# ارزیابی اقتصادی تولید هم‌زمان آب شیرین و برق با استفاده از گازهای فلر عسلویه

**مصطفی جعفری[1]، محمدحسین صراف‌زاده[2*]، محمد شهاب دلجو[3]**

۱. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استاد، رئیس کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. دانشجوی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: sarrafzdh@ut.ac.ir

**مقاله علمی- ترویجی**

۱۱ صفحه، از صفحه ۷ تا ۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶

## چکیده

مدیریت آب در مناطق نزدیک به سکوهای نفتی، پالایشگاه و پتروشیمی‌های جنوب کشور به دلیل حجم بالا، غلظت نمک بالا و همچنین هزینه‌های بالا، توجه بسیار زیادی را به سمت خود جلب کرده است. در صنایع شیمیایی مقادیر زیادی از انرژی‌های حرارتی به هدر می‌رود که می‌تواند به‌طور بالقوه برای کاهش هزینه تولید آب شیرین مورداستفاده قرار بگیرد، چراکه بیشترین تأثیر در هزینه‌ی تمام‌شده‌ی آب شیرین را هزینه انرژی مصرفی آن دارد. بنابراین یکی از چالش‌های فرآیندهای نمک‌زدایی آب دریا به روش‌های حرارتی نظیر تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF)، تقطیر چندمرحله‌ای (MED)، یا ...، مخصوصاً در کشورهایی که انرژی در آن‌ها بسیار گران است، تأمین انرژی حرارتی آن است. هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی و ارزیابی اقتصادی تولید هم‌زمان برق و آب شیرین با استفاده از گازهای فلر در نرم‌افزار PRO/II v.10 است. گاز فلر به دلیل وجود گازهای اسیدی در خود ابتدا در واحد جداسازی غشایی تصفیه‌شده و به‌منظور تولید برق و حرارت (بخار) وارد نیروگاه سیکل ترکیبی می‌شود. فرآیند نمک‌زدایی از آب دریا نیز از نوع سیستم تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای است که انرژی حرارتی آن از نیروگاه سیکل ترکیبی تأمین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با ظرفیت ۱۳۰۰۰ مترمکعب در ساعت گاز فلر عسلویه، به میزان ۵۷ مگاوات برق و ۱۵۰۰۰۰ لیتر در ساعت آب با هزینه سرمایه‌گذاری ۴۰/۹۸ میلیون دلار می‌توان تولید کرد. با این مقدار از برق و آب شیرین تولیدشده توسط فرآیند، می‌توان به‌راحتی برق ۴۵۰۰۰ خانواده و آب شیرین ۳۵۰۰ خانواده را تأمین کرد.

**کلیدواژه‌ها:** همبست آب و انرژی، گازهای فلر، تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای، ارزیابی اقتصادی، غشا.

### ۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین دلایل هدر رفت انرژی در کشور، حجم بسیار عظیم گازهای مشعل در حال سوختن (گازهای فلر) است. گازهای فلر یکی از محصولات جانبی تولید نفت هستند و همراه با نفت خام از میدان‌های نفتی برداشت می‌شود [۱]. از مزایای استفاده از گازهای فلر برای تولید برق و آب شیرین می‌توان به جلوگیری از هدر رفت انرژی در کشور، کاهش اتلاف سرمایه‌های ملی، جلوگیری از جریمه‌های هنگفت بین‌المللی، سودآوری، افزایش سرمایه ملی و ارزی کشور، اشتغال‌زایی، کمک به مناطق محروم کشور، افزایش تولید برق و تولید آب شیرین موردنیاز مناطق جنوبی کشور بدون مصرف سوخت اشاره کرد. بااین‌حال، تعداد مطالعاتی که بر روی استفاده از گاز فلر برای تولید آب شیرین شده است، بسیار کم است.

برای اسـتفاده از گازهای فلر، راهکارهای بسـیار فراوانی وجود دارد[۲]. راهکارهایـی نظیر اسـتفاده به‌عنوان سـوخت، تزریق به خطوط سراسـری گاز پس از شیرین‌سـازی، ازدیاد برداشت نفت، تولیـد برق، تولید بنزین، تولید هیـدروژن، بازیابی اتیلن که در دنیا بسـیار رایج اسـت[۳]. اما یکی از راهکارهای بسیار خوب استفاده از گازهای فلر، استفاده آن‌ها در واحدهای تولید هم‌زمـان برق و آب شـیرین اسـت. این واحدهـا از بخش‌های جداسـازی غشـایی برای جداسـازی گازهای اسـیدی، سیکل توربیـن گاز برای تولید برق، سـیکل توربین بخـار برای تولید هم‌زمـان بـرق و بخار و درنهایت از بخش تولید آب شـیرین از دریا به روش حرارتی تشکیل‌شده است.

