

# مقایسه فنی - اقتصادی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی توسط شبیه‌سازی فرآیند غشاء‌های پلیمری

محمد مهدی یوسفی<sup>۱</sup>، مصطفی جعفری<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. پژوهشگر، انستیتو گاز طبیعی مایع، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [mustafa.jafari@ut.ac.ir](mailto:mustafa.jafari@ut.ac.ir)

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۱۰ - ۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

## چکیده

در این پژوهش، بازیابی هلیوم از گاز طبیعی با فرآیند غشاء سه‌مرحله‌ای در نرم‌افزار PRO/II و با معادله حالت پنگ-رابینسون شبیه‌سازی شد. سه نوع غشاء پلیمری شامل پلی‌آمید<sup>۱</sup>، پلی‌پیرول<sup>۲</sup> و پلی‌سولفون<sup>۳</sup> تحت خوراک یکسان و معیارهای طراحی مشخص (خلوص ۹۰ درصد و بازیافت ۹۵ درصد) مقایسه شدند. اعتبارسنجی مدل با داده‌های مرجع انجام شد و روند افزایش خلوص به‌خوبی طی شد. ارزیابی فنی-اقتصادی نشان داد تراوایی بالاتر پلی‌آمید و پلی‌پیرول موجب کاهش مساحت غشاء و توان تراکم و در نتیجه بهبود هم‌زمان CAPEX و OPEX می‌شود. در سناریوی بهینه، سرمایه‌گذاری کل ۸ تا ۹ میلیون دلار، دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا ۵.۵ سال و نرخ بازگشت نزدیک به ۱۹ درصد برآورد شد. از این رو پلی‌آمید گزینه برتر اقتصادی و پلی‌پیرول جایگزین نزدیک آن است. همچنین تحلیل حساسیت نشان می‌دهد شاخص‌های اقتصادی به قیمت هلیوم حساس‌تر از تعرفه برق اند.<sup>۴۵</sup>

کلید واژه‌ها: بازیابی هلیوم، غشاء پلیمری، تراوایی، انتخاب پذیری، ارزیابی اقتصادی

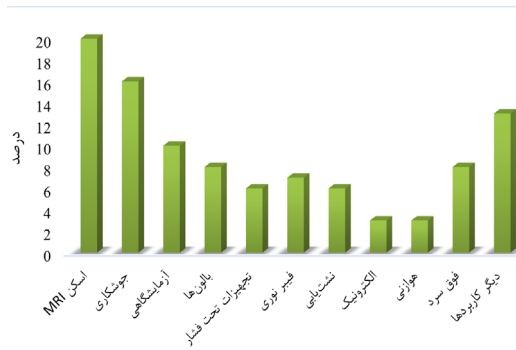
## ۱. مقدمه

هلیوم به‌عنوان دومین عنصر سبک و پایدار در جدول تناوبی، به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص مثل خنثی بودن، چگالی کم، نقطه‌جوش خیلی پایین (۴/۲ کلوین) و هدایت حرارتی بالا جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی پیدا کرده است [۱]. با توجه به خواص و ویژگی‌هایی که برای هلیوم ذکر شد، این گاز استفاده فراوانی در صنایع مختلف از جمله فناوری‌های برودتی و فوق سرد، تجهیزات تصویربرداری پزشکی، جوشکاری قوس تنگستن، صنایع

نیمه‌هادی و تأسیسات فضایی دارد که در (شکل ۱) نمایش داده شده است. بر اساس داده‌های موجود، مصرف سالانه هلیوم در جهان از ۱۷۰ میلیون مترمکعب گذشته و همچنان رشد قابل توجهی دارد [۲]. بخش عمده هلیوم از ذخایر گاز طبیعی به دست می‌آید که غلظت آن در منابع مختلف بسیار متغیر است. مثلاً از کمتر از ۰/۰۵ درصد در میدان‌هایی مانند پارس جنوبی<sup>۴</sup> در ایران تا بیش از ۱/۵ درصد در ذخایری مانند کلیف ساید<sup>۵</sup> در آمریکا.

1. Polyimidee
2. Polypyrrole
3. Polysulfone
4. South Pars
5. Cliffside





شکل ۱: کاربردهای هلیوم [۳]

چنین دامنه وسیعی در ترکیب خوراک، انتخاب فناوری مناسب بازیابی و ارزیابی اقتصادی پروژه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. فناوری‌های اصلی برای بازیابی هلیوم عبارتند از تقطیر فوق سرد، جذب با نوسان فشار<sup>۲</sup> و فرآیندهای مبتنی بر غشاء. در حال حاضر بیش از ۸۰ درصد هلیوم تولیدی جهان با فناوری فوق سرد، حدود ۱۵ تا ۱۸ درصد با فناوری جذب فشار نوسانی و حدوداً ۳ درصد توسط فناوری‌های غشائی بازیابی می‌شود [۴].

هرچند سهم غشاء بسیار کم است، اما برتری‌هایی همچون مصرف انرژی کمتر، طراحی ساده‌تر، قابلیت مقیاس‌پذیری و ترکیب‌پذیری با سایر فناوری‌ها باعث شده این روش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرد. تحولات نوین در مواد و معماری غشاءهای پلیمری، غشاءهای کامپوزیت ماتریس مختلط<sup>۳</sup> [۵]، و روش‌های ترکیبی مثل Membrane-PSA [۶] و Membrane-EHP [۷] مسیر را برای افزایش خلوص و بازده اقتصادی هموار کرده‌اند. این حال، استفاده صنعتی از غشاء برای بازیابی هلیوم با چالش‌هایی مواجه است. مهم‌ترین چالش، افت شدید بازده اقتصادی در خوراک‌های با غلظت کم هلیوم (کمتر از ۰.۳ درصد) و هزینه بالای فشرده‌سازی گاز است. مطالعاتی مثل توفیقی و محمدی [۸] و آلدرس و همکاران [۹] نشان داده‌اند که طراحی بهینه تعداد مراحل، بازیافت جریان‌های عبور کرده از غشاء و استفاده از غشاءهای با انتخاب‌پذیری بالا برای He/N<sub>2</sub> و He/CH<sub>4</sub> می‌تواند بازده را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. اگرچه مطالعات پیشین به بررسی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی پرداخته‌اند، اما همان‌طور که در (جدول ۱) نمایش داده شده است بیشتر آن‌ها یا بر فرآیندهای تقطیر

