

شکل (۴)، اثر زیاد بودن انتخاب‌گری غشا را در بهبود بخشی فرایند تولید نیتروژن نشان می‌دهد. این نمودار، میزان بازیابی نیتروژن موجود در خوراک گازی را بر حسب خلوص نیتروژن در جریان ناتراوه در  $5$  نوع غشا با انتخاب‌گری‌های متفاوت، نشان می‌دهد [۵].



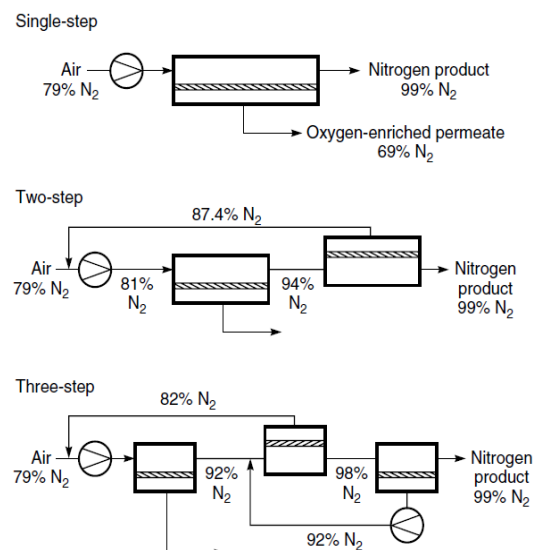
[۴]

همانند سایر روش‌های جداسازی گاز، رسیدن به خلوص بالا، کاهش بازیابی را به همراه دارد. بنابراین باید

بین بالا بودن خلوص محصول و درصد بازیابی زیاد، بهینه‌سازی فنی و اقتصادی انجام گیرد.

در اولین فرایندهای غشایی تولید نیتروژن از هوا، سامانه‌های غشایی تک واحدی مورد استفاده قرار می‌گرفت که جریانی غنی از نیتروژن را با خلوص  $95$  درصد حاصل می‌کرد. با پیشرفت فناوری غشاها، طراحی‌های پیچیده‌تری انجام گرفت و تولید محصول با خلوصی معادل  $99$  درصد حاصل شد. شمایی از این فرایندهای چند مرحله‌ای در شکل (۵) آورده شده است [۵].

اولین پیشرفت حاصل از آن، طراحی فرایند دو مرحله‌ای بود. در این حالت پس از عبور هوا از دو مرحله غشایی، غلظت اکسیژن در جریان عبوری کاهش پیدا کرده و به کمتر از حدی می‌رسد که در خوراک اولیه موجود بود. در این هنگام اختلاط این جریان عبوری با خوراک اولیه، مفید واقع می‌شود. این فرایند در حالتی که محصول نیتروژن بسیار خالصی با غلظت اکسیژن کمتر از  $1$  درصد مورد نیاز است، بسیار کارا است. در سامانه دوتایی، جریان عبوری از غشای دوم  $12/5$  درصد اکسیژن دارد، بنابراین بازگرداندن و ترکیب آن با خوراک اولیه، سبب کاهش انرژی مصرفی کمپرسور و سطح غشای لازم، به میزان  $6$  درصد، خواهد بود [۵].



[۵]

این طراحی هنگامی مؤثرتر است که بتوان جریان خوراک را با جریان برگشتی که تقریباً همان ترکیب

$$\overline{(xP - yp)} = \frac{(x_F P - y_P P) - (x_R P - y_i P)}{\ln \left( \frac{x_F P - y_P P}{x_R P - y_i P} \right)} \quad (2)$$

که در آن  $y_i$  جزء مولی در جریان ناتراوه است که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$y_i = \frac{(\alpha^* - 1)(x_R + 1) + r}{2(\alpha^* - 1)} \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{[(\alpha^* - 1)(x_R + 1) + r]^2 - 4(\alpha^* - 1)\alpha^* x_R}}{2(\alpha^* - 1)}$$

در این رابطه،  $\alpha^*$  انتخاب‌پذیری، که نسبت نفوذپذیری جزئی که سریع‌تر از غشا عبور کرده به جزئی که با سرعت کمتری نفوذ می‌کند، است و  $r$  نسبت فشار خوراک به فشار تراوه است.

