

آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی اقتصادی پیکربندی‌های چندمرحله‌ای غشایی برای جداسازی دی‌اکسید کربن از متان

سعید خادمی^۱، ابوالفضل کیان^۲، بصیر ملکی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: a.jomekian@esfarayen.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۵۳-۷۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

چکیده

در این پژوهش، به‌منظور انجام یک ارزیابی فنی و اقتصادی مقایسه‌ای از سیستم‌های جداسازی غشایی گاز، شش پیکربندی شامل سامانه‌های تک، دو و سه‌مرحله‌ای با جریان برگشتی تراویده یا پسماند، مبتنی بر غشاهای از پیش ساخته‌شده، شبیه‌سازی و بررسی شدند. این پیکربندی‌ها برای مطالعه موردی جداسازی CO_2 از CH_4 در محیط Aspen Plus طراحی و شبیه‌سازی شدند و سپس، با استفاده از محاسبات اقتصادی مقدماتی در همان نرم‌افزار، بهترین پیکربندی از منظر اقتصادی انتخاب شد. در ادامه، این پیکربندی برای انجام تحلیل‌های اقتصادی دقیق‌تر به محیط MATLAB منتقل شد.

بدین‌منظور، مقادیر تراوایی و انتخاب‌پذیری غشاهای مورد استفاده به‌عنوان داده‌های ورودی به برنامه MATLAB اعمال شد و خلوص و درصد بازیابی گازهای خروجی به‌عنوان خروجی مدل محاسبه گردید. سپس، شاخص جهانی عملکرد سیستم (IGP) که به‌صورت هم‌زمان بر پایه مجموع خلوص و درصد بازیابی گازها تعریف می‌شود، از نتایج فرآیندی محاسبه شد و از آن برای تعیین مناسب‌ترین غشا در پیکربندی منتخب استفاده گردید.

در مرحله بعد، با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی غشای منتخب، تحلیل اقتصادی فرایند انجام شد و سه شاخص کلیدی شامل هزینه کل (Total cost)، هزینه سرمایه‌گذاری (Capital costs) و هزینه بهره‌برداری (Operating costs) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که غشاهایی با عمر مفید بیش از دو سال، به دلیل کاهش هزینه‌های تعویض و نگهداری، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند؛ زیرا هزینه جایگزینی غشا تنها بخش کوچکی از هزینه کل سیستم را تشکیل می‌دهد. همچنین، دبی بهینه خوراک برای غشاهای با عمر مفید طولانی‌تر حدود ۱۲۰۰ مترمکعب بر ساعت به دست آمد، زیرا در این دبی، هزینه کل سیستم به حداقل می‌رسد. در مجموع، استفاده از غشاهای با عمر مفید بیشتر، همراه با تنظیم دبی خوراک در مقدار بهینه، می‌تواند موجب بهبود عملکرد اقتصادی فرایند جداسازی گاز شود.

کلیدواژه‌ها: جداسازی متان از دی‌اکسید کربن، غشای ماتریس آمیخته، شبیه‌سازی، اسپن پلاس، ارزیابی اقتصادی، متلب





۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی انرژی و روند قیمت‌گذاری آن، توجه شرکت‌های بزرگ را به سمت توسعه میادین جدید نفت و گاز حاوی درصد بالای کربن معطوف کرده است. روند استخراج و مصرف این سوخت‌های فسیلی تولید و انتشار کربن اضافی به اتمسفر را در پی دارد و این باعث شده است که انجمن‌های جهانی محیط زیستی در مورد تغییرات اقلیمی، فشار مداومی را بر شرکت‌های انرژی وارد می‌کند تا شیوه‌هایی را اتخاذ کنند که منجر به کاهش انتشار کربن شود بنابراین، جداسازی CO_2 به‌عنوان گزینه‌ای برای به حداقل رساندن انتشار CO_2 ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی مورد توجه قرار گرفته است. میزان CO_2 موجود در گاز طبیعی بسته به منبع گاز می‌تواند از ۴ درصد تا ۵۰ درصد متغیر باشد. قبل از انتقال گاز طبیعی، باید آن را پیش‌پردازش کرد تا مشخصات معمول خط لوله یعنی ۲ تا ۵ درصد CO_2 را برآورده کند در حال حاضر، بسیاری از چاه‌های گاز طبیعی به دلیل نرخ تولید پایین و کیفیت پایین، یعنی محتوای بالای CO_2 توسعه نیافته‌اند که این امر لزوم توسعه فرآیندهای کارآمد برای جداسازی CO_2 از گاز طبیعی را ایجاد کرده است CO_2 را می‌توان با توجه به عوامل هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، مشخصات گاز و نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسط تعدادی فرآیند حذف کرد. فرآیندهای اصلی را می‌توان به شرح زیر گروه‌بندی کرد:

۱. فرآیندهای جذب (جذب شیمیایی و فیزیکی)،

۲. فرآیند جذب سطحی (سطح جامد)،

۳. محلول ترکیبی (حلال فیزیکی و شیمیایی مخلوط)،

۴. جداسازی فیزیکی (غشاء؛ جداسازی برودتی).

فرآیندهای غشایی، فناوری اثبات‌شده تجاری برای کاربردهای تصفیه گاز طبیعی هستند. اگرچه فناوری جداسازی غشایی تنها در چند دهه اخیر به یک کاربرد صنعتی عمده تبدیل شده است، اما مطالعه جداسازی گاز سابقه طولانی دارد. اولین شرکتی که غشای بریسم را ایجاد کرد، مونسانتو بود که برای جداسازی هیدروژن به بازار عرضه شد، اما موفقیت مونسانتو شرکت‌های غشایی دیگر را تشویق کرد تا کارخانه‌های غشایی

برای تصفیه گاز طبیعی تولید کنند. در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای انجام شد که آزمایش‌های میدانی ماژول‌های غشایی را برای جداسازی دی‌اکسید کربن از گاز طبیعی انجام دادند [۱]. در مطالعه خود، آن‌ها اثرات متغیرهای عملیاتی فشار، نرخ جریان خوراک و غلظت دی‌اکسید کربن در خوراک اعمال گردید. علاوه بر تجزیه و تحلیل داده‌های میدانی، مدل‌های کامپیوتری برای جداسازی گازها تحت شرایط اختلاط کامل و جریان متقاطع اعمال شدند. در سال‌های اخیر استفاده از یادگیری ماشینی به‌عنوان روشی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تصفیه گاز و آب توسط سیستم‌های غشایی توسعه بیشتری نسبت به قبل پیدا کرد [۲]. این روش مدل‌سازی علیرغم دارا بودن بازدهی و قابلیت پیش‌بینی برتر و دقت خوب، از عدم دارا بودن تحلیل مفهومی و چرایی ریاضی رنج می‌برد. مدل‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی نیز برای پیش‌بینی رفتار جداسازی غشاها در سال‌های اخیر بکار گرفته شدند [۳، ۴]. در این مدل‌ها نیز پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سیستم‌های غشایی مانند هندسه سیستم، دبی خوراک و تنوع غشایی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های مبتنی بر برنامه‌نویسی ریاضی و همچنین شبکه‌های عصبی و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نظیر Aspen Hysys و Aspen Plus نیز در پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های جداسازی غشایی بکار گرفته شد و نقاط ضعف و قوت هر یک مرور گردید [۵-۱۰]. از بررسی مجموع کارهای مطالعه شده می‌توان به این نتیجه رسید که در اکثر این کارها، مدل‌سازی یا شبیه‌سازی براساس ویژگی‌ها و معادلات پیچیده برنامه‌ریزی شده در یک زبان برنامه‌نویسی و ارتباط آن به نرم‌افزار شبیه‌ساز است و همیشه نیاز به پیوندی پیچیده بین زبان برنامه‌نویسی دوم برای اصلاح روابط و پیوند بهتر با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نظیر اسپن پلاس یا اسپن هایسیس از طریق زیر روال تعریف شده توسط کاربر وجود دارد. در کار حال حاضر این عمل توسط برنامه‌نویسی ساده در محیط کاربرپسند میکروسافت اکسل با کمترین پیچیدگی و بیشترین سادگی و در عین حال کارایی بالا انجام می‌شود. در این کار روشی جدید برای پیاده‌سازی یک مدل جریان متقاطع دو بعدی در نرم‌افزار Aspen Plus برای جداسازی CO_2

از گاز طبیعی ارائه می‌دهد. از آنجایی که واحد غشایی یک عملیات واحد از پیش تعریف شده در نرم افزار Aspen Plus نیست، مدل جریان متقاطع دوبعدی چند مرحله‌ای به عنوان عملیات واحد تعریف شده توسط کاربر به همراه سایر عملیات واحد موجود با استفاده از زیر برنامه در مایکروسافت Excel در شبیه سازی فرآیند گنجانده شده است.

در اغلب این کارها و بسیاری از کارهایی که در اینجا به آن‌ها اشاره نشده است، از نرم افزار Matlab برای ارزیابی فرایندی و اقتصادی استفاده شده بود و در برخی دیگر از کارها همواره توجه ویژه‌ای به انرژی مورد نیاز سیستم و نه امکان تولید انرژی از پیکربندی سیستم

غشایی طراحی شده وجود داشت در این کار ما از توربین برای تولید انرژی نیز استفاده کردیم تا صرفه جویی اقتصادی را به حد بیشینه برسانیم. در این کار برای پر کردن شکاف‌های موجود در مقالات منتشر شده قبلی که برخی از آن‌ها در (جدول ۱) آورده شده‌اند، تصمیم گرفتیم از شبیه سازی با Aspen plus جفت شده با برنامه نویسی Matlab برای تعریف روابط فنی و اقتصادی برای بررسی حساسیت فرآیند جداسازی کربن دی اکسید از متان براساس داده‌های مشابه خوراک پالایشگاه گاز طبیعی استفاده کنیم که مشخص شد اینکار در بررسی مقالات منتشر شده کم سابقه و یا حداقل با رویکرد گروه ما بی سابقه بوده است.