رحیم‌پـور و همـکاران پالایشـگاه گاز عسـلویه را بـا حجم مشـخصی از گاز فلر بررسـی کردند. در این مقاله سـه راه‌حل تبدیل گاز فلر به مایع از مسیر GTL، تولید برق و فشار افزایی بررسی شـد. نتایج نشـان داد میزان نرخ بازگشـت سرمایه در تولیـد برق از گاز فلر نسـبت به روش‌های دیگـر بالاتر بود[۴]. حق‌پرسـت و همـکاران (۱۳۹۳) بـه مطالعـه موردی بررسـی روش‌های بازیابی گازهای ارسالی به فلر و انتخاب بهترین روش تولیـد انرژی از طریق مقایسـه آن پرداختنـد. در این پژوهش سـعی بر آن شـده اسـت که به بازیابی گازهای ارسـالی فلر با توجه به اثرات زیسـت‌محیطی و اقتصادی آن پرداخته شـود و راهکارهای مختلف جهت بازیابی آن و بهینه‌سازی تولید انرژی از طریـق تبدیل به انرژی برق و مقایسـه با چند روش مشـابه تولید انرژی ارائه گردد. همچنین راهکارهایی جهت مدیریت و کنترل گازهای فلر پالایشگاه‌ها و کاهش آلودگی محیط‌زیست در زمان شـرایط اضطراری و تخلیه فشـار پالایشـگاه ارائه‌شده است[۵].

چـن و همـکاران به شبیه‌سـازی و ارزیابـی اقتصادی یک فرآینـد نمک‌زدایـی از آب دریا با اسـتفاده از گازهای مشـعل تولیدشـده در سـکوهای نفتی پرداختنـد. در ایـن مقاله، یک فرآیند تراکم بخار حرارتی کوپل شـده بـا گاز فلر با که به‌طور دقیق در Aspen Plus شبیه‌سازی‌شده است. برای این منظور از روش تقطیـر چندمرحله‌ای (MSF)، تراکم بخار مکانیکی و اسـمز معکوس استفاده‌شده اسـت. تحلیل حساسیت نیز برای به دسـت آوردن دامنه شـدت انرژی و هزینه تولید انجام‌شـده اسـت کـه تحـت تأثیـر شـوری آب، دمـای جـوش آب‌نمک، نسـبت تراکم، و فشـار بخار اسـت. نتایج نشـان داد که فرآیند تراکم بخار مکانیکی پیشـنهادی ازنظر فنی در بیشتر مکان‌ها مقرون‌به‌صرفه است[۶].

جعفری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی تولید آب شیرین از دریا با اسـتفاده از انرژی بازیافتی گازهای فلر در دسـتگاه‌های مختلـف واحدهـای آب‌شـیرین‌کن پرداختنـد. در ایـن مقالـه میزان انـرژی بازیافتی از گاز فلر و اسـتفاده آن در فرآیندهای حرارتی نمک‌زدایی از آب دریا، مصرف انرژی و برق، ملاحظات زیسـت‌محیطی، پیش‌بینـی آب تولیدشـده در دسـتگاه‌های مختلف موردبحث و تحلیل قرار گرفت [۷]. جعفری و همکاران (۱۳۹۸) به شبیه‌سـازی و آنالیز حساسیت تولید هم‌زمان برق و حرارت از گازهای فلر در نیروگاه سـیکل ترکیبی پرداختند، شبیه‌سازی و آنالیز حساسـیت در نرم‌افزار Aspen HYSYS v10 صورت پذیرفت و در این شبیه‌سازی پارامترهای عملیاتی مؤثـر نظیر نسـبت هوا به گاز فلر تصفیه‌شـده، فشـار خروجی کمپرسـور و توربین‌های گازی و بخار بررسی‌شده است. نتایج شبیه‌سـازی نشـان داد با اسـتفاده منبع انـرژی گاز فلر با دبی ۹۵۰۰ کیلوگـرم بـر سـاعت می‌تـوان در یک نیروگاه سـیکل ترکیبـی، ۱۰۰ مـگاوات برق تولید کـرد[۸]. در ایـن پژوهش بـه شبیه‌سـازی و ارزیابی اقتصـادی تولید هم‌زمـان برق و آب شـیرین از گازهای فلر در مناطق جنوبی کشـور پرداخته‌شده اسـت. گازهای فلر به دلیـل دارا بودن ترکیبات اسـیدی نظیر هیدروژن سولفید نیاز به تصفیه دارند. بنابراین در واحد غشایی این گازها تصفیه می‌شوند. گاز فلر عاری از گازهای اسیدی در نیـروگاه سـیکل ترکیبی به بـرق و حرارت تبدیل خواهد شـد و با اسـتفاده از حرارت (بخار) تولیدشـده، آب شـیرین دریا با اسـتفاده از فرآیندها تبخیـر ناگهانی چندمرحلـه‌ای (MSF)، تولید خواهد شـد. هدف اصلی این است که با این حجم از گاز مورداسـتفاده در این پژوهش، چه تعداد نفر می‌توانند از برق و آب شیرین تولیدشده توسط این فرآیند، بهره‌مند شوند. به‌طور متوسط در ایران هر نفر ۳۰۰ تا ۳۱۵ وات برق و ۲۰۰ تا ۳۰۰ لیتر در شبانه‌روز آب مصرف می‌کند.