با مشخص بودن شدت جریان و ترکیب درصد خوراک، در ابتدا حدس اولیه‌ای برای نسبت جزئی از اجزا در خوراک که به جریان تراوه وارد می‌شود در نظر گرفته شده که این نسبت را با  $\theta$  نشان می‌دهند. سپس مقادیر  $x_P$  و  $y_P$  از روی روابط موازنه جرم روی جریان‌های ورودی و خروجی از غشا محاسبه می‌شوند. با استفاده از مقادیر  $x_P$  و  $y_P$  مقدار جدید  $\theta$  از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\theta = \frac{y_P n_P}{x_F n_F} = \frac{Q \overline{(xP - yp)} A_m}{x_F n_F} \quad (4)$$

مراحل بالا تکرار شده تا پاسخ همگرا شود. روش حل ارایه شده در بالا حدس و خطایی است، بنابراین برای افزایش سرعت همگرایی می‌توان از الگوریتم فلچر-ریوز<sup>۲۰</sup> استفاده کرد که در آن با حداقل کردن تابع هدف مشخصی که در رابطه (۵) ارایه شده است، سرعت همگرایی به پاسخ، افزایش می‌یابد [۲۷].

$$f_{\min} = \sum \left[ \theta x_F n_F - Q \overline{(xP - yp)} A_m \right]^2 \quad (5)$$

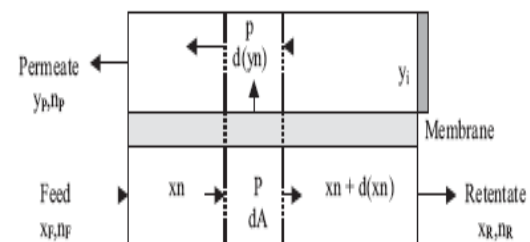
با استفاده از روابط و الگوریتم ارایه شده در بالا می‌توان فرایند جداسازی غشایی هوا را شبیه‌سازی کرد که توضیحات شبیه‌سازی در ادامه ارایه شده است.

برای شبیه‌سازی فرایند جداسازی غشایی هوا به کمک نرم‌افزار HYSYS، برای انجام محاسبات موازنه مواد از یک جداکننده اجزا<sup>۲۱</sup> استفاده شد. در این واحد، مقدار اجزا در

خوراک را دارد، مخلوط کرد. اساس کار سامانه‌های سه مرحله‌ای بر این مطلب استوار است. در این طراحی، ۸ درصد صرفه‌جویی در انرژی لازم کمپرسور و کاهش بیشتر سطح مورد نیاز، حاصل می‌شود [۵]. البته با توجه به استفاده از دو کمپرسور (هزینه اولیه زیاد)، فرایندهای سه مرحله‌ای محدود به مقیاس‌های بزرگ می‌شود تا هزینه خریداری و نگهداری کمپرسور دوم و پیچیدگی نسبی سامانه، با مزیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سطح غشا جبران شود.

در حال حاضر شبیه‌سازهای فرایند، قادر به تحلیل سیستم‌های غیر ایده‌آل نیستند. در مقابل بانک اطلاعاتی خواص فیزیکی بسیار جامع با توان محاسباتی بالا از ویژگی‌های بسیار مهم این شبیه‌سازها است. بنابراین بهره‌گیری از یک ابزار برای انجام محاسبات ریاضی به صورت موازی با شبیه‌ساز، ضروری است.

برای شبیه‌سازی فرایند جداسازی به کمک غشا از مدل نفوذ اجزای گاز یا مایع از درون یک غشا استفاده می‌شود [۲۷]. شکل (۶) نمایی از یک غشا با الگوی جریان plug و ناهمسو را نشان می‌دهد.