جدول ۱. مرور پژوهش‌های پیشین

مرجع	موضوع مورد مطالعه	رویکرد شبیه سازی یا مدل سازی یا برنامه نویسی
[۱۱]	گاز دودکش در نیروگاه برق تأمین شده با گاز طبیعی	برنامه نویسی در MATLAB
[۱۲]	جداسازی گاز طبیعی	برنامه نویسی در MATLAB
[۱۳]	جداسازی گاز طبیعی	شبیه سازی و برنامه نویسی Aspen Plus
[۱۴]	شبکه یکپارچه راکتور و ساختار برتر غشایی	برنامه نویسی غیر خطی عدد صحیح مختلط (MINLP)
[۱۵]	تعیین هم زمان ساختار مولکولی غشا و طراحی فرآیند از طریق یادگیری ماشین همراه با بهینه سازی	برنامه نویسی غیر خطی عدد صحیح مختلط (MINLP)
[۱۶]	طراحی خودکار، بهینه سازی، معیارسنجی و تحلیل فنی-اقتصادی انواع مختلف سیستم‌های غشایی	طراحی یک زبان برنامه نویسی

۲. شبیه سازی و مدل سازی

نمی‌شود، بنابراین یک مدل غشایی سفارشی با استفاده از «مدل کاربر، زیربرنامه کاربر ۲» در کتابخانه Aspen Plus طراحی و برنامه ریزی گردید. این مدل می‌تواند به یک فایل Microsoft Excel به عنوان محیط منبع برای تعریف متغیرها و محاسبه پارامترها متصل شود. روابط مدل انتقال در غشا همراه با تراوش پذیری‌ها و انتخاب پذیری‌های تجربی نمونه‌های غشایی ذکر شده در Microsoft Excel در رابط Aspen ONE - Microsoft Excel معرفی گردیدند. هر بلوک غشا دارای یک فایل Microsoft Excel

به منظور شبیه سازی فرآیند جداسازی غشایی در نرم افزار Aspen Plus برای کلیه نمونه‌های غشایی از پیش ساخته شده پارامترهای جداسازی این غشاهای مانند تراوش پذیری و انتخاب پذیری به عنوان ورودی‌های اصلی شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای این منظور Aspen Plus نسخه ۱۰ برای شبیه سازی تنظیمات غشا تک مرحله‌ای، دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای با استفاده از معادله حالت Peng-Robinson به عنوان روش پایه استفاده گردید. کتابخانه Aspen Plus شامل سیستم جداسازی غشا



منحصر به فرد خواهد بود که به‌طور مناسب طراحی و برنامه‌ریزی می‌گردد. داده‌های ورودی تعریف شده و مقادیر آن‌ها در محیط مازول غشای Aspen Plus وارد می‌شود. این داده‌ها به‌عنوان ورودی به Microsoft Excel منتقل می‌شود، سپس محاسبات در محیط Excel انجام شده و در نهایت نتایج محاسبات به محیط Aspen Plus منتقل شده تا به کاربر به عنوان نتیجه شبیه‌سازی ارائه شود. به‌عنوان خوراک ورودی شبیه‌سازی ما خواص جداسازی غشاهای ساخته شده را به عنوان ورودی به Excel می‌دهیم.

مکانیسم حلالیت-نفوذ محلول شناخته شده و پذیرفته شده به‌عنوان پایه مدل‌سازی در این پژوهش انتخاب شد. بر همین اساس داریم [۱۳، ۱۷]:

$$J_{CO_2} = \frac{yQ}{A} = P_A [p_f x - p_p y] \quad (۱)$$

$$J_{CH_4} = \frac{(1-y)Q}{A} = P_B [p_f (1-x) - p_p (1-y)] \quad (۲)$$

که در آن‌ها y ترکیب درصد CO_2 در تراویده، x ترکیب درصد CO_2 در سمت خوراک، A سطح مقطع مؤثر غشا برحسب m^2 ، P_A تراوایی CO_2 برحسب GPU، P_B تراوایی CH_4 برحسب p_f و p_p به ترتیب فشار سمت خوراک و سمت تراویده برحسب bar، Q دبی حجمی تراویده برحسب m^3/s و J_{CO_2} و J_{CH_4} به ترتیب شار تراویده دی‌اکسید کربن و متان می‌باشند.

با تقسیم دو معادله بالا خواهیم داشت:

$$\frac{y}{1-y} = \alpha \frac{p_f x - p_p y}{p_f (1-x) - p_p (1-y)} \quad (۳)$$

که در آن α انتخاب پذیری CO_2/CH_4 غشاء است.

بازآرایی معادله (۳) در قالب معادله جبری خطی مرتبه دوم به‌دست می‌آید:

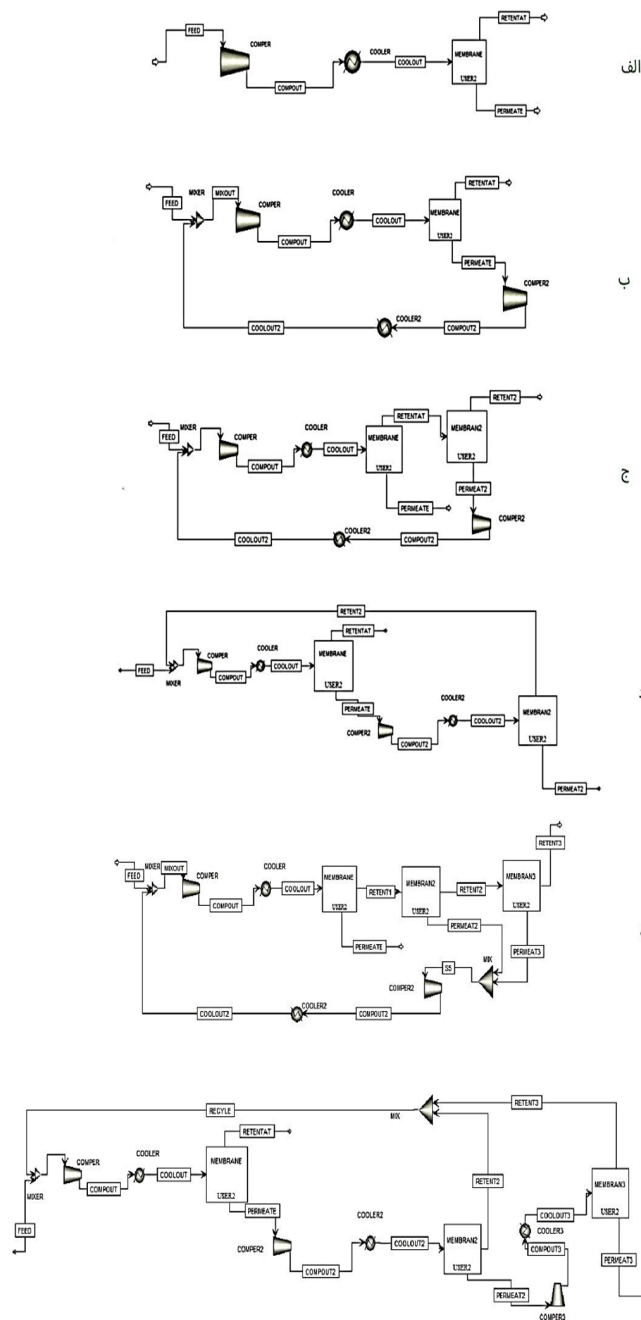
$$\left(\frac{p_p}{p_f} - \alpha (p_p - p_f) \right) y^2 + \left(1 - x + \alpha x - \frac{p_p}{p_f} + \alpha (p_p - p_f) \right) y - \alpha x = 0 \quad (۴)$$

حل این معادله y و در نتیجه شار نفوذکننده از غشاء (J) را به‌دست می‌دهد. از آنجاییکه مازول‌های غشاء دارای ناحیه مؤثر محدودی برای نفوذ هستند، باید مازول‌های غشایی متعددی در فرآیند تصفیه وجود داشته باشد:

$$J_{total} = n J_{single} \quad (۵)$$

که در آن J_{total} شار کل مازول‌های به‌کارگیری شده هست و J_{single} شار عبوری از یک مازول می‌باشد و n تعداد مازول می‌باشد. طراحی سیستم فرآیند غشایی عمدتاً براساس پارامترهای هر مازول غشایی و پیکربندی آن‌ها است. اگر خلوص بالا ضروری نباشد، پیکربندی سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای منجر به بازیابی رضایت‌بخش می‌شود. برای نیازهای جداسازی با خلوص بالا، استفاده از سیستم جداسازی غشایی چندمرحله‌ای ضروری است که می‌تواند از تراویده یا پسماند به‌عنوان جریان برگشتی^۱ (بازیافت) استفاده کند. طراحی سیستم با چندین مرحله پیچیده است زیرا نمی‌توان تمام ترکیب‌بندی سیستم غشایی را در نظر گرفت. در این کار، تصمیم‌گرفتن شش پیکربندی مختلف از سیستم‌های غشایی مشابه کار احمد و همکارانش با هائیسس [۱۸] در اسپن پلاس شبیه‌سازی شده‌اند: تک‌مرحله‌ای^۲ (SiS)، تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراویده^۳ (SiSRP)، دومرحله‌ای با بازیافت تراویده^۴ (DoSRP)، سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند^۵ (DoSRR)، سه مرحله‌ای با بازیافت تراویده^۶ (TrSRP) و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند^۷ (TrSRR). نمودارهای جریان فرآیند این شبیه‌سازی‌ها در (شکل ۱ الف-و) ارائه شده است. آنالیز حساسیت^۸ در اسپن پلاس برای تعیین اثر متغیرهای تعریف شده بر شار نفوذ هر پیکربندی سیستم غشایی استفاده شده است.