فوق سرد و جذب توسط نوسان فشار تمرکز داشته‌اند، یا تنها نتایج یک نوع غشاء پلیمری را گزارش کرده‌اند [۵]. در این پژوهش‌ها، عملکرد غشاء معمولاً در شرایط ثابت تحلیل شده و مقایسه هدفمند میان انواع مختلف غشاءها انجام نشده است. پتانسیل غشاءهای پیشرفته مانند غشاءهای غیرآلی، غشاءهای ماتریس مختلط و ساختارهای نوظهور بر پایه گرافن مطرح شده است، اما ارزیابی‌های فنی-اقتصادی جامع همچنان محدود باقی‌مانده‌اند. به‌ویژه تاکنون هیچ مطالعه شبیه‌سازی جامعی گزارش نشده است که انواع غشاءها را تحت خوراک یکسان مقایسه و اثر آن‌ها بر راندمان بازیابی، خلوص محصول، مصرف انرژی و اقتصاد کلی فرآیند را بررسی کند. این پژوهش، شکاف موجود را با توسعه یک شبیه‌سازی مبتنی بر نرم‌افزار PRO/II برای فرآیند غشاء چندمرحله‌ای و با استفاده از یک خوراک ثابت گاز طبیعی حاوی هلیوم بر می‌کند. در این مدل، عملکرد انواع مختلف غشاء پلیمری به‌طور هدفمند از نظر بازیابی هلیوم، خلوص محصول، نیاز انرژی و امکان‌سنجی اقتصادی ارزیابی می‌شود. این تحلیل مقایسه‌ای، دیدگاه‌های عملی درباره اثر جنس غشاء بر کارایی و اقتصاد فرآیند را فراهم کرده و راهنمایی برای انتخاب غشاء بهینه در کاربردهای صنعتی آینده ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مرور پژوهش‌های پیشین

محدودیت	درصد هلیوم خوراک	نوع غشاء	مرجع
انتخاب‌پذیری پایین، ارزیابی اقتصادی محدود	۰/۶ - ۰/۲	پلیمری	[۵]
عدم تمرکز بر یک نوع غشاء و کار با غشاءهای ترکیبی	~ ۰/۳	پلیمری	[۱۰]
مقیاس آزمایشگاهی، عدم ارزیابی اقتصادی	۰/۱	پلیمری	[۹]
عدم ارزیابی هزینه‌ها	۰/۴	معدنی	[۱۱]
عمدتاً مروری، ارزیابی اقتصادی بدون مقایسه	۰/۶ <	ماتریس مختلط	[۴]
محدود به کار با یک جنس و عدم مقایسه	۰/۶ - ۰/۳	ترکیبی	[۶]
فقط مروری، بدون شبیه‌سازی	~ ۰/۳	ترکیبی	[۷]

1. Cryogenic Distillation
2. Pressure swing adsorption (PSA)
3. Mixed matrix membrane

## ۲. روش کار

از جریان‌های گاز طبیعی به کار گرفته شده است [۵]. اطلاعات خوراک ورودی به فرآیند در (جدول ۲) نمایش داده شده است. مدل غشاء در نرم‌افزار PRO/II توسط پارامترهای نفوذپذیری که کاربر وارد می‌کند کنترل می‌شود. فقط مؤلفه‌هایی از غشاء عبور می‌کنند که ثابت نفوذ آن‌ها مقداری بزرگ‌تر از صفر داشته باشد. حداقل باید برای یک مؤلفه، ثابت نفوذ با مقدار مثبت توسط کاربر تعیین شود. معادله (۱) معادله حاکم بر این مدل را نمایش می‌دهد:

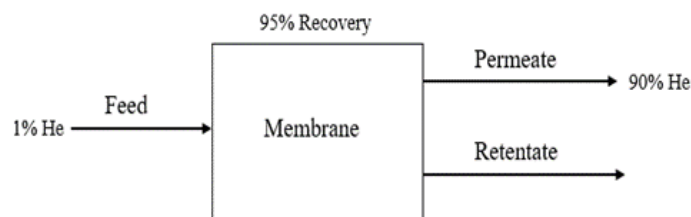
$$F_i = K_i \times A \times (P_{i,r} - P_{i,s}) \quad (1)$$

که در آن  $F_i$  دبی نفوذ جزء  $i$  از طریق غشاء،  $K_i$  ثابت تراوایی جزء  $A$ ،  $i$  سطح مقطع مؤثر قابل نفوذ غشاء،  $P_{i,r}$  فشار جزئی جریان باقی‌مانده و  $P_{i,s}$  فشار جزئی جریان عبور کرده از غشاء است. فرآیند نفوذ از سمت خوراک در سراسر غشاء به سمت جریان عبور کرده<sup>۱</sup> انجام می‌شود. تمام مؤلفه‌هایی که از غشاء عبور نمی‌کنند، جریان باقی‌مانده<sup>۲</sup> در سمت خوراک را تشکیل می‌دهند.