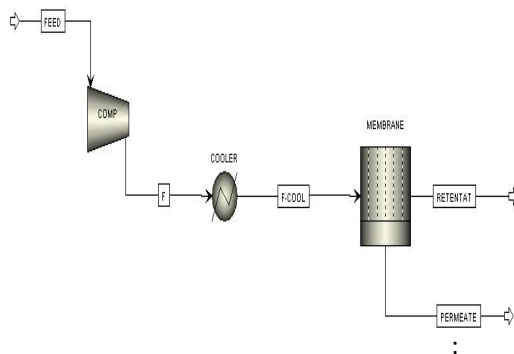
plug

میزان نفوذ اجزای عبوری از غشا به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$y_P n_P = x n_F - x n_R = Q \overline{(xP - yp)} A_m \quad (1)$$

که در آن  $Q$  نفوذپذیری،  $A_m$  سطح کل غشا،  $x$  و  $y$  جزء مولی و  $p$  و  $P$  فشار هستند.  $\overline{(xP - yp)}$  متوسط لگاریتمی فشار جزئی غشا بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

محاسبه خواص جریان محصول استفاده شد. موازنه جرم و انرژی نیز در این شبیه‌سازی به طور خودکار و از روی معادله حالت Peng Robinson انجام می‌گیرد. دیاگرام جریان فرایند شبیه‌سازی در نرم‌افزار ASPEN در شکل (۸) نشان داده شده است.



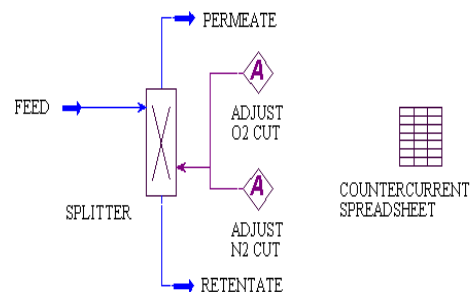
.ASPEN

به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌ساز HYSYS و ASPEN، فرایند یک مرحله‌ای جداسازی هوا با استفاده از غشا، شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک این دو نرم‌افزار با استفاده از داده‌های موجود در جدول (۲)، در جدول (۳) ارائه شده‌اند. از روی نتایج حاصل می‌توان دریافت که دقت هر دو نرم‌افزار در حد قابل قبولی است.

۲۱	دما (C)
۱۵۰	فشار (Psia)
۱۰۰	دبی مولی (Kgmol/hr)
۰/۲۱	جزء مولی اکسیژن
۰/۷۹	جزء مولی نیتروژن

برای بررسی درستی و دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تغییرات غلظت اکسیژن در جریان عبوری از غشا با تغییرات فشار خوراک بررسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به همراه داده‌های تجربی ارائه شده توسط Fauzi Ismail و همکاران [۲۸] در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فشار خوراک تا ۳۰ psig، غلظت اکسیژن در جریان عبوری افزایش می‌یابد. افزایش فشار خوراک ورودی سبب افزایش مقدار اکسیژن نفوذی شده و از آنجا که تراوش‌پذیری O<sub>2</sub>

جریان‌های خروجی باید توسط کاربر مشخص شود که این مقادیر اولیه همان حدس اولیه برای  $\theta$  است. موازنه جرم و انرژی در این واحد به طور خودکار و از روی معادله حالت Peng Robinson، که در این شبیه‌سازی از معادله استفاده شده است، انجام می‌گیرد. روابط مربوط به مدل پیشنهادی در یک صفحه گسترده در HYSYS وارد شده و به کمک روش حدس و خطا مقادیر نهایی  $\theta$  به گونه‌ای که در رابطه (۵) صدق کند، محاسبه می‌شود. دیاگرام جریان شبیه‌سازی در نرم‌افزار HYSYS در شکل (۷) نشان داده شده است.