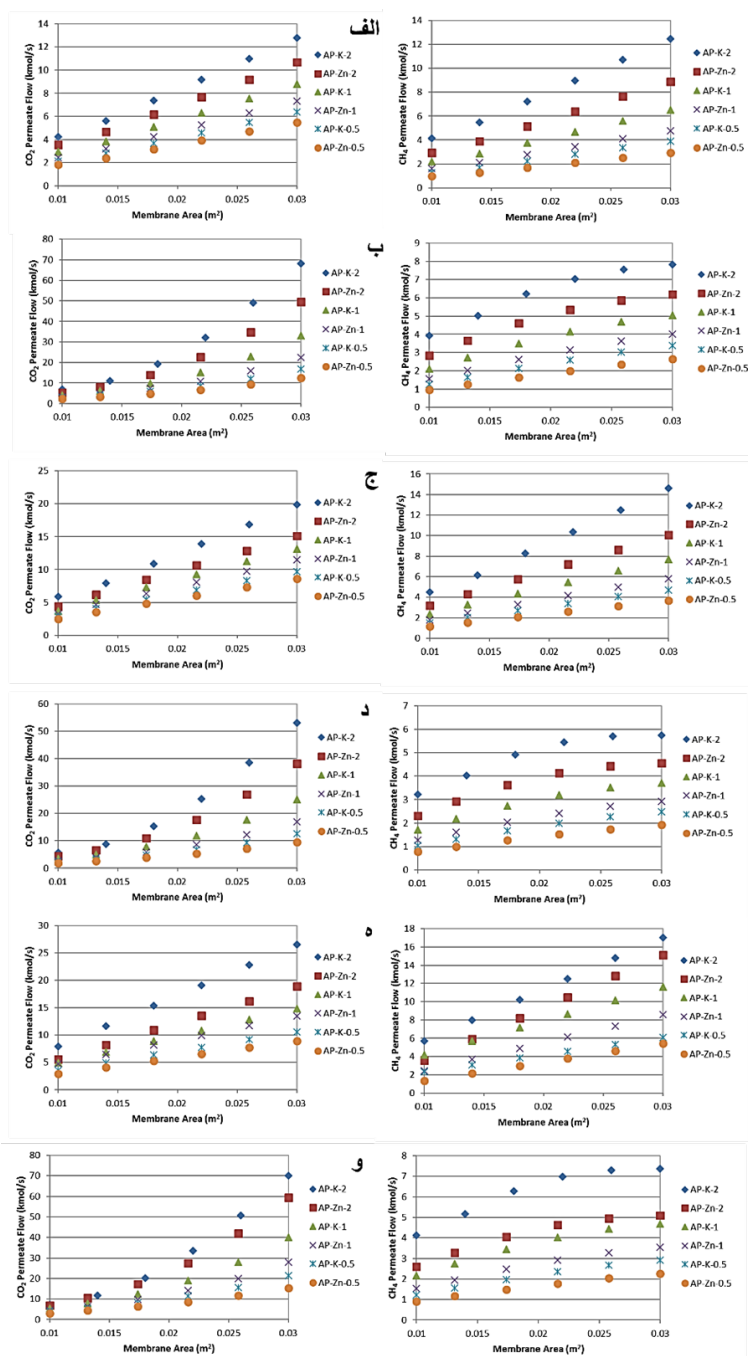
1. Recycle
2. Single step
3. Single step with recycle of permeate
4. Double step with recycle of permeate
5. Double step with recycle of retentate
6. Triple step with recycle of permeate
7. Triple step with recycle of retentate
8. Sensitivity Analysis



شکل ۱. جریان فرآیند الف) سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای (SiS) ب) سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای با بازیافت تراوا (SiSRP) ج) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت تراوا (DoSRP) د) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند (DoSRR) ه) سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا (TrSRP) و) سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند (TrSRR)

بازیافت تراوا، سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت تراوا، سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند، سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا و سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند) به ترتیب در (شکل ۲ الف - و) ارائه شده است.

۳. بررسی تأثیر پارامترهای شبیه‌سازی بر فرآیندهای
۱-۳. تأثیر مساحت غشاء و تعداد ماژول بر نرخ نفوذ جریان
پیکربندی‌های مختلف سیستم غشایی شبیه‌سازی شده
کربن دی اکسید و متان (سیستم جداسازی غشایی
تک مرحله‌ای، سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای با



شکل ۲. اثر شبیه‌سازی شده غشاء بر روی نرخ جریان تراوای دی‌اکسید کربن و متان در الف) سیستم تک‌مرحله‌ای ب) سیستم تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا ج) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت تراوا د) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند هـ) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا و) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

دلیل این امر به تغییرات در نرخ جریان خوراک ورودی به غشا بازمی‌گردد. در تنظیمات تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا دو- و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند، درصدی قابل توجه از جریان خروجی به خوراک برگشت داده می‌شود. بنابراین بخشی از خوراک، قبل از ورود به غشا، تصفیه شده‌تر است و محتوای CO_2 در جریان تراوا افزایش می‌یابد. برای متان، از آنجا که مقدار زیادی از جریان بازیافتی از گاز متان تخلیه

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید جریان تراوای دی‌اکسید در سیستم‌های غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و همچنین در سیستم‌های دو و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند، در سطح‌های غشایی بزرگ به‌طور قابل توجهی از جریان در سیستم‌های جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای و از جریان در سیستم‌های دو- و سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا بالاتر است؛ این تفاوت برای گاز متان مشاهده نمی‌شود.

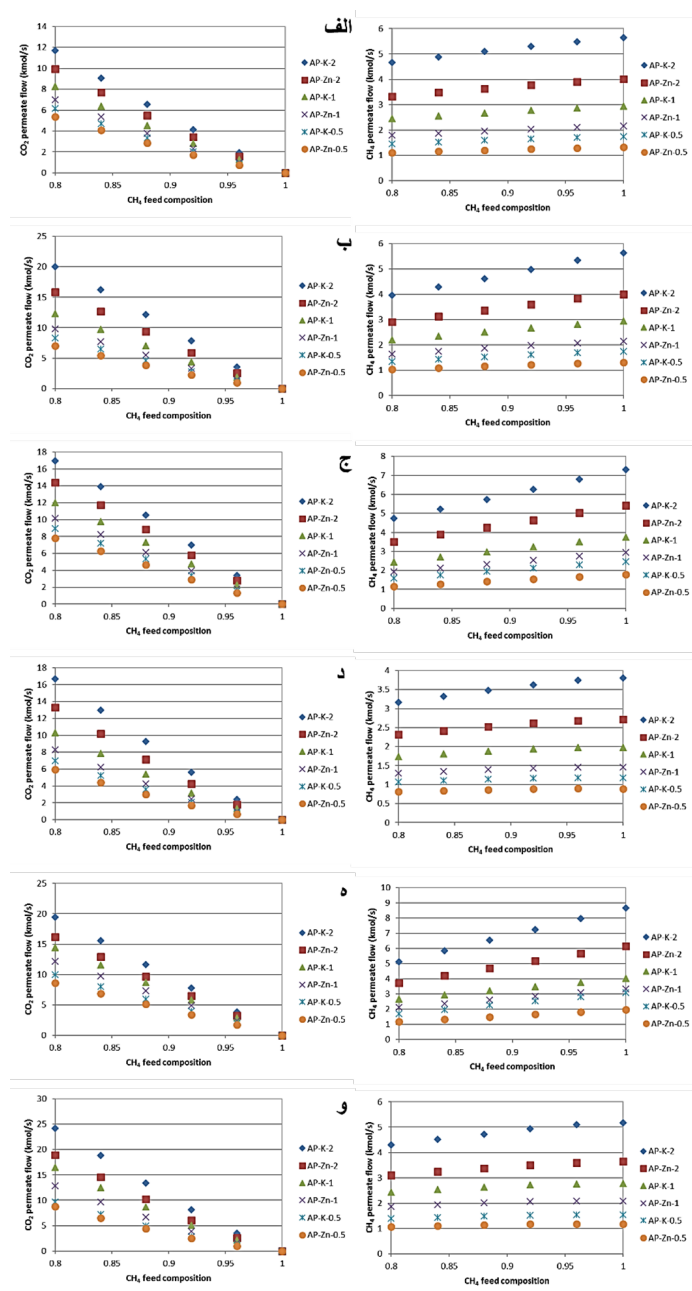
معنای آن است که برای این نمونه‌های غشای ماتریس آمیخته، افزایش سطح غشاء به بهبود عملکرد جداسازی و اختلاف بیشتر بین نرخ‌های تراوا برای CO_2 و متان منجر می‌شود.