جدول ۲: مشخصات خوراک

مشخصات خوراک	
دبی (کیلومول بر ساعت)	۵۰۰
فشار (بار)	۵۰
دما (درجه سانتی‌گراد)	۲۵
ترکیب درصد مولی	
متان	۰/۸
نیتروژن	۰/۱۹
هلیوم	۰/۰۱

در (شکل ۲) شماتیکی از فرآیند قابل مشاهده است که هدف آن رسیدن به خلوص ۹۰ درصدی هلیوم در خروجی آخرین غشاء و ۹۵ درصد بازیابی هلیوم موجود در خوراک ورودی به فرآیند است.



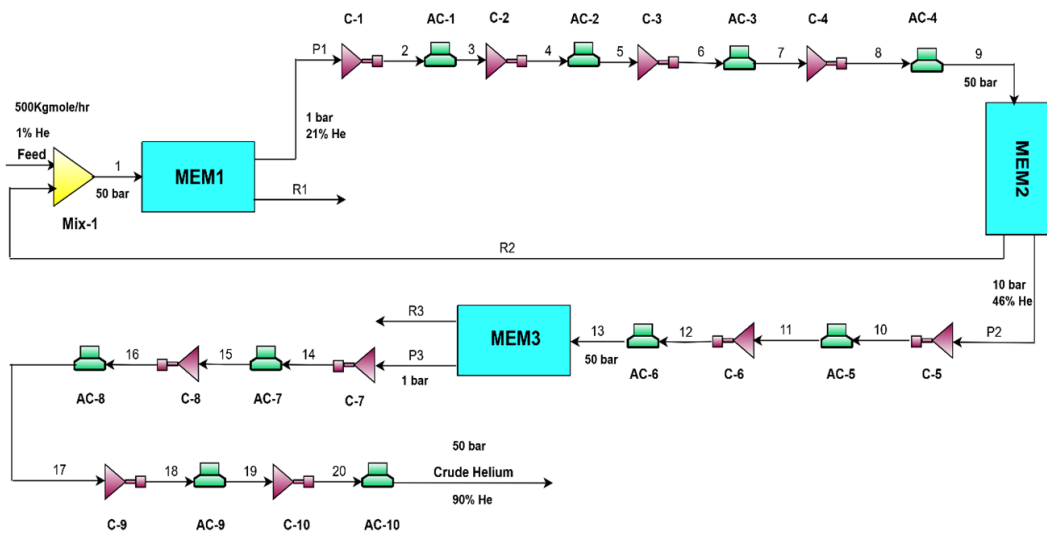
شکل ۲: شماتیک کلی از فرآیند

1. Permrte
2. Retentate

### ۳. شرح فرآیند

مرحله دوم جریان عبور کرده از غشاء دوم (P2) حاوی ۴۶ درصد مولی هلیوم است که در فشار ۱۰ بار قرار دارد و مجدداً توسط کمپرسورهای چندمرحله‌ای (C-5 و C-6) و خنک‌کننده‌های میانی (AC-5 و AC-6) به فشار ۵۰ بار و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد تا وارد غشاء بعدی شود. جریان باقی‌مانده (R2) نیز به دلیل داشتن مقداری هلیوم برای افزایش بازده و عملکرد فرآیند به مرحله اول بازگردانده می‌شود. در نهایت جریان خروجی از آخرین غشاء (P3) که در فشار ۱ بار قرار دارد توسط کمپرسورهای چندمرحله‌ای (C-7 تا C-10) و خنک‌کننده‌های هوایی میانی (AC-7 تا AC-10) به فشار ۵۰ بار و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و هلیوم خام با خلوص ۹۰ درصد تولید می‌شود.

فلوشیت فرآیند بازیابی هلیوم در نرم‌افزار PRO/II به صورت غشاءهای چندمرحله‌ای همراه با واحدهای تراکم و خنک‌سازی میانی طراحی شد که در (شکل ۳) نمایش داده شده است. در مرحله اول خوراک ورودی طبق مشخصات خط انتقال گاز طبیعی شیرین‌سازی و نم‌زدایی شده با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰ بار وارد غشاء اول می‌شود. جریان عبور کرده از غشاء اول (P1) در فشار ۱ بار قرار دارد و حاوی ۲۱ درصد مولی هلیوم است که طی افزایش فشار چندمرحله‌ای (C-1 تا C-4) همراه خنک‌کننده‌های هوایی میانی (AC-1 تا AC-4) فشار آن به ۵۰ بار و دمای آن به ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در



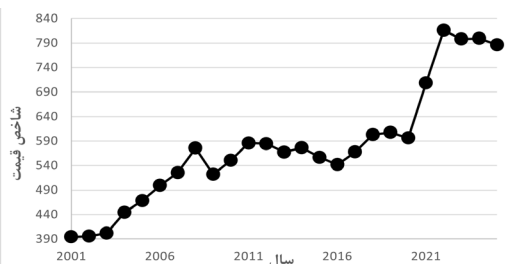
شکل ۳: شماتیک فرآیند غشاء سه مرحله‌ای

این فرآیند توسط سه جنس غشاء پلیمری شامل پلی‌آمید، پلی‌پیرول و پلی‌سولفون شبیه‌سازی شد است.