**۲. مواد و روش‌ها:**

میـدان گازی پـارس جنوبـی در شهرسـتان عسـلویه و گنگان یکـی از بزرگ‌ترین میدان‌ها گازی کشـور، درعین‌حال یکـی بزرگ‌تریـن تولیدکننـده گازهـای فلـر در کشـور اسـت کـه از آلوده‌تریـن مناطـق صنعتـی دنیـا اسـت [۹]. گازهـای فلـر منطقـه عسـلویه به‌طـور عمده شـامل متان اسـت. سـایر ترکیبـات گازهـای فلـر ایـن منطقـه شـامل هیدروکربن‌های $C_2$-$C_6$، نیتروژن، هیدروژن سـولفید و دی‌اکسـید کربن است. از سـایر ترکیبـات که مقـدار آن بسـیار ناچیز اسـت صرف‌نظر شـده اسـت. شبیه‌سـازی تولید هم‌زمان برق و آب شیرین، در

نرم‌افزار PRO/II v10 و ارزیابی اقتصادی آن در نرم‌افزار Aspen Process Economic Analyzer v10 (APEA) انجام‌شده است. از ویژگی‌های نرم‌افزار PRO/II v10 می‌توان به اتصال به نرم‌افزار متلب برای بهینه‌سازی و نرم‌افزار APEA برای ارزیابی اقتصادی اشاره کرد. یکی از بزرگ‌ترین ویژگی این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی فرآیند جداسازی گازها در غشا در یک یا چند مرحله است که این نرم‌افزار را از سایر نرم‌افزارهای رایج در مهندسی شیمی متمایز می‌کند گرفت[۱۰]. در این شبیه‌سازی از دو معادله ترمودینامیکی استفاده‌شده است. برای قسمت جداسازی غشایی و تولید برق در نیروگاه سیکل ترکیبی از معادله ترمودینامیکی Peng-Robinson و برای قسمت تولید آب شیرین از دریا از معادله ترمودینامیکی Electrolyte-NRTL استفاده‌شده است[۱۱].

### ۲.۱. شبیه‌سازی فرآیند:

در این قسمت به تشریح شبیه‌سازی واحد تولید هم‌زمان برق و آب شیرین با استفاده از گازهای فلر در نرم‌افزار RPO/II پرداخته خواهد شد. گاز فلر با مشخصاتی که در (جدول ۱) آورده شده است در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال، پس از وارد شدن به کمپرسور K-100 و افزایش فشار آن تا ۱۱۰۰ کیلو پاسکال وارد مبدل حرارتی E-100 می‌شود تا دمای آن تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کند و سپس وارد قسمت تصفیه غشایی می‌شود.

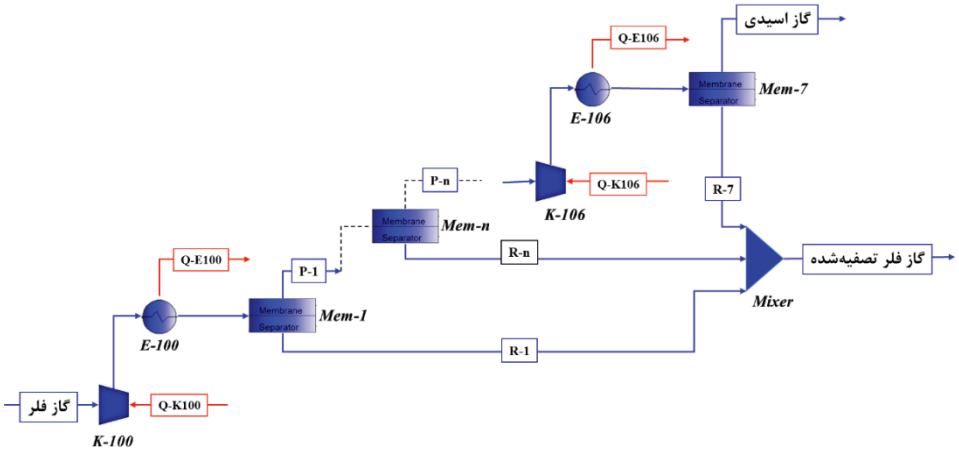
**جدول ۱. مشخصات گاز فلر[۱۲].**

| مشخصات | مقدار |
|---|---|
| متان (درصد مولی) | ۰/۸۴۵۸ |
| اتان-هگزان (درصد مولی) | ۰/۰۹۴۰ |
| نیتروژن (درصد مولی) | ۰/۰۳۵۳ |
| هیدروژن سولفید (درصد مولی) | ۰/۰۰۵۲ |
| دی‌اکسید کربن (درصد مولی) | ۰/۰۲۰۲ |
| دما (درجه سانتی‌گراد) | ۵۰ |
| فشار (کیلو پاسکال) | ۱۰۰ |
| دبی حجمی (مترمکعب بر ساعت) | ۱۳۰۰۰ |