۲-۳. تأثیر ترکیب خوراک غشایی بر نرخ جریان تراوا

تأثیر ترکیب خوراک گازی متشکل از کربن دی‌اکسید و متان در پیکربندی‌های شش‌گانه سیستم غشایی شبیه‌سازی شده در (شکل ۳ الف- و)، بر روی تراوایی CO_2 و CH_4 برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده ارائه شده است.

می‌شود، نرخ جریان تراوا کاهش می‌یابد. افزایش غیرخطی نرخ جریان CO_2 و کاهش نرخ جریان متان با افزایش سطح غشاء در پیکربندی‌های تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و دو- سهم‌مرحله‌ای با بازیافت پسماند می‌تواند با نرخ‌های بازیافت بالاتر در این پیکربندی‌ها ارتباط داشته باشد.

همچنین، در پیکربندی‌های با نرخ بازیافت بالاتر، سیستم‌های غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و دو- سهم‌مرحله‌ای با بازیافت پسماند سطح بالاتری از غشاهای ماتریس آمیخته با تراوایی بالاتر گازها را در بر می‌گیرند. این به



شکل ۳. اثر ترکیب خوراک غشایی شبیه‌سازی شده بر روی نرخ جریان تراوا دی‌اکسید کربن و متان (الف) سیستم تک‌مرحله‌ای (ب) سیستم تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا (ج) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت تراوا (د) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند (ه) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا (و) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

همان‌طور که در (شکل ۳) دیده می‌شود، هرچه نسبت متان در خوراک افزایش یابد، نرخ تراوای کربن دی‌اکسید در همه پیکربندی‌ها افت می‌کند، درحالی‌که تراوای متان به‌طور هم‌زمان بالا می‌رود. به‌طور قابل‌توجهی، کاهش CO_2 نسبت به افزایش CH_4 شدت بیشتری دارد؛ این امر از اینکه غشاهای ماتریس‌آمیخته در این مطالعه انتخاب‌پذیری بالایی برای CO_2 نسبت به CH_4 نشان می‌دهند، نشأت می‌گیرد. با افزایش محتوای متان خوراک از ۸۰ درصد به تقریباً ۱۰۰ درصد، محتوای خوراک CH_4 حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد، اما محتوای CO_2 خوراک از ۲۰ درصد به تقریباً صفر کاهش می‌یابد که به‌طور قابل‌توجهی کاهش تراوای CO_2 را توضیح می‌دهد و افزایش نسبی تراوای CH_4 را توضیح می‌دهد. در سطح متان خوراکی نزدیک به ۱۰۰ درصد، بالاترین بازیابی متان به دست می‌آید اما این بالاترین بازیابی در پیکربندی سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا مشاهده می‌شود و در حالیکه پیکربندی دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند کمترین بازیابی را دارد؛ یعنی وقتی خوراک تقریباً متان خالص است، پیکربندی سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا بهینه است و پیکربندی دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند نسبتاً مطلوب نیست.

دلیل اصلی این رفتار را می‌توان در نسبت سطح غشاء و تعداد ماژول‌ها جست: اگر سطح غشاء نسبتاً کم باشد (مثلاً 0.125 m^2) و تعداد ماژول‌ها محدود باشد (مثلاً ۱۰,۰۰۰,۰۰۰)، پیکربندی‌های دارای بازیافت تراویده عملکرد جداسازی و بازیابی متان بهتری نشان می‌دهند، زیرا مقدار بیشتری از متان به خوراک بازیافت می‌شود. این نکته در تحلیل حساسیت سطح غشاء و تعداد ماژول‌ها در مقادیر کم محور افقی قابل مشاهده است.

(شکل ۳) نشان می‌دهد که با محتوای بالای متان در خوراک، غشای ماتریس‌آمیخته با تراوایی بالاتر و انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 پایین‌تر، در کل رفتار بهتری از نظر جداسازی دارد. به‌طور کلی، بالاترین نرخ تراوای CH_4 در تمام پیکربندی‌ها به نمونه‌ای با بالاترین تراوایی CO_2 و CH_4 و کمترین انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 تعلق دارد.

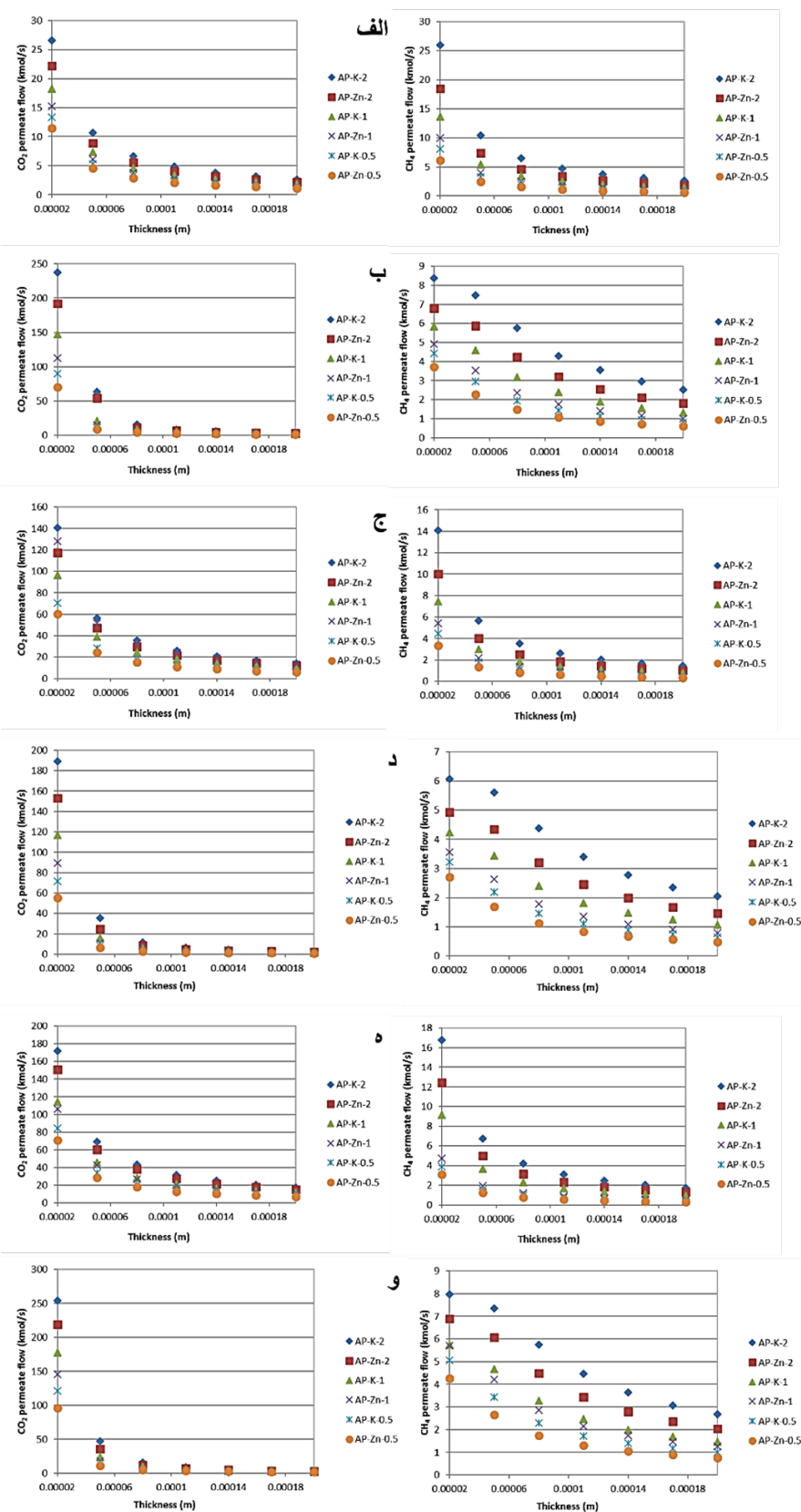
۳-۳. تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراوا

تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراویده کربن دی

اکسید و متان در پیکربندی‌های شش‌گانه سیستم غشایی شبیه‌سازی شده در (شکل ۴ الف- و)، برای همه غشاهای ماتریس‌آمیخته سنتز شده ارائه شده است.

با افزایش ضخامت غشاهای ماتریس‌آمیخته، نرخ تراوای CO_2 برای همه این غشاها در هر شش پیکربندی به‌شدت افت می‌کند و این کاهش، ناشی از کاهش تراوایی هر دو گاز CO_2 و CH_4 است، هرچند با توجه به اینکه این غشاها به‌طور مشخص انتخاب‌گر CO_2 هستند، اثر ضخامت بر تراوایی CO_2 نسبت به CH_4 نمایان‌تر می‌شود؛ افزایش ضخامت از ۲۰ میکرومتر به ۶۰ میکرومتر به معنی سه برابر شدن ضخامت غشا می‌باشد درحالی‌که افزایش ضخامت از ۶۰ میکرومتر به ۱۰۰ میکرومتر تقریباً دوسوم افزایش ضخامت را نشان می‌دهد که این نشان‌دهنده این حقیقت است که تأثیر تغییر ضخامت در غشاهای نازک‌تر شدیدتر هست در نتیجه تغییر شار گاز در ضخامت‌های کم نسبت به ضخامت‌های بالا چشمگیرتر است؛ مقایسه زیر شکل‌های (شکل ۴) نشان می‌دهد که قابلیت جداسازی CO_2 از CH_4 در تمامی پیکربندی‌های بررسی‌شده نسبت به پیکربندی جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای به‌طور قابل‌توجهی برتر است که این برتری به دلیل وجود جریان‌های بازیافت با نرخ‌های مختلف در پیکربندی‌های دو و سه مرحله‌ای است که محصول خالص‌تر را از طریق تصفیه مجدد جریان‌های تراویده یا پسماند ارائه می‌دهد؛ با توجه به مقایسه زیر شکل‌های (شکل ۴) مشخص می‌شود که هنگام استفاده از غشاهای ماتریس‌آمیخته با حداقل ضخامت ممکن، غشاهای پرتراواتر نسبت به سایر انواع غشاها در پیکربندی‌های شش‌گانه کارآمدتر عمل می‌کنند و با افزایش ضخامت، کارایی جداسازی کاهش می‌یابد و همچنین غشاهای ماتریس‌آمیخته با انتخاب‌پذیری بالاتر CO_2 نسبت به CH_4 در این سیستم‌ها کارآمدتر می‌شوند و این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد برای دستیابی به عملکرد جداسازی برتر در پیکربندی‌های مختلف دو شرط کلیدی وجود دارد:

۱. اطمینان از نازک بودن هر غشای استفاده‌شونده در هر ماژول غشایی در عین حفظ یکپارچگی مورفولوژیکی.
۲. به‌کارگیری بازیافت تراویده یا پسماند در سیستم جداسازی غشا.