جدول ۳: مشخصات غشاءهای پلیمری

مرجع	تراوایی (Barrer)			انتخاب پذیری		جنس غشاء
	هلیوم	متان	نیتروژن	He/CH <sub>4</sub>	He/N <sub>2</sub>	
[۹]	۹۸/۵	۰/۶۳	۱/۲۷	۱۵۶	۷۷/۵	پلی‌آمید
[۹]	۸۹	۰/۵۴	۱/۲	۱۶۵	۷۴	پلی‌پیرول
[۱۲]	۱۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۱۷۱	۱۳۳	پلی‌سولفون

1. Barrer = 2.736E-9 (m<sup>3</sup>(STP).m/m<sup>2</sup>.bar.h)



شکل ۴: شاخص هزینه ساخت واحدهای فرآیندی (مهندسی شیمی)

جدول ۴: هزینه تجهیزات و نصب آن‌ها

تجهیزات	هزینه نصب (دلار)	هزینه تجهیز (دلار)	مرجع
کمپرسور	هزینه تجهیز $\times 2/5$	$4450 + (57 \times ACVF^2)^{0.8}$	[۱۴]
خنک‌کننده هوایی	هزینه تجهیز $\times 3/5$	$30000 \times Area^{0.4}$	[۱۶]
غشاء			
پلی‌آمید	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 75$	[۱۷]
پلی‌پیرول	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 40$	[۱۸]
پلی‌سولفون	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 50$	[۱۷]

جدول ۵: هزینه خوراک، محصول و تعرفه برق

پارامتر	مقدار	منبع
قیمت گاز طبیعی	۲ GJ/\$	[۱۹]
قیمت هلیوم	۱/۹ \$/m <sup>3</sup>	[۱۲]
قیمت برق	۰/۰۸ \$/Kwh	[۱۲]

هزینه برق مصرفی طبق توان مصرفی کمپرسورها و کولرهای هوایی با فرض زمان عملیاتی ۷۹۲۰ ساعت در سال محاسبه شد.

## ۵. نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از واحد شبیه‌سازی شده، درصد خلوص هلیوم در ورودی و خروجی هر مرحله از غشاءها با داده‌های مرجع [۹] مقایسه شد که در (جدول ۶) نشان داده شده است. انطباق مناسبی مشاهده گردید و انحرافها در بازه قابل قبول مدل‌سازی قرار گرفتند. تفاوت جزئی به دلیل وجود فرض‌های فرآیندی در تعریف نفوذپذیری برای غشاءها است. این هم‌خوانی نشان می‌دهد پارامترهای انتخاب شده توان بازتولید روند افزایشی خلوص در طول سه مرحله را دارند و نتایج شبیه‌سازی از نظر کیفی و کمی قابل اتکا هستند.

1. utility
2. Actual Volume Flow

معمولاً نفوذپذیری‌ها به صورت تراوایی وجود دارند، اما در نرم‌افزار PRO/II امکان وارد کردن مستقیم تراوایی وجود ندارد و باید به صورت نفوذپذیری سطحی وارد شود که برای انجام این کار و تبدیل واحدها از معادله مربوطه استفاده می‌شود [۱۲]، که در آن با در اختیار داشتن مقادیر تراوایی و ضخامت غشاء مورد استفاده می‌توان نفوذپذیری سطحی را محاسبه و وارد نرم‌افزار کرد.

## ۴. ارزیابی اقتصادی فرآیند

پیش از احداث هر واحد صنعتی باید مطالعه امکان‌سنجی انجام شود تا از توجیه اقتصادی طرح اطمینان حاصل گردد. پیش‌نیاز ارزیابی اقتصادی، دو گام اصلی است: جمع‌آوری اطلاعات و قیمت‌های روز بازار و سپس طراحی واحدهای عملیاتی. نخستین خروجی محاسبات اقتصادی، برآورد سرمایه‌گذاری لازم و هزینه‌ها باتکیه بر تخمین قیمت تجهیزات فرآیندی است. یک طراحی پذیرفتنی باید امکان بهره‌برداری سودآور را نشان دهد، بنابراین آشنایی مهندس شیمی با انواع هزینه‌های تولیدی ضروری است [۱۳]. سرمایه پروژه به دو بخش تقسیم می‌شود: سرمایه ثابت (تأمین تسهیلات<sup>۱</sup> و تجهیزات فرآیندی، لوله‌کشی، عایق، سازه‌ها و ساختمان) و سرمایه در گردش (وجوه لازم برای عملیات روزمره). مجموع این دو، سرمایه‌گذاری کل را تشکیل می‌دهد. برای انجام موارد ذکر شده از کتاب طراحی مهندسی شیمی [۱۴]، به همراه تبدیل شاخص‌ها به سال ۲۰۲۵ توسط شاخص هزینه ساخت واحدهای فرآیندی در (شکل ۴) و معادله (۲) استفاده شد [۱۵]. به منظور شفافیت در ارزیابی اقتصادی، هزینه‌ها در دو دسته مستقل ارائه شده‌اند. جدول هزینه تجهیزات شامل برآورد سرمایه‌گذاری ثابت واحد (کمپرسورها، خنک‌کننده‌های هوایی، غشاءها و هزینه نصب آنها) است پس از اعمال ضرایب نصب و تعدیل شاخص به سال هدف تبدیل شده‌اند که در (جدول ۴) نشان داده شده است. در مقابل جدول هزینه‌های عملیاتی به مواد اولیه، محصولات و تسهیلات اختصاص دارد، یعنی هزینه‌های متغیر و ثابت سالانه مانند برق کمپرسورها که اطلاعات (جدول ۵) بیان‌کننده آن است.

$$Cost \text{ in Year } A = Cost \text{ in Year } B \times \frac{Cost \text{ in Year } A}{Cost \text{ in Year } B} \quad (2)$$

جدول ۶: اعتبار سنجی نتایج

خطا (درصد)	شبهه سازی ما (درصد)	مقاله مرجع (درصد)	
۵/۸	۲۱	۲۲/۳	خلوص هلیوم در خروجی اولین غشاء
۴	۴۴	۴۵/۸	خلوص هلیوم در خروجی دومین غشاء
۰/۲	۹۰	۹۰/۲	خلوص هلیوم در خروجی سومین غشاء

پس از تعیین چارچوب هزینه‌ها، طراحی ابعادی غشاءها انجام شد. مساحت مؤثر هر غشاء بر مبنای نفوذپذیری سطحی، اختلاف فشار، انتخاب پذیری و قیود طراحی شامل خلوص هلیوم ۹۰ درصد و بازده فرآیند ۹۵ درصد محاسبه شد که در (جدول ۷) قابل مشاهده است.