غشاهای مورداستفاده در شیرین‌سازی گاز طبیعی اکثراً ساختارهای پلیمری مانند پلی‌فسفازین‌ها، پلی‌آمیدها، استات سلولز، پلی‌اتر اورتان، پلی‌اتر اورتان اوره، کوپلیمرهای پلی‌آمید-پلی‌اتر و پلی وینیلیدن فلوراید (Polyvinylidene Fluoride) هستند. در واحد جداسازی غشایی هیدروژن سولفید تا مقدار ppm ۵ از جریان گاز فلر حذف خواهد شد. از طرفی مشخصات غشا که مقادیر آن در (جدول ۲)، طوری است که دی‌اکسید کربن هم تا مقدار بسیار مطلوبی حذف خواهد شد. فرآیند جداسازی غشایی با استفاده از ۷ کمپرسور، ۷ مبدل حرارتی به همراه ۷ مرحله غشایی تصفیه موردنظر را انجام خواهد داد. در تمامی کمپرسورها فشار تا ۱۲۰۰ کیلو پاسکال افزایش و در تمامی مبدل‌های حرارتی تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا خواهد کرد. فرآیند جداسازی غشایی از دو قسمت عاری‌سازی و قسمت غنی‌سازی تشکیل‌شده است. اما در طراحی این واحد غشایی فقط قسمت عاری‌سازی وجود دارد [۱۳]. در قسمت عاری‌سازی هیدروژن‌سولفید و دی‌اکسید کربن در هر مرحله از میان غشا جدا می‌شود به‌طوری‌که هیچ گاز اسیدی در جریان باقی‌مانده غشا، وجود نداشته باشد. ازآنجایی‌که در یک مرحله نمی‌توان به‌طور کامل گازهای اسیدی را جدا کرد، باید در چند مرحله این کار تکرار شود تا جریان گازهای اسیدی به سمت جریان عاری از هیدروکربن برسد. درنهایت جریان گاز اسیدی شامل هیدروژن سولفید و دی‌اکسید کربن از بالا و جریان گاز فلر تصفیه‌شده که عاری از گازهای اسیدی است از قسمت جریان باقی‌مانده خارج و جمع‌آوری می‌شود. ترکیبات مضر گوگردی درصورتی‌که از فلر جدا نشود، سبب بیماری، مرگ، تشکیل باران اسیدی و درنهایت آلودگی محیط‌زیست خواهد شد. در فاز ۱۲ پارس جنوبی و فازهای دیگر تعدادی واحد بازیابی گوگرد (Sulfur recovery unit) موجود است بنابراین این گازهای جمع‌آوری‌شده که غنی از هیدروژن‌سولفید است را می‌توان به واحد بازیابی گوگرد (Sulfur recovery unit) ارسال کرد. احداث واحد بازیابی گوگرد در کنار واحدهای شیرین‌سازی گاز طبیعی ضروری است. شبیه‌سازی واحد تصفیه‌ی غشایی گاز فلر در (شکل ۱) آورده شده است.

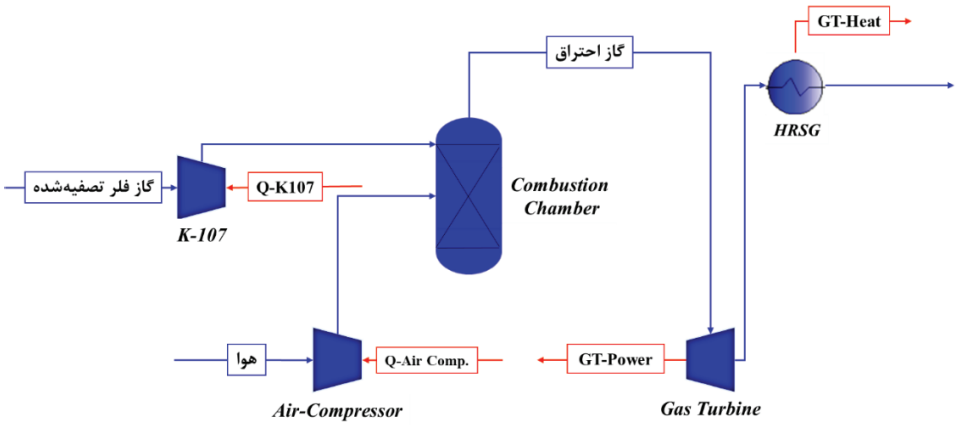
**جدول۲. مشخصات غشای پلیمری PU4[۱۴].**

| مشخصات | مقدار |
|---|---|
| دمای عبوردهی (درجه‌ی سانتی‌گراد) | ۳۵ |
| گرادیان فشار (کیلو پاسکال) | ۱۱۰۰ |
| ضخامت غشا (میکرومتر) | ۷۰ |
| عبوردهی ترکیبات (Barrer) | مقدار |
| متان | ۱/۳ |
| اتان | ۰/۱۲ |
| اتان-هگزان | ۰/۰۱ |
| نیتروژن | ۲/۵ |
| هیدروژن سولفید | ۱۲۳ |
| دی‌اکسید کربن | ۲۵ |