شکل ۴. اثر شبیه سازی شده ضخامت غشاء بر روی نرخ جریان تراوادی اکسید کربن و متان (الف) سیستم تک مرحله ای (ب) سیستم تک مرحله ای با بازیافت تراوا (ج) سیستم دو مرحله ای با بازیافت تراوا (د) سیستم دو مرحله ای با بازیافت پسماند (ه) سیستم سه مرحله ای با بازیافت تراوا (و) سیستم سه مرحله ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

۴. مدل سازی فرآیندی و ارزیابی اقتصادی

مکانیسم حلالیت-نفوذ که مدلی تثبیت شده و به طور گسترده قابل اعتماد برای تعریف تراوایی از درون غشاء است، به عنوان پایه و اساس مدل سازی در این مطالعه در نظر گرفته شد. گرچه این مدل برای غشاهای ماتریس آمیخته با اصلاحاتی در کارهای برخی محققین دیده می شود اما در کار ما چون درصد وزنی کربن فعال در ماتریس پلیمر ناچیز می باشد مکانیزم عمده انتقال که همان حلالیت-نفوذ می باشد، برای ساده تر سازی فرآیند ارزیابی فنی و اقتصادی، در نظر گرفته می شود.

پیکربندی مناسب سیستم غشایی برای جداسازی واقعی کربن دی اکسید از متان نیازمند بروز خلوص بالا و در عین حال بازیابی بالا برای گاز پرتراواتر است؛ یعنی در کار ما علاوه بر اینکه در محصول گازی نهایی خلوص دی اکسید کربن باید بالا باشد، باید درصدی بالایی از دی اکسید کربن خوراک در محصول نهایی ظاهر شود. برای رسیدن به هر دو معیار عملکرد برای سیستم جداسازی، فرآیندهای غشایی چندمرحله ای همراه با یا بدون بازیافت تراویده یا پسماند به طور متعدد گزارش شده اند که در آن ها اکثر ماژول ها از نوع فیبر توخالی و نه تخت به منظور دستیابی به سطح جداسازی بالاتر بودند. ما در این کار با توجه به اینکه در بخش قبلی شبیه سازی فرآیند را انجام داده و عملکرد جداسازی شش پیکربندی متفاوت را از جهات مختلف با یکدیگر مقایسه کردیم، می توانیم برای بررسی بهترین پیکربندی از شبیه سازی که خودمان انجام دادیم بهره گیری نماییم. بدین منظور عملکرد فنی پیکربندی بر اساس صرفه اقتصادی آن تعیین می شود و بر اساس آن تصمیم گیری می شود که کدام

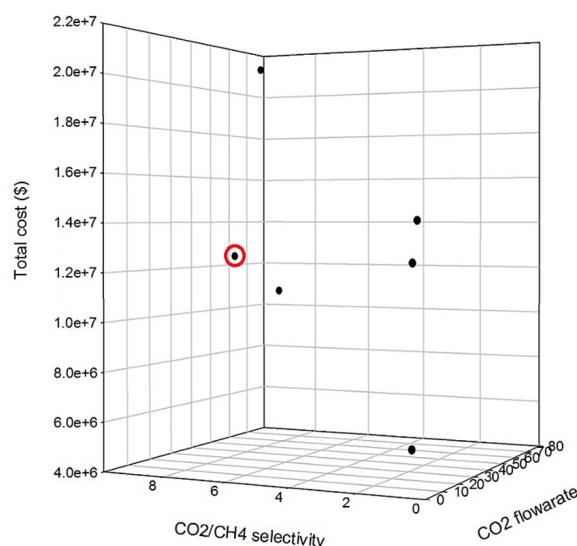
نوع پیکربندی برای محاسبات فنی و اقتصادی با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

برای بررسی دقیق تر اقتصادی یک پیکربندی جداسازی گاز غشایی، از بخش ارزیابی اقتصادی نرم افزار Aspen Plus ورژن ۱۰ کمک گرفته شد. برای این منظور شش پیکربندی متفاوتی که در شبیه سازی فرآیند، آنالیز حساسیت در مورد آن ها در Aspen Plus انجام شد، مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفتند. هدف از این کار تخمین سریع و سرانگشتی هزینه های ثابت و عملیاتی فرآیند می باشد که از طریق آن بتوان سیستم بهینه را انتخاب نمود. برای این منظور در نرم افزار Aspen plus بعد از اجرا شدن شبیه سازی، تیک Economic Active زده می شود و سپس از قسمت Mapping می توان Evaluate Cost را انتخاب کرد. سپس وارد پنجره ای می شویم که باید نوع تجهیزاتی که در شبیه سازی استفاده شده اند را معین کنیم. ما برای کمپرسورها، نوع سانتریفیوژی افقی را انتخاب کرده و برای کولرها، مبدل های حرارتی پوسته و لوله را انتخاب کردیم. چون ماژول غشایی در Aspen Plus تعریف نشده است تخمین قیمت آن را به صورت سرانگشتی از ضرب تعداد ماژول در سطح غشا در قیمت واحد یک ماژول غشایی در نظر گرفتیم. از قیمت سایر اجزا و لوله کشی و یوتیلیتی و غیره به دلیل اینکه در مقایسه با هزینه تجهیزات اصلی ناچیز بودند صرف نظر شد. سپس بهترین نمونه غشایی از لحاظ عملکرد جداسازی انتخاب گردید و عملکرد کل جداسازی پیکربندی های شش گانه بر اساس عملکرد این نمونه لحاظ گردید که مجموعاً به همراه محاسبات اقتصادی سرانگشتی در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر سرانگشتی محاسبه شده برای هزینه های ثابت، هزینه های عملیاتی، هزینه کل و همچنین دبی تراویده CO_2 و انتخاب پذیری پیکربندی های مختلف شبیه سازی شده محیط در Aspen Plus

پیکربندی غشایی	هزینه ثابت (\$)	هزینه عملیاتی (\$)	مجموع هزینه ها (\$)	دبی تراویده CO_2 (kmol/s)	نسبت CO_2/CH_4 در تراویده
SIS	۳۸۸۰۹۹۰	۱۵۱۹۰۴۰	۵۴۰۰۰۳۰	۱۲/۷۶	۱/۰۲
SISRP	۷۷۶۱۹۸۰	۳۰۳۸۰۸۰	۱۰۸۰۰۰۶۰	۶۷/۲۸	۸/۵۹
DoSRP	۸۹۶۱۹۸۰	۳۴۹۳۷۹۲	۱۲۴۵۵۷۷۲	۱۹/۸	۱/۳۷
DoSRR	۸۹۶۱۹۸۰	۳۴۹۳۷۹۲	۱۲۴۵۵۷۷۲	۵۳/۱	۹/۳۲
TrSRP	۱۰۱۶۱۹۸۰	۳۹۴۷۹۸۴	۱۴۱۰۹۹۶۶	۲۶/۵	۱/۵۶
TrSRR	۱۵۲۴۲۹۷۰	۵۹۲۱۹۷۶	۲۱۱۶۴۹۴۶	۷۰/۱	۹/۴۷

به منظور به دست آوردن پیکربندی بهینه جهت مطالعه برای محاسبات دقیق تر اقتصادی هزینه کل بر حسب دبی تراویده و انتخاب پذیری در نمودار سه بعدی رسم گردید که در شکل (۵) آورده شده است.