جدول ۷: سطح مقطع غشاءها (متر مربع)

پلی آمید	پلی پیرول	پلی سولفون
MEM 1: ۴۰۰	MEM 1: ۴۵۰۰	MEM 1: ۳۷۳۰۰
MEM 2: ۱۵۰۰	MEM 2: ۲۰۰۰	MEM 2: ۱۴۰۰۰
MEM 3: ۱۰۰	MEM 3: ۱۲۰	MEM 3: ۹۳۵

برای مقایسه سه جنس غشاء یک آمار خلاصه جامع در (جدول ۸) ارائه می‌شود که در آن برای هر کدام از مواد استفاده شده در غشاء، اجزای اصلی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری گزارش شده‌اند. بخش سرمایه‌های شامل ستون‌های هزینه کل تجهیزات و نصب آنها، هزینه‌های داخل و خارج واحد، هزینه سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش است. در بخش بهره‌برداری برای هر یک از مواد انتخاب شده هزینه سالانه خوراک گاز، تعرفه برق و هزینه برق مصرفی بر اساس مصرف برق واحد طراحی شده وجود دارند. این اعداد با استفاده از همبستگی‌های هزینه و پس از تعدیل به سال ۲۰۲۵ با شاخص موردنظر محاسبه شده‌اند تا قابلیت مقایسه بین مواد مختلف حفظ شود. به این ترتیب می‌توان اثر انتخاب جنس غشاء را بر هزینه‌های سرمایه‌های

(از مسیر مساحت غشاء و توان کمپرسورها) و بر هزینه‌های عملیاتی<sup>۲</sup> (از مسیر برق و هزینه‌های مرتبط با غشاء) به صورت مستقیم ردیابی و سه جنس غشاء پلیمری را مقایسه کرد.

جدول ۸: خلاصه اطلاعات OPEX و CAPEX مربوط به هر جنس غشاء پلیمری

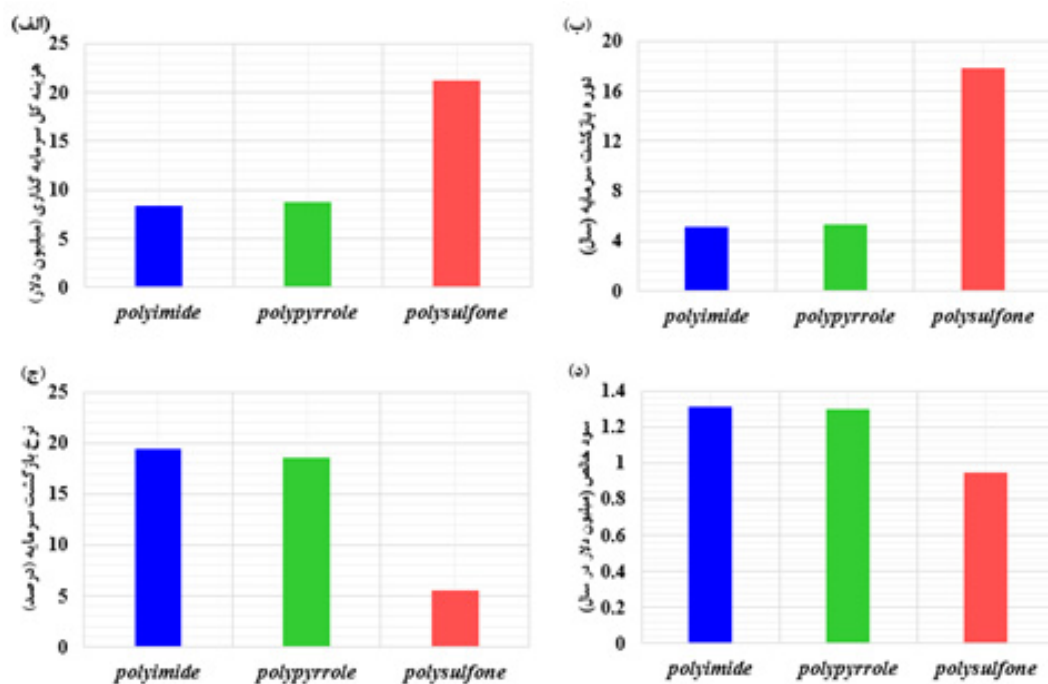
پارامتر	واحد	پلی پیرول	پلی آمید	پلی سولفون
هزینه‌های سرمایه‌ای				
هزینه کل تجهیزات	میلیون دلار	۰/۹۲	۰/۸۷	۳/۲۰
هزینه نصب تجهیزات	میلیون دلار	۲/۳۰	۲/۲۴	۴/۶۰
هزینه‌های داخل محدوده	میلیون دلار	۳/۲۱	۳/۱۱	۷/۸۰
هزینه‌های خارج محدوده	میلیون دلار	۱/۲۹	۱/۲۴	۳/۱۲
هزینه سرمایه‌گذاری ثابت	میلیون دلار	۶/۹۷	۶/۷۵	۱۶/۹۳
سرمایه در گردش	میلیون دلار	۱/۷۴	۱/۶۹	۴/۲۳
هزینه سرمایه‌گذاری کل	میلیون دلار	۸/۷۲	۸/۴۴	۲۱/۱۷
هزینه‌های سرمایه‌ای				
هزینه گاز خوراک	میلیون دلار	۵/۶۰	۵/۶۰	۵/۶۰
هزینه برق	میلیون دلار	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸
جمع هزینه‌های عملیاتی	میلیون دلار	۵/۶۷	۵/۶۶	۵/۶۸