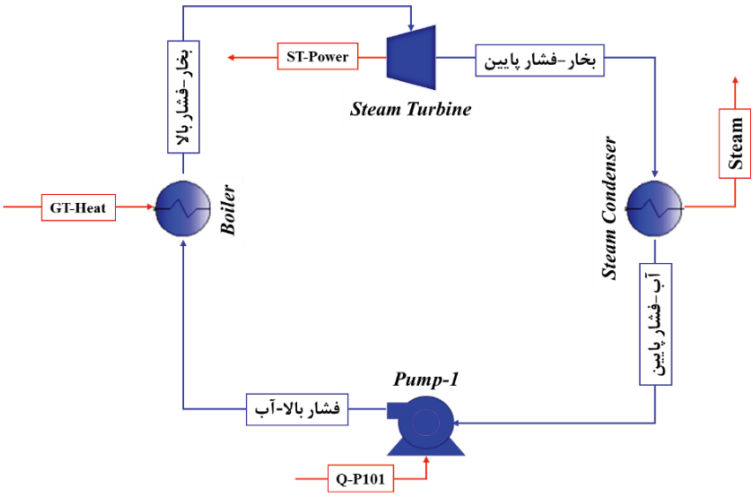

**شکل ۱. شماتیک شبیه‌سازی فرآیند جداسازی غشایی در ۷ مرحله [۱۵].**

گاز فلـر پـس از تصفیـه در واحـد جداسـازی غشـایی وارد کمپرسـور K-107 می‌شود تا فشـار آن تا ۱۲۰۰ کیلو پاسکال افزایش پیدا کند. هوا با دبی مولی ۱۲ برابر گاز فلر تصفیه‌شـده در دمای ۲۵ درجه سـانتی‌گراد و فشـار ۱۰۰ کیلو پاسکال وارد کمپرسـور هوا می‌شـود تا به فشـار ۱۲۰۰ کیلو پاسکال برسد. جریان‌های خروجی از کمپرسور K-107 و کمپرسور هوا با فشار برابـر وارد کوره یا Combustion Chamber می‌شـود. در این کوره فرض می‌شـود تمامی واکنش‌هـا کامل و درصد تبدیل در آن ۱۰۰ است. در این کوره هیدروکربن‌ها به‌طور کامل سوزانده می‌شـوند و به دی‌اکسـید کربن و آب تبدیل می‌شـود. جریانی که از کوره خارج می‌شـود عمدتاً شـامل دی‌اکسـید کربن، آب و نیتروژن اسـت که در فشـار و دمای بالایی قرار دارد. به‌منظور تولید برق این جریان وارد یک توربین گازی می‌شود و فشار آن به ۵۰ کیلو پاسکال کاهش پیدا می‌کند. سپس جریان خروجی از توربیـن وارد مولـد بخـار بازیافـت حرارت یا مبـدل HRSG به‌منظور تولید گرما می‌شود. در (شکل ۲) شماتیک شبیه‌سازی تولید هم‌زمان برق و حرارت در نیروگاه توربین گازی که سوخت آن گاز فلر تصفیه‌شده است، نشان داده‌شده است.



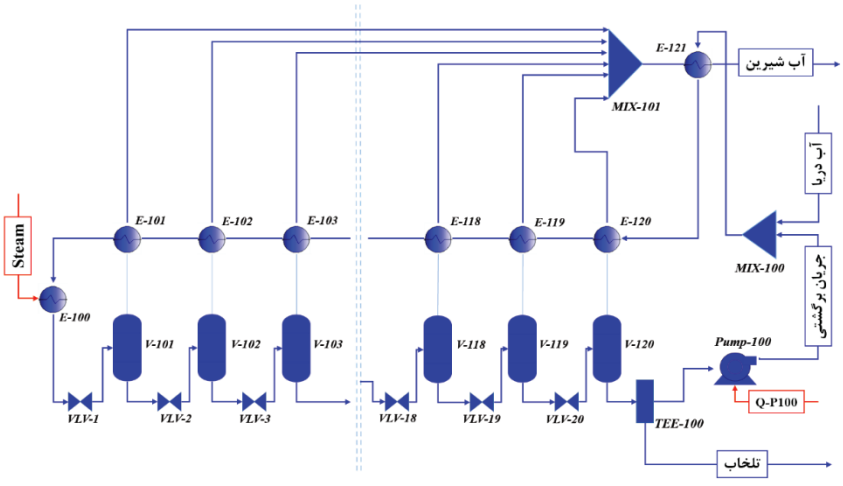

**شکل ۲. شماتیک شبیه‌سازی فرآیند تولید برق و حرارت در نیروگاه سیکل گازی [۴].**

جریـان گاز احتراقـی خروجـی از توربیـن گازی پـس از عبـور از مبـدل HRSG و تولید حـرارت به نیروگاه سـیکل بخـار برای تولید برق و بخار می‌رود. در این مرحله به میزان مشـخصی برق خالص تولید می‌شـود و از حرارت تولیدی در ایـن مرحله برای تولیـد بخار برای مرحله شیرین‌سـازی آب دریا اسـتفاده می‌شـود. در (شـکل ۳) شـماتیک شبیه‌سازی تولید هم‌زمان برق و حرارت در نیروگاه توربین بخار، نشـان داده‌شده است.