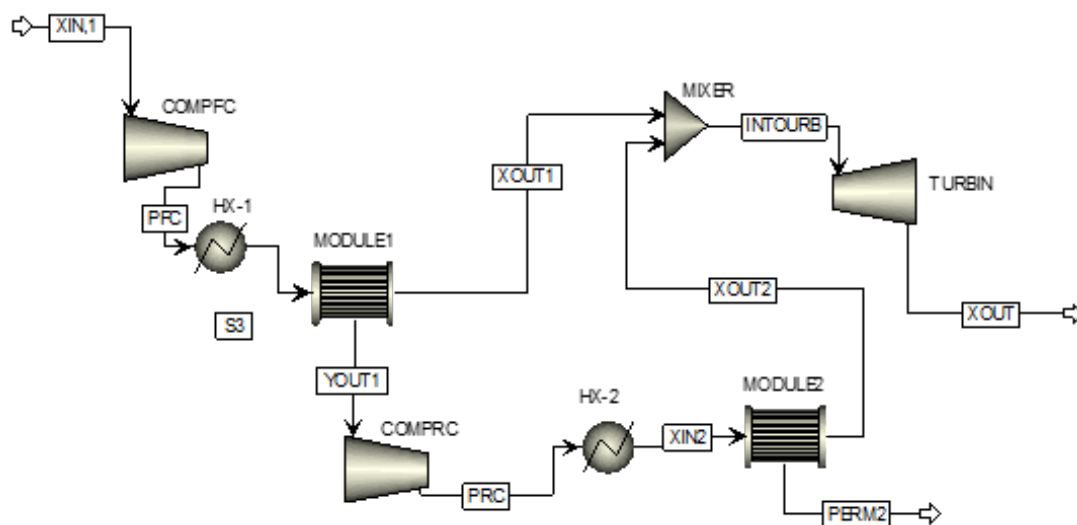


شکل ۵. هزینه کل پیکربندی های شش گانه جداسازی غشایی بر حسب دبی عبوری CO_2 و انتخاب پذیری CO_2/CH_4

همان طور که در (شکل ۵) دیده می شود، نقطه ای که دور آن دایره قرمز کشیده شده است به عنوان پیکربندی بهینه انتخاب شده است که مربوط به پیکربندی DoSRR می باشد. عامل اصلی انتخاب این گزینه به عنوان پیکربندی بهینه هزینه کل در مقایسه با عملکرد بوده است. اگر دقت کنید نقطه بالای نمودار که متعلق به پیکربندی TrSRR می باشد عملکرد جداسازی بهتری از نمونه DoSRR دارد اما هزینه تمام شده آن نزدیک به دو برابر می باشد در صورتی که بهبود عملکرد جداسازی آن چندان قابل توجه نیست. از طرفی اختلاف هزینه

DoSRR با SISRP قابل توجه نیست اما عملکرد جداسازی DoSRR نسبتاً بهتر می باشد. البته ممکن است SISRP هم پیکربندی جذابی باشد اما ما به علت عملکرد بهتر DOSRR در مقایسه با هزینه نه چندان بیشتر آن، این پیکربندی را به عنوان پیکربندی بهینه انتخاب کردیم.

(شکل ۶) نشان دهنده شماتیک پیکربندی دومرحله ای می باشد که تحت بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است قسمتی از پسماند برای راه اندازی توربین به کار می رود تا قسمتی از کار مورد نیاز کمپرسورها را تامین نماید.



شکل ۶. شماتیک پیکربندی جداسازی غشا دومرحله ای طراحی شده برای محاسبات اقتصادی

پیکربندی سیستم پیشنهادی سیستم غشایی دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند می‌باشد که در آن ارتباط بین دو مرحله جداسازی گاز براساس قوانین پایستگی جرم استوار است:

$$F_{in,2} = \dot{V}_{out,1} \quad (6)$$

$$x_{CO_2in,2} = y_{CO_2out,1} \quad (7)$$

$$x_{CH_4in,2} = y_{CH_4out,1} \quad (8)$$

که در آن $F_{in,2}$ دبی ورودی به مرحله دوم ($m^3 \text{ STP/h}$)، $\dot{V}_{out,1}$ دبی تراویده خروجی از مرحله اول ($m^3 \text{ STP/h}$)، $x_{CO_2in,2}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید ورودی به مرحله دوم، $y_{CO_2out,1}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید تراویده از مرحله اول، $x_{CH_4in,2}$ ترکیب درصد متان ورودی به مرحله دوم، و $y_{CH_4out,1}$ ترکیب درصد متان تراویده از مرحله اول می‌باشند.

برای تعریف پارامترهای ارزیابی برای عملکرد سیستم جداسازی کل غشاء، باید پارامترهای مربوط به ماژول غشای تک را تعریف کرده و آن‌ها را به کل سیستم تعمیم دهیم. پارامتر عملکرد برای تک ماژول به شرح زیر است:

$$purity_{CO_2} = y_{CO_2out2} \times 100 \quad (9)$$

$$Recovery_{CO_2} = \frac{\dot{V}_{out2} \times y_{CO_2out2}}{F_{in1} \times x_{CO_2in1}} \times 100 \quad (10)$$

$$Purity_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4out1} + F_{out2} x_{CH_4out2}}{F_{out1} + F_{out2}} \times 100 \quad (11)$$

$$Recovery_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4out1} + F_{out2} x_{CH_4out2}}{F_{in1} x_{CH_4in1}} \times 100 \quad (12)$$

$$I_{GP} = purity_{CO_2} + Recovery_{CO_2} + purity_{CH_4} + Recovery_{CH_4} \quad (13)$$

که در آن‌ها $\dot{V}$ دبی تراویده ($m^3 \text{ STP/h}$)، y و x به ترتیب ترکیب درصدی سمت تراویده و پسماند (خوراک)، دبی

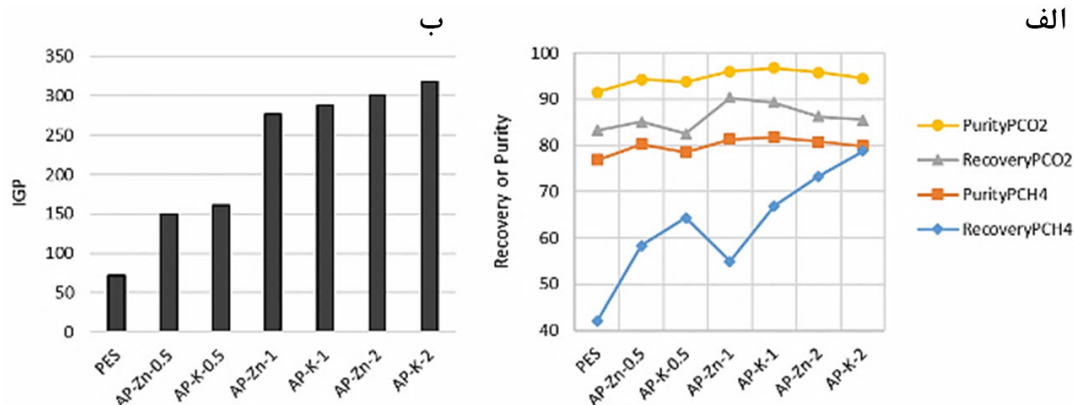
خوراک ($m^3 \text{ STP/h}$) می‌باشند. زیروندهای in و out به ترتیب خروجی یا ورودی بودن جریان را مشخص می‌کنند. CH_4 و CO_2 نشان‌دهنده محتوای ترکیب درصد می‌باشند، و شماره ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده مرحله ۱ و ۲ می‌باشند. Purity به معنی خلوص و recovery به معنی بازیابی جریان‌ها می‌باشند و I_{GP} شاخص عملکرد جهانی می‌باشد.

شاخص عملکرد جهانی^۱ به‌عنوان شاخص مورد قبول برای تعیین عملکرد جداسازی سیستم تعریف می‌شود. از این پارامتر می‌توان در بهینه‌سازی عملکرد سیستم و یا در آنالیز حساسیت سیستم استفاده کرد. اهمیت شاخص عملکرد جهانی در ارزیابی عملکرد فرآیند جداسازی این است که این عامل میزان تولید و درجه خلوص سیستم را در یک عبارت خلاصه می‌کند. بدیهی است که رابطه معکوسی بین این دو پارامتر وجود دارد، از این رو یافتن نقطه بهینه این رابطه که فاکتور شاخص عملکرد جهانی را به حداکثر می‌رساند مهم است.

برای ارزیابی اقتصادی سیستم پیشنهادی، رویکرد جدیدی برای تصفیه گاز طبیعی باکیفیت پایین انتخاب شد. در این رویکرد کلیه هزینه‌های مرتبط با کمپرسورها، اینترکولرها، ماژول‌های غشایی و به‌صورت ابتکاری توربین اضافه شده برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌اند و روابط ریاضی مربوط به محاسبه این هزینه‌ها در نرم‌افزار Matlab وارد شده‌اند و به ازای هر غشای قرار گرفته در ماژول‌های غشایی محاسبات قابل انجام و هزینه‌های قابل خروجی گیری هستند.

۴-۱. خلوص و بازیابی کربن دی‌اکسید و متان و فاکتور شاخص عملکرد جهانی غشاها

بازیابی کلی و خلوص هر دو گاز همراه با فاکتور شاخص عملکرد جهانی برای همه غشاها در (شکل ۷) ارائه شده است.