در این بخش بر مبنای روابط و فرض‌های ارائه شده در بخش روش کار، ابتدا مقادیر سرمایه‌گذاری کل<sup>۳</sup> (از تجمیع هزینه‌های تجهیز و نصب) در (شکل ۵-الف) و سپس هزینه‌های عملیاتی سالانه (برق کمپرسورها، تعویض دوره‌ای غشاء و نگه‌داری) گزارش می‌شود. شاخص‌های عملکرد اقتصادی شامل دوره بازگشت سرمایه<sup>۴</sup> (شکل ۵-ب)، نرخ بازگشت سرمایه<sup>۵</sup> (شکل ۵-ج) و سود خالص

1. CAPEX
2. OPEX
3. Total Capital Investment
4. Payback Period
5. Rate of Return

با احتساب هزینه‌های داخل واحد<sup>۱</sup> و خارج واحد<sup>۲</sup> به همراه هزینه‌های مهندسی و طراحی و پیش‌بینی ریسک، محاسبه شده است. سپس سود خالص و دوره بازگشت سرمایه که حاصل تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری بر حاشیه سود است محاسبه شد و در نهایت نرخ بازده سرمایه از طریق جریان‌های نقدی سالانه به دست آمد.

سالانه (شکل ۵-د) محاسبه و گزارش می‌شود. تمامی نتایج در قیود عملیاتی ثابت فرآیند و از جمله خلوص هلیوم ۹۰ درصد و بازیابی ۹۵ درصد به دست آمده‌اند تا مقایسه‌ها منصفانه و معتبر باشد. هزینه سرمایه‌گذاری کل از جمع سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش به دست آمده است. در این طرح سرمایه سرمایه‌گذاری ثابت



شکل ۵: مقایسه شاخص‌های عملکرد اقتصادی غشاءها

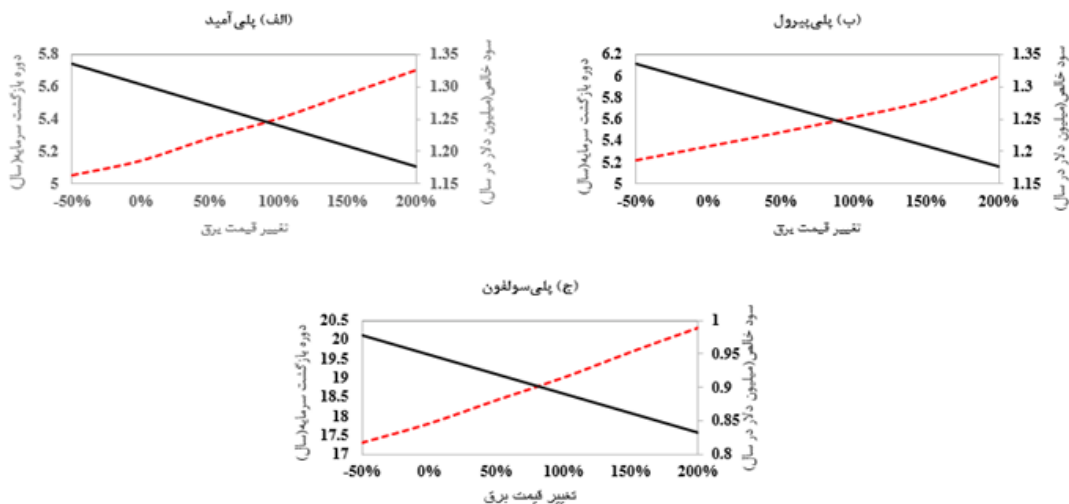
اقتصادی دیگر مثل مشخصات خوراک، خلوص هلیوم تولید شده، مقدار بازیافت هلیوم و قیمت تجهیزات ثابت در نظر گرفته شد. قیمت برق و هلیوم در بازه ۵۰- تا ۲۰۰+ درصد نسبت به قیمت کنونی تغییر داده شد و محاسبات برای هر جنس غشاء به‌طور مستقل تکرار شد و در هر حالت دو شاخص اقتصادی دوره بازگشت سرمایه و سود خالص در (شکل‌های ۶ و ۷) گزارش شد. همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است حساسیت اقتصادی فرآیند نسبت به تغییرات قیمت برق کاهش کمی دارد و تغییرات شاخص‌های اقتصادی برای هر سه جنس پلیمر انتخاب شده حدود ۸ تا ۱۰ درصد است.

<sup>۱۲</sup> بر پایه شواهد منتشر شده از مراجع و داده‌های نیمه‌صنعتی، سطح آمادگی یا بلوغ فناوری<sup>۳</sup> فرآیند بازیابی هلیوم توسط غشاء در بازه ۵ تا ۶ یعنی ارزیابی میدانی قرار دارد. همچنین با توجه به اینکه در حال حاضر امکان ساخت واحد نیمه‌صنعتی بازیابی هلیوم در ایران وجود ندارد، سطح بلوغ فناوری این فرآیند<sup>۳</sup> خواهد بود.