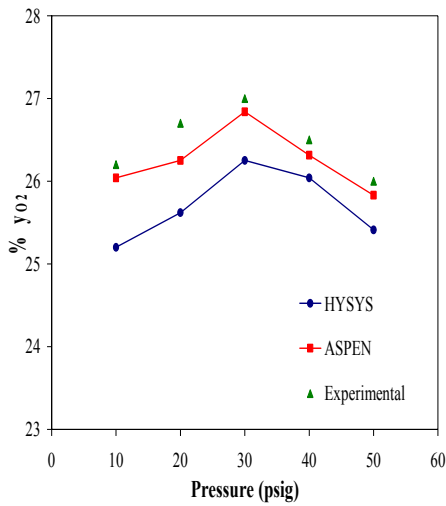


.HYSYS

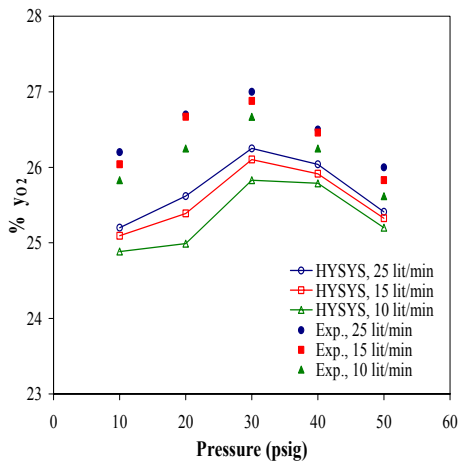
برای شبیه‌سازی فرایند غشایی جداسازی هوا به کمک نرم‌افزار ASPEN، ارتباط بین این نرم‌افزار و Excel 2003 برقرار شد. از صفحه گسترده Excel به عنوان واحد عملیاتی تعریف شده توسط کاربر، در ASPEN استفاده شد. با مشخص کردن متغیرهای ورودی و خواص فیزیکی برای Excel، این مدل را بدون نیاز به همگردانی و پردازش چند باره، اجرا کرده، با این توضیح که این کار در مدل‌های فترن نیاز به همگردانی دوباره در هر بار اجرا دارد.

همچنین از توانایی‌های Excel مانند توابع از پیش تعیین شده آن، استفاده شد. ASPEN، چندین ابزار برای درج مدل‌های اختصاصی شده در اختیار کاربر قرار می‌دهد. یکی از این ابزارها، User2 است که به کمک صفحات گسترده Excel، محاسبات را انجام می‌دهد. در این مرحله یک مدل User2 تحت Excel برای شبیه‌سازی فرایند غشایی تعریف شد. از ASPEN برای تعریف نمودار جریان فرایند استفاده شده است که با مشخص کردن جریان‌های خوراک و محصول، کمیت‌های حقیقی و صحیح متناسب با غشا وارد شد. سپس از Excel برای

نتایج به دلیل حل معادلات غشا با در نظر گرفتن یک حجم کنترل به جای حل معادلات دیفرانسیلی است.



:



:

**.HYSYS**

شکل (۱۲) روند تغییر دبی مولی اجزای هوای ناتراوه را با افزایش فشار نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، میزان شدت جریان‌های اکسیژن و نیتروژن در جریان ناتراوه یا محصول، کاهش می‌یابد؛ چرا که با ادامه روند افزایش فشار، گاز بیشتری از غشا عبور می‌کند. شیب متفاوت نمودارها به دلیل تفاوت در تراوش‌پذیری اجزا نسبت به یکدیگر است؛ تراوش‌پذیری

از N<sub>2</sub> بیشتر است، با افزایش فشار تا حد معینی غلظت اکسیژن نیز افزایش می‌یابد.