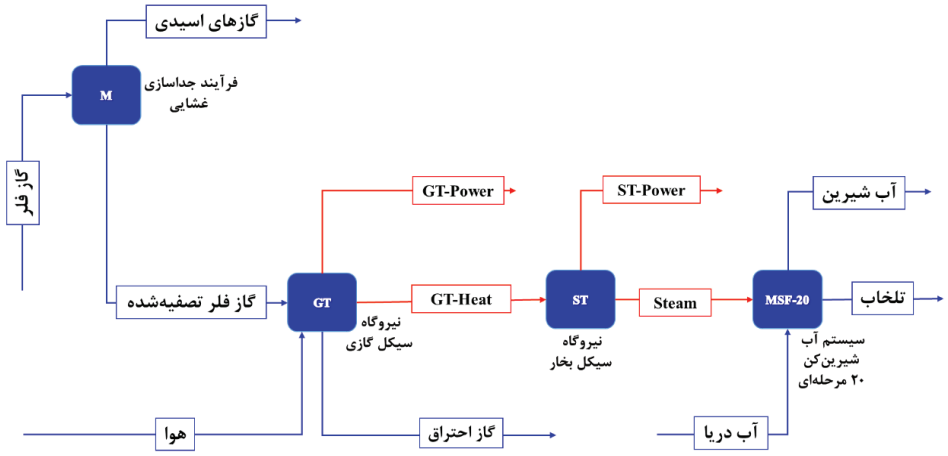



**شکل ۳. شماتیک شبیه‌سازی فرآیند تولید برق و حرارت در نیروگاه سیکل بخار[۱۶].**

فرآیند MSF شامل ۲۰ مرحله به‌صورت سری (شکل ۴) است. آب دریا در دمای ۲۵ درجه و با دبی حجمی مشخص که از خلیج‌فارس گرفته می‌شود با ۲۰ درصد از جریان تلخاب به‌صورت جریان برگشتی مخلوط می‌شود و وارد مراحل سیستم آب‌شیرین‌کن می‌شود. فرض می‌شود آب دریا از آب (۹۷ درصد مولی) و سدیم کلرید (۳ درصد مولی) تشکیل‌شده است و از سایر ترکیبات صرف‌نظر شده است [۱۷]. در طی فرآیند MSF، آب دریا توسط جریان‌های بخارآب خروجی از محفظه‌ی تبخیرکننده‌ها گرم می‌شود. در این محفظه‌ها آب دریا ابتدا طی فرآیند تبخیر ناگهانی، بخار می‌شود، سپس این بخارآب تولیدی متراکم شده، جمع‌آوری می‌شود و به مرکز تصفیه آب ارسال می‌شود[۱۸]. درنهایت جریان تلخاب از آخرین محفظه تبخیرکننده خارج می‌شود که ۲۰ درصد آن با خوراک ورودی آب دریا مخلوط خواهد شد و باقی آن به دریا بازمی‌گردد. تابع هدف در شبیه‌سازی این قسمت این است که با این میزان حرارت تولیدی (بخار تولیدی) در واحد سیکل توربین بخار چه میزان آب دریا مصرف و چه میزان آب شیرین تولید خواهد شد. طراحی یک سیستم آب‌شیرین‌کن باید با محدودیت‌های محیط‌زیستی، اخلاقی، اجتماعی و بهداشتی مطابقت داشته باشد. به همین دلیل میزان جریان برگشتی تلخاب به سیستم آب‌شیرین‌کن باید به‌گونه‌ای باشد که تلخاب برگردانده شده به آب دریا شوری زیادی نداشته باشد. شوری برگردانده شده به دریا حداکثر باید ۰/۲ درصد بیشتر از آب دریا باشد تا به اکوسیستم دریا و محیط‌زیست آسیبی نرساند[۱۹]. درنهایت در (شکل ۵)، شماتیک شبیه‌سازی واحد تولید هم‌زمان برق و آب شیرین با استفاده از گاز فلر نشان داده‌شده است.




**شکل۴. شماتیک شبیه‌سازی فرآیند تولید آب شیرین [۱۷].**




**شکل۵. شماتیک شبیه‌سازی تولید همزمان برق و آب شیرین**

### ۲.۲. ارزیابی اقتصادی:

امروزه استفاده از نرم‌افزارهای ارزیابی اقتصادی واحدهای پتروشیمی و پالایشگاهی بسیار رایج شده است. طراحی و ارزیابی اقتصادی واحدها و سایزبندی تجهیزات فرآیندی، بدون استفاده از نرم‌افزار، با توجه به پیچیدگی‌های روزافزون این فرآیندها و تجارب محدود در این زمینه، بسیار سخت و زمان‌بر است. یکی از بهترین نرم‌افزارهای کامل و منحصر به فرد در زمینه طراحی فرآیند، ارزیابی و آنالیز اقتصادی فرآیندهای شیمیایی نرم‌افزار APEA است. در ارزیابی اقتصادی یک فرآیند شیمیایی مواردی نظیر به هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌ی عملیاتی، هزینه مواد اولیه، قیمت فروش، هزینه‌ی یوتیلیتی تخمین دوره‌ی پرداخت و نرخ بازگشت سرمایه به دست می‌آید [۱۱]. برای ارزیابی اقتصادی دقیق نیاز است تجهیزات و نوع آن به‌طور دقیق به نرم‌افزار APEA تعریف شود. تغییراتی که در عملیات واحد تجهیزات انجام می‌شود در (جدول ۳) آورده شده است. پس از اتمام شبیه‌سازی، ابتدا شبیه‌سازی را به نرم‌افزار APEA متصل می‌کنیم. پس از اتصال نرم‌افزار PROII v10 به APEA نقشه‌برداری از تجهیزات و سایزبندی تجهیزات مشخص می‌شود و سپس ارزیابی اقتصادی صورت می‌گیرد.

**جدول ۳. مشخصات دقیق تجهیزات برای ارزیابی اقتصادی**

| عملیات واحد تجهیزات | نوع |
|---|---|
| کمپرسور (چندمرحله‌ای) و پمپ‌ها | از نوع سانتریفیوژی |
| کولر واحد غشایی و کندانسورهای واحد آب‌شیرین‌کن | مبدل حرارتی پوسته لوله TEMA |
| مبدل حرارتی HRSG | معادل قیمت یک توربین بخار [۲۰]. |
| توربین گاز و کوره | توربین گازی به همراه کوره |
| توربین بخار | توربین بخار |
| محفظه‌های تبخیرکننده | محفظه‌های عمودی |