### ۶. تحلیل حساسیت

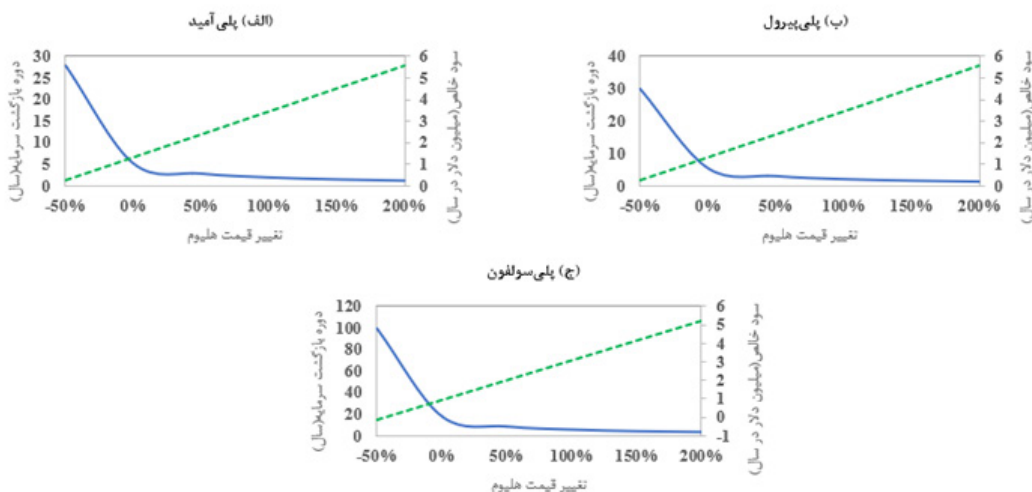
برای سنجش پایداری نتایج اقتصادی و نقش متغیرهای مستقل، تحلیل حساسیت‌های شاخص‌های اقتصادی مثل دوره بازگشت سرمایه و سود خالص نسبت به تغییرات قیمت برق و هلیوم انجام شد. در این تحلیل فروض فرآیندی و

1. Inside Battery Limits (ISBL)
2. Outside Battery Limits (OSBL)
3. Technology Readiness Level (TRL)



شکل ۶: تغییرات شاخص‌های اقتصادی نسبت به تغییر قیمت برق

اما فرآیند طراحی شده نسبت به تغییرات قیمت قیمت هلیوم چیزی در حدود ۷۰ تا ۳۵۰ درصد دچار تغییر می‌شوند. هلیوم کشش زیادی دارد و شاخص‌های اقتصادی با تغییر



شکل ۷: تغییر شاخص‌های اقتصادی نسبت به تغییر قیمت هلیوم

پس نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد با تغییر قیمت برق تغییرات در هر سه غشاء تقریباً خطی و محدود است، اما تغییر قیمت هلیوم شاخص‌های اقتصادی را به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌دهد؛ بنابراین رتبه‌بندی اقتصادی به ترتیب از آن پلی‌آمید، پلی‌پیرول و پلی‌سولفون خواهد بود و محرک اصلی اقتصاد این فرآیند قیمت هلیوم است.

#### ۷. نتیجه‌گیری

جمع‌بندی اقتصادی سه سناریوی غشایی در (شکل ۵) نشان می‌دهد پلی‌آمید و پلی‌پیرول از نظر شاخص‌های کلیدی کمتر (۸ تا ۹ میلیون دلار) و دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا

تقریباً هم‌تراز و به‌مراتب اقتصادی‌تر از پلی‌سولفون هستند. به دلیل اینکه غشای جنس پلی‌سولفون تراوایی کمتری نسبت به دو جنس دیگر دارد هزینه بیشتری برای ساخت غشاء برای رسیدن به درصد خلوص هلیوم بالا و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری نیاز دارد. پس به همین دلیل ساخت واحد بازیابی هلیوم توسط غشاء پلی‌سولفون علاوه بر داشتن هزینه سرمایه‌گذاری زیاد، دارای دوره بازگشت سرمایه زیادی هم نسبت به دو جنس غشاء دیگر است. در مقابل پلی‌آمید و پلی‌پیرول با داشتن هزینه سرمایه‌گذاری کل

کمتر (۸ تا ۹ میلیون دلار) و دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا

climate science plan—Future research directions,” US Geological Survey, 2330-5703, 2024.

- [3]. Z. Dai et al., “Helium separation using membrane technology: Recent advances and perspectives,” *Separation and Purification Technology*, vol. 274, p. 119044, 2021.
- [4]. Z. Hu and J. Li, “A review of helium resources and development,” *Natural Gas Industry B*, 2025.
- [5]. C. A. Scholes, U. K. Gosh, and M. T. Ho, “The economics of helium separation and purification by gas separation membranes,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 17, pp. 5014-5020, 2017.
- [6]. D. D. Nikolić and E. S. Kikkinides, “Modelling and optimization of hybrid PSA/membrane separation processes,” *Adsorption*, vol. 21, no. 4, pp. 283-305, 2015.
- [7]. W. Xiao et al., “Design and Optimization of a Novel Hybrid Membrane–Electrochemical Hydrogen Pump Process for Recovering Helium from NRU off Gas,” *Membranes*, vol. 13, no. 7, p. 689, 2023.
- [8]. M. A. Tofighy and T. Mohammadi, “Helium removal from natural gas by membrane technologies,” in *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 5: Natural Gas Impurities and Condensate Removal*: Elsevier, 2024, pp. 267-290.
- [9]. M. Alders, D. Winterhalder, and M. Wessling, “Helium recovery using membrane processes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 189, pp. 433-440, 2017.
- [10]. M. A. Quader, T. E. Rufford, and S. Smart,