HYSYS

:

**.ASPEN**

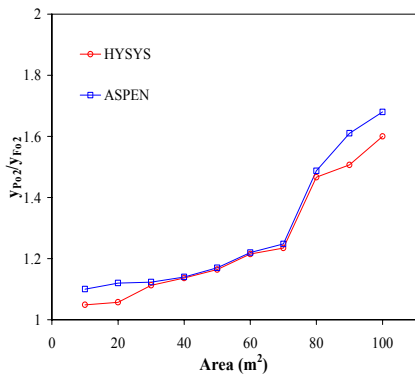
نتایج ASPEN	نتایج HYSYS	جریان	
۲۱	۱۷/۳	Permeate	دما (C)
۲۱	۲۱/۱	Retentate	
۱۵	۱۵	Permeate	فشار (P <sub>sia</sub> )
۱۵۰	۱۵۰	Retentate	
۱۰/۷۹۲	۱۰/۴۳	Permeate	دبی مولی (Kgmol/hr)
۸۹/۲۰۸	۸۹/۵۷	Retentate	
۰/۵۰۸	۰/۵۰۷۵	Permeate	جزء مولی اکسیژن
۰/۱۷۶	۰/۱۷۵۴	Retentate	
۰/۴۹۲	۰/۴۹۲۵	Permeate	جزء مولی نیتروژن
۰/۸۲۴	۰/۸۲۴۶	Retentate	

با افزایش بیشتر فشار، با توجه به اینکه مقدار نیتروژن موجود در خوراک بیشتر از اکسیژن است، فشار بیش از حد زیاد خوراک، سبب عبور مقدار زیادی از خوراک از میان غشا شده و با افزایش مقدار N<sub>2</sub> موجود در جریان عبوری، روند کاهشی نمودار نتیجه می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بیشتر فشار خوراک، غلظت اکسیژن در جریان عبوری از غشا کاهش می‌یابد.

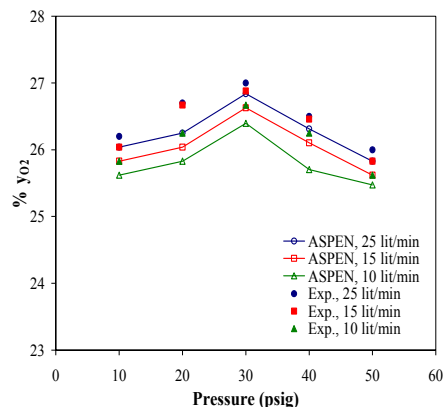
همان طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی وجود دارد و قابل توجه است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ASPEN به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است که علت آن بالا بودن قدرت محاسباتی نرم‌افزار ASPEN در محاسبات و بالا بودن سرعت همگرایی است. شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب اثر تغییرات دبی و فشار خوراک را روی تغییرات جزء مولی اکسیژن عبوری از غشا برای نرم‌افزارهای HYSYS و ASPEN، نشان می‌دهد.

همان طور که مشاهده می‌شود، با کاهش دبی خوراک، جزء مولی اکسیژن در جریان عبوری از غشا کاهش می‌یابد. هر چه دبی خوراک کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان کمتری اکسیژن از غشا عبور کرده و در نتیجه انتظار می‌رود که یک روند نزولی در نمودار مشاهده شود. مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی وجود دارد. تفاوت موجود در



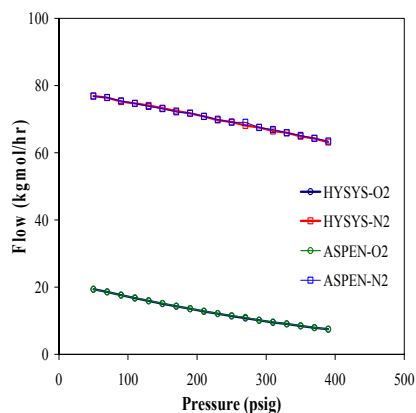


اکسیژن از نیتروژن بیشتر است. بنابراین با شیب تندتری به سمت صفر میل می‌کند، در حالی که شیب کاهش مقدار نیتروژن در جریان محصول، تقریباً یکسان است.