شکل ۷. الف) خلوص و بازیابی کلی کربن-دی اکسید و متان (محاسبه شده و ب) شاخص عملکرد جهانی برای همه غشاها

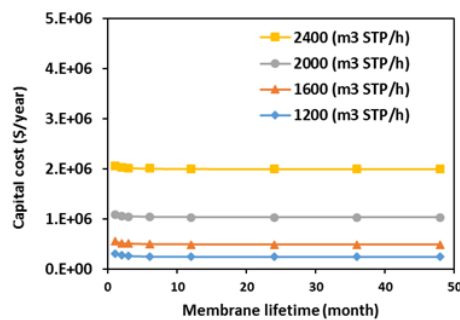
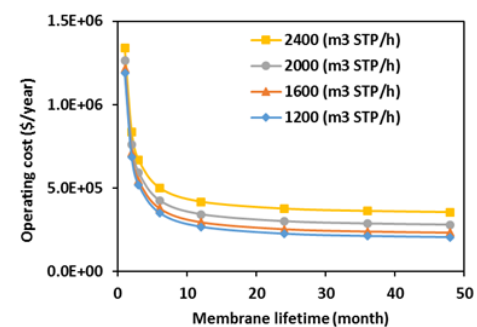
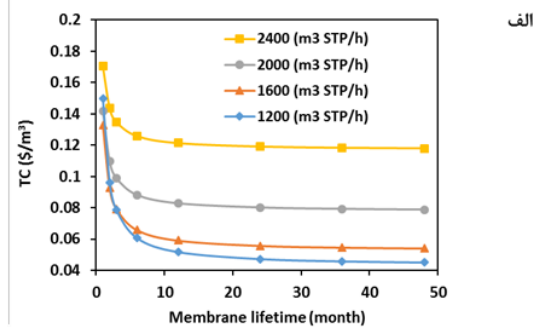
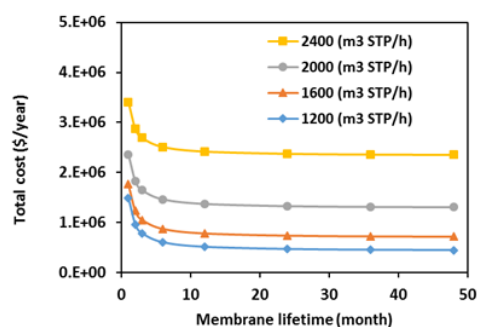
1. Index of Global Performance (I_{GP})

و انتخاب پذیری کربن دی اکسید /متان غشاها به دلیل اختلاط کربن فعال نه تنها خواص جداسازی غشاء پلی اتر سولفون را بهبود می دهد، بلکه عملکرد جداسازی کل پیکربندی سیستم پیشنهادی را نیز بهبود می دهد. تفاوتی بین شاخص عملکرد جهانی غشاهای AP-K و غشاهای AP-Zn وجود دارد که از نتایج تست های تراوایی شدیدتر می باشد. این نشان می دهد که با افزایش مراحل جداسازی، تفاوت بین عملکرد غشاهای شبیه سازی شده در سیستم جداسازی غشایی افزایش می یابد زیرا جریان تراوا تا حدی خالص شده به عنوان خوراک مرحله دو استفاده می شود و این منجر به مشاهده تفاوت عملکرد جداسازی بزرگتر در شبیه سازی بین غشاها می شود که تفاوت ملایم تری را در عملکرد جداسازی در آزمایش ها نشان می دهد.

۴-۲. کل هزینه ها، هزینه های سرمایه و هزینه های عملیاتی

برای سیستم، کل هزینه به ازای حجم واحد خوراک وارد شده، کل هزینه در سال، هزینه سرمایه در سال و هزینه عملیاتی در سال برحسب طول عمر غشاء در نرخ های جریان مختلف در (شکل ۸ الف-د) ارائه شده است

از (شکل ۷ الف) می توان استنباط کرد که با کاهش تراوایی غشاها، بازیابی کربن دی اکسید به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می گیرد. از آنجایی که خوراک عمدتاً متان است و تراوایی گاز غشاها نسبتاً کم است، بازیافت کربن دی اکسید بیشترین آسیب را می بیند. تغییرات بازیابی متان خفیف است و این به این دلیل است که تراوایی کم غشاء برای این گاز نمی تواند به طور قابل توجهی بر نرخ جریان بسیار بالای متان پسماند در هر مرحله تأثیر بگذارد. بازیابی کم کربن دی اکسید منجر به خلوص پایین متان در خروجی جریان پسماند شده شد، با این حال، خلوص کربن دی اکسید از ۱۵ درصد به بیش از ۹۶ درصد برای اکثر غشاهای مدل شده افزایش می یابد. فاکتورهای شاخص عملکرد جهانی، عملکرد غشا را در یک فرآیند دومرحله ای بهتر نشان می دهند (شکل ۷ ب). مقدار فاکتور شاخص عملکرد جهانی ایده آل ۴۰۰ است و نمونه های دارای بالاترین میزان کربن فعال، نزدیک ترین مقادیر شاخص عملکرد جهانی را به این عدد در مقایسه با سایرین دارند. فاکتور شاخص عملکرد جهانی برای غشاهای پلی اتر سولفون خالص به طور قابل توجهی کمتر از غشاهای AC/PES است. افزایش تراوایی



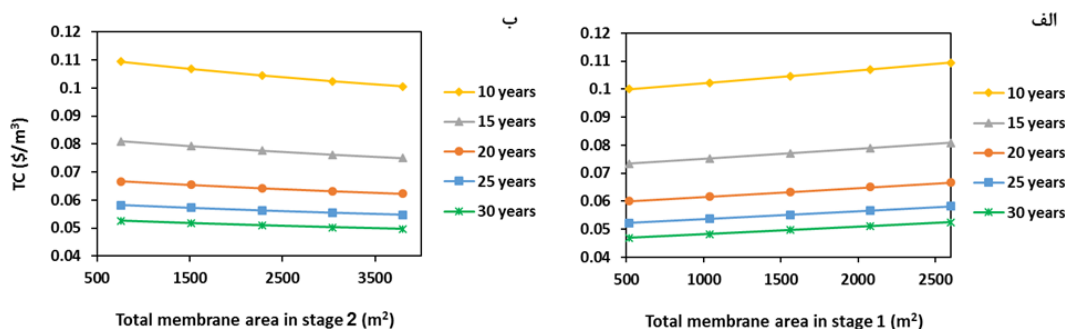
شکل ۸. الف (TC، ب) هزینه کل، ج) هزینه سرمایه گذاری و د) هزینه کل عملیاتی برحسب طول عمر غشا در دبی های مختلف

انتخاب یا سنتز غشاء برای شرایط عملیاتی واقعی، استقامت و دوام غشا باید در نظر گرفته شود زیرا اگر غشاء انتخاب شده عمر متوسط نسبتاً کوتاهی داشته باشد، این عامل به راحتی می تواند طراحی جذاب اقتصادی را از بین ببرد و یک فرآیند با صرفه اقتصادی را غیراقتصادی کند. طول عمر غشا به طور

در هر چهار بخش این شکل، با افزایش میانگین طول عمر غشاء، کل هزینه ها به ازای واحد حجم جریان، هزینه های کل، هزینه های سرمایه و هزینه های عملیاتی در نرخ های مختلف جریان کاهش می یابد. طول عمر غشاء زیر ۶ ماه باعث افزایش قابل توجهی در هزینه کل سیستم می شود. از این رو هنگام

مستقیم بر هزینه‌های جایگزینی غشا (MRC) تأثیر می‌گذارد که درصد قابل‌توجهی از هزینه عملیاتی (OC) سیستم در طول عمر کم غشاء است. به‌عنوان مثال برای غشایی با طول عمر ۴ سال، هزینه‌های جایگزینی غشا تنها حدود ۱۰ درصد هزینه عملیاتی است، اگر غشا طول عمر ۱ ماه داشته باشد، هزینه‌های جایگزینی غشا شامل ۸۴ درصد هزینه عملیاتی است. هزینه عملیاتی تنها بخشی از هزینه سرمایه است، از این رو تغییر در هزینه عملیاتی که بسیار شدید است، اثر قابل‌توجهی بر روی هزینه سرمایه به‌جز در طول عمر بسیار کم غشا ندارد. هنگامی که نتیجه این کار (شکل ۱۴ الف) را با سایر آثار منتشر شده (۱۹) مقایسه می‌کنیم، TC زیر $\$/m^3$ ۰/۰۵ که به‌عنوان سقف قیمت جذاب اقتصادی فرآیند تعیین شد، در این کار برای نمونه مورد بررسی در طول عمر غشاء بیش از ۲ سال به‌دست آمده است، به این معنی که برخی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق قابلیت به‌کارگیری در مقیاس بزرگ برای جداسازی گاز را دارند منوط بر اینکه

حداقل ۲ سال تحت عملیات دوام بیاورند. نکته مهم دیگری که از این شکل قابل استخراج است این است که عمدتاً با افزایش دبی جریان، تمام زیرمجموعه‌های هزینه‌ها افزایش می‌یابد، این تقریباً در تمام زیربخش‌های (شکل ۸) به‌جز شکل بخش الف در دو مقدار پایین نرخ جریان قابل‌مشاهده است. کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ ۱۲۰۰ F = ۱۰۰۰ در طول عمر غشاء زیر ۶ ماه است، اما پس از ۶ ماه کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ ۱۲۰۰ F = می‌باشد. این بدان معناست که برای غشاهای با طول عمر بیش از ۶ ماه، که شامل فعال‌ترین غشاهای صنعتی می‌باشند، دبی خوراک ۱۲۰۰ متر مکعب (STP) در ساعت از نظر اقتصادی جالب‌ترین عدد برای دبی خوراک یا به عبارتی این عدد دبی خوراک بهینه است. ما همچنین اثر طول عمر کل واحد جداسازی را بر روی TC در سطح‌های متفاوت غشاء در هر مرحله بررسی کردیم. نتایج در (شکل ۹ الف و ب) ارائه شده است.



شکل ۹. الف) TC در مقابل سطح غشاء در طول عمر صفحه مختلف برای الف) مرحله اول و ب) مرحله دوم

مورد افزایش سطح غشا در مرحله دوم (شکل ۹ ب) سناریوی کاملاً معکوس در مقایسه با افزایش سطح مرحله اول اتفاق می‌افتد. دلیل آن این است که افزایش سطح در مرحله دوم به‌اندازه آنچه برای مرحله اول مشاهده شد تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه توربین ندارد زیرا دبی پسماند مرحله دوم درصد کمی از کل جریان پسماند است که وارد توربین می‌شود در نتیجه تأثیر آن بر هزینه‌های توربین زیاد نیست. این کاهش اندک در هزینه توربین مؤثرتر از افزایش هزینه‌های ترکیبی غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها در TC است که منجر به مشاهده کاهش TC با افزایش سطح غشاها در مرحله دوم می‌شود.