۵/۵ سال نرخ بازگشت سرمایه نزدیک به ۱۹ درصد عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهند. همچنین درآمد عملیاتی و سود خالص سالیانه برای پلی‌آمید و پلی‌پیرول بیشتر از پلی‌سولفون است. از دید فنی-اقتصادی این نتایج با انتظار ناشی از تراوایی بالاتر و سطح مقطع کمتر برای پلی‌آمید و پلی‌پیرول سازگار است که هم مساحت غشاء و هم توان کمپرسورها را کاهش می‌دهد و بهبود هم‌زمان CAPEX و OPEX را رقم می‌زند. براین اساس، مگر آنکه الزامات ویژه فرایندی (مثل مقاومت شیمیایی و دما) انتخاب دیگری را تحمیل کند، پلی‌آمید گزینه برتر اقتصادی برای واحد سه‌مرحله‌ای جداسازی هلیوم است و پلی‌پیرول به‌عنوان جایگزین نزدیک قابل توصیه است. طول عمر ماژول‌های غشائی تابع ترکیب خوراک، فشار، دما و نحوه بهره‌برداری است و معمولاً به‌صورت چندساله گزارش می‌شود. در حضور ترکیبات اسیدی و هیدروکربن‌های سنگین به علت پدیده‌هایی مانند پیرشدگی پلیمر، آلودگی و گرفتگی افت کارایی غشاء زودتر رخ می‌دهد. این افت کارایی به‌صورت کاهش نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری غشاء، افزایش مساحت مؤثر موردنیاز و در نهایت کاهش بازافت ظاهر می‌شود. در این مدل‌سازی شرایط پایا و تقریباً هم‌دما فرض شده، نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری مستقل از زمان و تغییرات آنها نسبت به فشار نادیده گرفته شده است؛ بنابراین نتایج اقتصادی بیشتر نماینده عملکرد اولیه فرآیند هستند و اثر فرسودگی تدریجی در طول زمان به‌طور مستقیم مدل نشده‌اند. در عمل، پیشنهاد می‌شود ضریب دسترسی و هزینه تعویض دوره‌ای به تحلیل اقتصادی افزوده شود و با داده‌های آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی (پایش بلندمدت نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری روی خوراک واقعی) کالیبره گردد تا عدم قطعیت ناشی از عمر غشاء و افت کارایی کاهش یابد. برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود انواع خوراک گاز طبیعی حاوی هلیوم موجود در جهان برای بررسی عملکرد اقتصادی فرآیند بررسی شوند. همچنین مقایسه واحدهای مبتنی بر غشاء با واحدهای فوق سرد تولید هلیوم می‌تواند به ارزیابی و بهینه‌سازی این فرآیندها کمک قابل توجهی کند.

مراجع:

- [1]. J. S. Serra Leal, J. Incer-Valverde, and T. Morosuk, “Helium: Sources, applications, supply, and demand,” vol. 3, ed: MDPI, 2023, pp. 181-183.
- [2]. T. Wilson et al., “US Geological Survey

129416, 2021.

- [19]. B. Van Ruijven and D. P. Van Vuuren, "Oil and natural gas prices and greenhouse gas emission mitigation," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4797-4808, 2009.
- [11]. M. A. Quader, T. E. Rufford, and S. Smart, "Integration of hybrid membrane-distillation processes to recover helium from pre-treated natural gas in liquefied natural gas plants," *Separation and Purification Technology*, vol. 236, p. 116269, 2020.
- [12]. S. Haider, M. Saeed, A. Lindbråthen, and M.-B. Hagg, "Techno-economic evaluation of helium recovery from natural gas; A comparison between inorganic and polymeric membrane technology," 2019.
- [13]. G. D. Ulrich and P. T. Vasudevan, *Chemical engineering: process design and economics; a practical guide*. Process Publ., 2004.
- [14]. G. Towler and R. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Butterworth-Heinemann, 2021.
- [15]. D. Mignard, "Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 2, pp. 285-294, 2014.
- [16]. R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, and J. A. Shaeiwitz, *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education, 2008.
- [17]. R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- [18]. J. Sun, G. Wang, H. Zhang, B. Zhang, and C. Hu, "Facile fabrication of a conductive polypyrrole membrane for anti-fouling enhancement by electrical repulsion and in situ oxidation," *Chemosphere*, vol. 270, p.



## Techno-Economic Comparison of Helium Recovery from Natural Gas Using Polymeric Membranes Simulation

Mohammad Mahdi Yousefi<sup>1</sup>, Mostafa Jafari<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Student, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Researcher, Institute of Liquefied Natural Gas (I-LNG), School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

#### Article History:

Received: 25 September 2025

Revised: 09 October 2025

Accepted: 03 November 2025

#### Keywords:

Helium recovery  
Polymeric membrane  
Permeability  
Selectivity  
Economic evaluation

### ABSTRACT

We simulated a three-stage membrane process for helium recovery from natural gas in PRO/II using the Peng-Robinson equation of state. Three polymeric membranes: polyimide, polypyrrole, and polysulfone were evaluated under identical feed conditions and design criteria (90% product purity, 95% recovery). The model reproduced literature data and the stagewise increase in purity. Techno-economic analysis shows that the higher permeability of polyimide and polypyrrole lowers the required membrane area and compression power, improving both CAPEX and OPEX. In the optimized design, total investment is USD 8-9 million, the payback period is about 5-5.5 years, and the rate of return is 19%. Accordingly, polyimide is the most economical option, with polypyrrole as a close alternative, while polysulfone remains less competitive. One-way sensitivity analyses indicate limited elasticity to electricity tariff but strong dependence on helium price over the tested range.

DOR: [20.1001.1.2509.1105.1404.08.12](https://doi.org/10.1001.1.2509.1105.1404.08.12)

#### How to cite this article

S.M. Yousefi, M. Jafari, Techno-Economic Comparison of Helium Recovery from Natural Gas Using Polymeric Membranes Simulation. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 12(4): 10 -20. ([https://ijge.irangi.org/article\\_735758.html](https://ijge.irangi.org/article_735758.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [mustafa.jafari@ut.ac.ir](mailto:mustafa.jafari@ut.ac.ir), (M. Jafari).

Available online 11 March 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>) 