### ۳. تحلیل نتایج و بحث:

در این قسمت به تحلیل نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید همزمان برق و آب شیرین از گاز فلر در یک نیروگاه سیکل ترکیبی شامل یک واحد تصفیه غشایی، یک واحد تولید توان توسط توربین‌های گازی و یک واحد تولید توان و بخارآب توسط توربین‌های بخار در نرم‌افزار PRO/II v.10 انجام گرفت. جریان گاز فلر تصفیه‌شده پس از خارج شدن از واحد تصفیه غشایی به نیروگاه سیکل توربین گازی ارسال می‌گردد. گاز مشعل ابتدا وارد واحد تصفیه‌ی غشایی گردید سپس جریان گاز اسیدی به‌عنوان جریان عبور کرده‌ی نهایی (Permeate) و جریان گاز فلر تصفیه‌شده به‌عنوان جمع

جریان‌های باقی‌مانده (Retentate) مطابق با (جدول ۴) از فرآیند غشایی خارج می‌شود. به خاطر ملاحظات محیط زیستی می‌بایست جریان گاز اسیدی به واحد بازیافت گوگرد ارسال شود و جریان گاز فلر تصفیه‌شده به نیروگاه سیکل توربین گازی ارسال می‌گردد. جریان گاز احتراقی نیز با مشخصات (جدول ۴) برای تولید حرارت وارد مبدل حرارتی می‌شود.

برای اعتبار سنجی روش‌ها و نتایج شبیه‌سازی می‌توان به مقالات چاپ‌شده استناد کرد. برای شبیه‌سازی‌هایی که ظرفیت خوراک، عملکرد فرآیند، شرایط دمای، فشاری و ... تغییر می‌کند اعتبار روش شبیه‌سازی به‌اندازه اعتبار نتایج شبیه‌سازی اهمیت پیدا خواهد کرد. مراحل شبیه‌سازی و شماتیک واحد تصفیه غشایی گاز اسیدی در نرم‌افزار PROII در مقاله چاپ‌شده جعفری و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۱]آورده شده است، جایی که نتایج بسیار نزدیک بود. کارهای کمی از شبیه‌سازی فرآیند چندمرحله‌ای غشایی جداسازی گازهای اسیدی نظیر دی‌اکسید کربن در نرم‌افزار PROII صورت گرفته است[۲۲]. مراحل شبیه‌سازی و شماتیک و نتایج شبیه‌سازی یک نیروگاه تولید هم‌زمان برق و حرارت به روش سیکل ترکیبی در نرم‌افزار Aspen HYSYS (که مشابه با نرم‌افزار PROII است) با مقاله منتشرشده توسط (رحیم پور و همکاران[۴] در ۲۰۱۲)، (اکولا و همکاران[۲۳]در سال ۲۰۱۸) و (جعفری و همکاران[۲۴] در سال ۲۰۲۰) برای اعتبار سنجی مقایسه شده است و نتایج بسیار نزدیک بودند. درنهایت مراحل شبیه‌سازی و شماتیک شبیه‌سازی یک فرآیند شیرین‌سازی آب به روش MSF با نتایج شبیه‌سازی مقالات منتشرشده توسط (مابروک [۲۵] و دیگران، ۲۰۱۵) و (دهیان تراوان [۱۹] و همکاران در سال ۲۰۲۰) مقایسه شد و در این واحد نیز نتایج بسیار نزدیک بودند.

**جدول ۴. مشخصات جریان و ترکیب درصد مولی جریان‌های گاز اسیدی، گاز مشعل شیرین شده و گاز احتراقی**

| پارامتر | گاز اسیدی | گاز فلر تصفیه‌شده | گاز احتراقی |
|---|---|---|---|
| دما (درجه سانتی‌گراد) | ۳۵ | ۳۵ | ۱۹۸۰ |
| فشار (کیلو پاسکال) | ۱۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۲۰۰ |
| دبی حجمی (مترمکعب بر ساعت) | ۴۵۷/۸ | ۱۰۷۳ | ۱۰۵۶۰۰ |
| متان (درصد مولی) | ۲۴/۲۵ | ۸۶/۹۳ | ۰/۰۰۰ |
| اتان-هگزان (درصد مولی) | ۰/۰۰۰ | ۹/۶۲ | ۰/۰۰۰ |
| دی‌اکسید کربن (درصد مولی) | ۵۳/۵۸ | ۰/۰۲ | ۹/۹۴ |
| هیدروژن سولفید (درصد مولی) | ۱۳/۸۹ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ |
| نیتروژن (درصد مولی) | ۸/۲۸ | ۳/۳۵ | ۷۱/۶۹ |
| اکسیژن (درصد مولی) | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱۸ |
| آب (درصد مولی) | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۱۸/۱۹ |