در فلوجارت زیر برای درک بهتر کاری که در این پروژه انجام شد، روند کاری که انجام شد و نتایجی که گرفته شد به‌صورت خلاصه آورده شده است.

در (شکل ۹ الف)، TC با افزایش سطح غشاء در مرحله اول با شیب نسبتاً ملایم افزایش می‌یابد. اما نرخ افزایش TC با کاهش طول عمر سیستم در مقایسه با افزایش سطح غشاء شدیدتر است. این بدان معنی است که پارامتر کل طول عمر واحد جداسازی از پارامترهای تعداد ماژول‌ها یا سطح غشاء در تعیین قابلیت اقتصادی سیستم حیاتی‌تر است. دو زیر (شکل ۹) با یکدیگر مقایسه می‌شوند، روند متناقض تغییر TC در دو شکل وجود دارد. این نتیجه به رابطه معکوس بین هزینه توربین و هزینه‌های مجموع غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها مربوط می‌شود. در نرخ جریان ثابت، افزایش سطح غشاء در مرحله اول باعث تراوایی بیشتر و دبی پسماند کمتر می‌شود، در نتیجه هزینه‌های ترکیبی غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها بر هزینه‌های توربین غالب است، از این رو شاهد افزایش TC با مساحت سطح غشا هستیم. در



شکل ۱۰. فلوچارت مراحل انجام و نتایج شبیه‌سازی، مدل‌سازی و ارزیابی اقتصادی در مطالعه حال حاضر

۴. نتیجه‌گیری

را افزایش می‌دهد اما در مرحله دوم این افزایش به کاهش هزینه کل منجر می‌شود بنابراین طول عمر و طراحی سطح غشاء دو عامل اصلی در اقتصادی بودن فرآیند هستند. یکی از نقاط قوت این مطالعه ارائه یک روند بهینه‌سازی شبیه‌سازی و از نتایج آن برآورد اقتصادی پیکربندی‌هایی از سیستم جداسازی غشایی می‌باشد که قبل از ساخت و صرف هزینه در مقیاس نیمه‌صنعتی و یا صنعتی می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های کل در اختیار مهندس طراح بگذارد. از جهتی این کارداری نقاط ضعفی نیز هست و یکی از عمده‌ترین آن‌ها عدم امکان تعمیم دهی نتایج آن به سیستم‌های غشایی با تعداد مراحل بیشتر و همچنین همراه با پیچیدگی جریان‌های برگشتی می‌باشد. زیرا در این حالت‌ها تعداد پارامترهای قابل‌بررسی بسیار زیاد می‌شوند و امکان بررسی تمامی آن‌ها به روش کنونی ممکن نیست و باید روندی دیگری برای بررسی آن‌ها طراحی گردد.

مراجع:

- [1]. Koutsiantzi C, Mitrakas M, Zouboulis A, Kellartzis I, Stavropoulos G, Kikkinides ES. Evaluation of polymeric membranes' performance during laboratory-scale experiments, regarding the CO₂ separation from CH₄. Chemosphere. 2022;299:134224.
- [2]. Osman AI, Nasr M, Farghali M, Bakr SS,



- [9]. Mirfasihi SS, Jomekian A, Bazooyar B. Modeling and simulation of hydrocarbon dew point adjustment of natural gas via supersonic separators. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 279–310.
- [10]. Bilal Jan M, Ahmad Saddiqi H, Adil Khan M, Ullah A, Imran Ahmad M, Ahmad F. Optimizing propane–propylene separation via Aspen Plus simulation and machine learning-based predictive modeling. *Sep Sci Technol*. 2026;3:1–21.
- [11]. Xu J, Wang Z, Qiao Z, Wu H, Dong S, Zhao S, et al. Post-combustion CO₂ capture with membrane process: Practical membrane performance and appropriate pressure. *J Memb Sci*. 2019;581:195–213.
- [12]. Liu B, Yang X, Wang T, Zhang M, Chiang PC. CO₂ separation by using a three-stage membrane process. *Aerosol Air Qual Res*. 2019;19(12):167–75.
- [13]. Jomekian A, Behbahani RM. Experimental, modeling and AspenPlus Simulation of different configurations of membrane separation Systems for highly loaded CO₂ selective Pebax 1657-ZIF-8 membrane. *J Membr Sci Res* [Internet]. 2021;7. Available from: <https://doi.org/10.22079/jmsr.2020.136920.1411>
- [14]. Taifan GSP, Maravelias CT. Integrated membrane material design and system synthesis. *Chem Eng Sci*. 2023;269:134–42.
- [15]. Taifan GSP, Maravelias CT. Generalized optimization-based synthesis of membrane systems for multicomponent gas mixture separation. *Chem Eng Sci*. 2022;252:117482.
- Eltaweil AS, Rashwan AK, et al. Machine learning for membrane design in energy production, gas separation, and water treatment: a review. Vol. 22, *Environmental Chemistry Letters*. 2024. p. 505–60.
- [3]. Ferro FS, Carmo BS. Numerical modeling and simulation of hollow fiber dense membranes for CO₂/CH₄ separation using CFD. *J Memb Sci*. 2025;729:124134.
- [4]. Yao X, Freger V, He X, Wang R, Kong B. Three-dimensional CFD modeling for hollow fiber gas separation membrane modules based on a dual porous media model. *Chem Eng Sci*. 2025;302:120864.
- [5]. Saidi M, Farokhi G. Membrane-based modeling and simulation of natural gas dehydration. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 211–53.
- [6]. Vakylabad AB. Process modeling and simulation of nitrogen separation from natural gas. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 335–66.
- [7]. Zabiri H, Kamaruddin B. Case studies of modeling and simulation of natural gas sweetening processes. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 145–61.
- [8]. Vakylabad AB. Process modeling and simulation of natural gas sweetening by absorption processes. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 3–29.



- [16].Demirel SE, Li J, Hasan MMF. Membrane Separation Process Design and Intensification. Ind Eng Chem Res. 2021;60(19):7197–7217.
- [17].Abejón R, Casado-Coterillo C, Garea A. Techno-Economic Optimization of Multistage Membrane Processes with Innovative Hollow Fiber Modules for the Production of High-Purity CO₂ and CH₄ from Different Sources. Ind Eng Chem Res. 2022;61(23):8149–8165.
- [18].Ahmad F, Lau KK, Shariff AM, Murshid G. Process simulation and optimal design of membrane separation system for CO₂ capture from natural gas. Comput Chem Eng. 2012;36:119–28.
- [19].Choi J, Ideta K, Yi H, Kato T, Saito K, Watanabe H, et al. Marine biomass-derived activated carbon as an electrode material for electric double-layer capacitors. Carbon Lett. 2025;35(3):1221–33.
- [20].Ismail AF, Lorna W. Penetrant-induced plasticization phenomenon in glassy polymers for gas separation membrane. Vol. 27, Separation and Purification Technology. 2002.

Sensitivity Analysis and Economic Optimization of Multistage Membrane Configurations for Carbon Dioxide Separation from Methane

Saeid Khademi¹, Abolfazl Kian^{2*}, Basir Maleki³

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Es-farayan University of Technology, Esfarayen, Iran
2. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 22 December 2025

Revised: 13 April 2026

Accepted: 03 May 2026

Keywords:

Methane-carbon dioxide separation
Mixed matrix membrane
Simulation
Aspen Plus
Economic evaluation

ABSTRACT

In this study, in order to perform a technical and economic comparative evaluation of membrane gas separation systems, six configurations consisting of single, two and three stages with permeate or waste return flow of membrane systems equipped with prefabricated membranes were simulated. These systems were designed for a case study of CO₂ separation from CH₄ in Aspen Plus environment and then the best configuration from an economic perspective was selected by short-cut economic calculations in the same software. This configuration was then transferred to MATLAB environment for more precise economic analyses. For this purpose, the permeability and selectivities of the prefabricated membranes used in the project were given as inputs to the MATLAB program and the output of the model, which was the purity of the exhaust gases and their recovery, was calculated. The global system performance index or IGP, which is simultaneously composed of the sum of the purity and the percentage of gas recovery, was calculated based on the process outputs. Using this index, the best membrane for the selected configuration was determined. Then, based on the physical and functional characteristics of the best sample, process economics calculations were performed and three key parameters Total costs, Capital costs and Operating costs were calculated. Based on the calculation of these parameters, it was determined that membranes with a lifespan of more than 2 years have lower replacement and maintenance costs and are more economically viable, due to the fact that the replacement costs are only a small part of the total system costs. Also, the optimal flow rate for membranes with a longer lifespan is about 1200 m³/h, due to the fact that at this flow rate, the total system cost is the lowest. As a result, using membranes with a long lifespan and adjusting the flow rate during this lifespan can improve the economic efficiency of the gas separation process.

DOR: 20.1001.1.2512.1115.1404.10.01

How to cite this article

S. Khademi, A. Kian, B. Maleki, Sensitivity Analysis and Economic Optimization of Multistage Membrane Configurations for Carbon Dioxide Separation from Methane. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 13(1): 53-70. (https://ijge.irangi.org/article_738765.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: ajomekian@esfarayen.ac.ir, (A. Kian).

Available online 21 June 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