در این مقاله شبیه‌سازی واحد جداسازی غشایی هوا به کمک دو نرم‌افزار شبیه‌ساز HYSYS 3.1 و ASPEN PLUS 11.1 انجام شده و سعی بر آن بود تا داده‌های تجربی را بتوان به کمک تکنیک‌های جدید و نوآورانه پیش‌بینی کرد. هر چه این نتایج با یکدیگر مطابقت بیشتری داشته باشند، به همان میزان شبیه‌سازی قدرتمندتری انجام شده است. در این حالت می‌توان در طراحی‌های آینده و همچنین در بررسی اثر تغییر عوامل گوناگون در فرایند مورد نظر، بدون نیاز به استفاده از تجهیزات صنعتی و عملیاتی، از شبیه‌سازی انجام گرفته استفاده کرده و در هزینه‌ها و تلفات احتمالی جلوگیری کرد. یکی از مزایای مدل مورد استفاده در این پژوهش این است که نیازی به برنامه‌نویسی خارجی نداشته و همچنین نیازی به همگردانی و پردازش چند باره نیست. برای انجام محاسبات مربوط به موازنه جرم و انرژی از قابلیت نرم‌افزارهای صنعتی نام‌برده با استفاده از معادله حالت Peng Robinson استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خلوص اکسیژن در جریان تراوه با افزایش فشار خوراک از ۱۰ تا ۳۰ psig افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر فشار، جزء مولی اکسیژن کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه شد که با افزایش دبی خوراک جزء مولی اکسیژن کاهش می‌یابد. از مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی می‌توان دریافت که تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد.

.ASPEN



شکل (۱۳) روند تغییر نسبت جزء مولی اکسیژن در جریان تراوه به جزء مولی خوراک با مساحت کل غشا را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح غشا، میزان اکسیژن در جریان تراوه افزایش می‌یابد؛ چرا که با ادامه روند افزایش مساحت، گاز بیشتری از آن عبور کرده و در نتیجه میزان اکسیژن در جریان تراوه افزایش می‌یابد.



- 
- .....
- 1- Elford, W. J. (1937). Principles Governing the Preparation of Membranes Having Graded Porosities. The Properties of 'Gradocol' Membranes as Ultrafilters, *Trans. Faraday Soc.*, 33, 1094.
  - 2- Zsigmondy R. And Bachmann, W. (1918). Über Neue Filter, *Z. Anorg. Chem.*, 103, 119.
  - 3- Bechhold, H. (1907). Kolloidstudien mit der Filtrationsmethode, *Z. Physik Chem.*, 60, 257.
  - 4- Ferry, J. D. (1936). Ultrafilter Membranes and Ultrafiltration, *Chem. Rev.*, 18, 373.
  - 5- Baker, R. W. (2004). *Membrane technology and applications*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd, 2nd Edition.
  - 6- Noble, R. D., and Stern, S. A. (1995). *Membrane separations technology: principles and applications*, Elsevier Science.
  - 7- Acharya, M. and Foley, H. C. (1999). "Spray-coating of nanoporous carbon membranes for air separation." *Journal of Membrane Science*, 161, 1–5.
  - 8- Parrillo, D. J., Thaeron and C., Sircar, S. (1997). "Separation of bulk hydrogen sulfide-hydrogen mixtures by selective surface flow membrane." *AIChE J.* Vol. 43, PP. 2239–2245.
  - 9- Rao, M. B. and Sircar, S. (1993). "Nanoporous carbon membranes for separation of gas mixtures by surface selective flow." *J. Memb. Sci.* Vol. 85, PP. 253–264.
  - 10- Rao, M. B. and Sircar, S. (1996). "Performance and pore characterization of nanoporous carbon membranes for gas separation." *J. Memb. Sci.* Vol. 110, PP. 109–118.
  - 11- Ettouney, H. M., El-Dessouky, H. T. and Abou Waar, W. (1998). "Separation characteristics of air by polysulfone hollow fiber membranes in series." *Journal of Membrane Science.* Vol. 148, PP. 105-117.
  - 12- Tsuru, T. and Hwang, S. T. (1994). "Production of high-purity oxygen continuous membrane column combined with PSA oxygen generator." *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 33, PP. 311-316.
  - 13- McKee, R. L., Changela, M. K. and Reading, G. J. (1991). "CO<sub>2</sub> removal: Membrane plus amine." *Hydrocarbon Processing*, PP. 63-65.
  - 14- Russell, F. G. and Coady, A. B. (1982). "Gas-permeation process economically recovers CO<sub>2</sub> from heavily concentrated streams." *Oil & Gas J.*, PP. 126-134.
  - 15- Lee, A. L., Feldkirchner, H. L., Stern, S. A., Houde, A. Y., Gamez, J. P. And Meyer, H. S. (1995). "Field tests of membrane modules for the separation of carbon dioxide from low-quality natural gas." *Gas Sep. Purif.*, Vol. 9, PP. 35-43.
  - 16- Walawender, W. P. and Stern, S. A. (1972). "Analysis of membrane separation parameters. II. Countercurrent and cocurrent flow in a single permeation stage." *Sep. Sci.* Vol. 7, PP. 553-584.
  - 17- McCandless, F. P. (1984). "Separation factors in permeation stages." *J. Membr. Sci.* Vol. 19, PP. 101-113.
  - 18- McCandless, F. P. (1985). "A comparison of some recycle permeators for gas separations." *J. Membr. Sci.*, Vol. 24, PP. 15-28.
  - 19- Spillman, R. W. (1989). "Economics of gas separation membranes." *Chem. Engng. Prog.* PP. 41-62.
  - 20- Schell, W. J., Houston, C. D. and Hopper, W. L. (1983). "Membranes can efficiently separate CO<sub>2</sub> from mixtures." *Oil&Gas J.* PP. 53-56.
-

- 
- 21- Matson, S. L., Ward, W. J., Kimura, S. G. and Browall, W. R. (1986). "Membrane oxygen enrichment, II. Economic assessment." *J Membrane Sci*, Vol. 29, PP. 79-96.
- 22- Fabiani, C., Bimbi, L., Pizzichini, M. and Santarossa, L. (1996). "Performance of a hollow fibre membrane unit in oxygen enriched air production." *Gas Sep Purif*, Vol. 10, No. 1, PP. 75-79.
- 23- Prasad, R., Notaro, F. and Thompson, D. R. (1994). "Evolution of membranes in commercial air separation." *J Membrane Sci*, Vol. 94, PP. 225.
- 24- Purnomo, I. S. K. and Alpay, E. (2000). "Membrane column optimisation for the bulk separation of air." *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, PP. 3599-3610.
- 25- Dominguez-Dominguez, S., Berenguer-Murcia, A., Morallon, E., Linares-Solano, A. and Cazorla-Amoros, D. (2008). "Zeolite LTA/carbon membranes for air separation." *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 115, PP. 51-60.
- 26- Scott Coombe, H. and Nieh, S. (2007). "Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications." *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, PP. 1499-1505.
- 27- Davis, R. A. (2002). "Simple gas permeation and pervaporation membrane unit operation models for process simulators." *Chemical Engineering Technology*, Vol. 25, PP. 7.
- 28- Ismail, A. F., Chin Yin T. and Kiong, C. (2001). "Effect of feed pressure and retentate flow rate on the performance of locally developed polysulfone membrane oxygen enrichment system." *Journal of technology*, PP. 11-20.

1- Nitrocellulose

3- Zsigmondy

5- Ferry

7- Cellulose Acetate

9- Graham's Law of Diffusion

11- Dow

13- Ube

15- Poly(4-Methyl-1-Pentene)

17- Polysulfone

19- Tetrabromo Bis Polycarbonate

21- Component Splitter

2- Elford

4- Bachmann

6- Microporous

8- Thomas Graham

10- Prism<sup>®</sup>

12- Generon<sup>®</sup>

14- Du Pont

16- Polyimide

18- Polyaramide

20- Fletcher-Reeves

---