طبق (جدول ۵) در نیروگاه سیکل گازی، به مقدار ۵۸/۴۰ مگاوات برق تولیدشده است. همچنین مقدار ۳/۸ مگاوات برق برای کمپرسورهای واحد تصفیه غشایی، ۱۸/۷۹ مگاوات برق برای کمپرسور هوا و گاز فلر تصفیه‌شده همچنین ۰/۱۵ مگاوات هم برای پمپ سیکل بخار و واحد آب‌شیرین‌کن مصرف‌شده است. علامت منفی نشان‌دهنده مصرف برق و علامت مثبت نشان‌دهنده تولید برق است. درنتیجه با این ظرفیت گاز فلر تصفیه‌شده توان نیروگاه سیکل ترکیبی طراحی‌شده می‌توان ۵۷/۰۶ مگاوات برق به‌صورت خالص تولید کرد. در قسمت سیکل توربین گازی به میزان ۸۱/۳۰ مگاوات حرارت تولیدشده است. با استفاده از این حرارت در نیروگاه سیکل بخار به میزان ۲۱/۴۰ مگاوات برق تولیدشده است و مابقی آن به‌صورت حرارت به مقدار ۶۰ مگاوات باقی‌مانده است که برای تولید بخار و تأمین انرژی حرارتی سیستم ۲۰ مرحله‌ای آب‌شیرین‌کن استفاده می‌شود. (جدول ۶) نشان می‌دهد با این ۶۰ مگاوات انرژی حرارتی می‌توان در یک سیستم آب‌شیرین‌کن ۲۰ مرحله‌ای با ۲۰ درصد جریان تلخاب برگشتی می‌توان ۱۵۰ هزار لیتر در ساعت آب شیرین تولید کرد.

جدول ۵. میزان توان تولیدی و مصرفی سیکل ترکیبی

| مشخصات برق تولیدی و مصرفی تجهیزات | مقدار (مگاوات) |
|---|---|
| کمپرسورهای واحد غشایی | -۳/۸ |
| کمپرسور هوا (نیروگاه گازی) | -۰/۰۴ |
| کمپرسور گاز فلر تصفیه‌شده (نیروگاه گازی) | -۱۸/۷۵ |
| توربین گازی (نیروگاه گازی) | +۵۸/۴۰ |
| حرارت آزادشده (نیروگاه گازی) | +۸۱/۳۰ |
| پمپ (نیروگاه بخار) | -۰/۱۰ |
| توربین بخار (نیروگاه بخار) | +۲۱/۴۰ |
| پمپ (واحد آب‌شیرین‌کن) | +۰/۰۵ |
| حرارت آزادشده از نیروگاه سیکل ترکیبی | +۶۰ |
| برق خالص تولیدی | +۵۷/۰۶ |

جدول ۶. میزان آب شیرین تولیدشده در ۲۰ مرحله آب‌شیرین‌کن MSF

| آب شیرین و تلخاب تولیدی در واحد MSF | مقدار |
|---|---|
| آب شیرین تولیدشده (لیتر بر ساعت) | ۱۵۰۰۰۰ |
| تلخاب (لیتر بر ساعت) | ۹۴۴۰۰۰ |

در (جدول ۷)، ارزیابی اقتصادی تولید همزمان برق و آب شیرین با استفاده از گاز فلر نشان داده‌شده است. بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی مربوط به واحد تولید برق و حرارت در نیروگاه سیکل گازی است. این جدول نشان می‌دهد برای تولید ۵۷ مگاوات برق و تولید ۱۵۰ هزار لیتر در ساعت آب شیرین با ۱۳۰۰۰ مترمکعب در ساعت از گاز فلر نیاز به ۹۸/۴۰ میلیون دلار سرمایه‌گذاری و ۱۵/۹۰ میلیون دلار در سال هزینه‌های عملیاتی است.

جدول ۷. ارزیابی اقتصادی تولید همزمان برق و آب شیرین از گاز فلر

| | هزینه تجهیزات (Mr) | هزینه نصب (Mr) | هزینه یوتیلیتی (M$/Year) | هزینه سرمایه‌گذاری (Mr) | هزینه‌های عملیاتی (M$/Year) |
|---|---|---|---|---|---|
| واحد جداسازی غشایی | ۶/۰۵ | ۸/۰۵ | ۰/۲۰ | ۹۱/۰۵ | ۲/۵۰ |
| واحد سیکل توربین گازی | ۹۲/۰۷ | ۳۳/۰۱ | ۰/۰۰ | ۶۴/۰۹ | ۶/۹۰ |
| واحد سیکل توربین بخار | ۳/۵۰ | ۴/۵۰ | ۰/۰۰ | ۸/۰۰ | ۴/۰۰ |
| واحد ۲۰ مرحله‌ای MSF | ۴/۰۰ | ۱۱/۰۰ | ۰/۴۰ | ۲۴/۰۰ | ۲/۵۰ |
| کل | ۴۳/۷۰ | ۵۷/۱۰ | ۰/۴۲ | ۹۸/۴۰ | ۱۵/۹۰ |

## ۴. جمع‌بندی:

در این مطالعه از گاز فلر خروجی از سکوهای نفتی، پتروشیمی یا پالایشگاه‌ها به‌عنوان جایگزین سوخت گاز طبیعی برای تولید همزمان برق و حرارت (بخار) در یک نیروگاه سیکل ترکیبی مورداستفاده قرار گرفت. سپس از این حرارت (بخار تولیدی) انرژی موردنیاز برای شیرین کردن آب دریا (نمک‌زدایی از آب دریا) به‌طور کامل تأمین خواهد شد. ازآنجایی‌که گازهای فلر دارای ترکیبات اسیدی مضر نظیر هیدروژن‌سولفید و دی‌اکسید کربن برای محیط‌زیست، انسان و تجهیزات است، بنابراین باید قبل از استفاده تصفیه شود. فنّاوری تصفیه غشایی به‌عنوان یک روش بسیار مناسب، ارزان، مصرف انرژی و یوتیلیتی پایین، مناسب با محیط‌زیست و فرآیندی با ایمنی بالا برای تصفیه گازهای فلر در نظر گرفته‌شده است. این حجم از گاز فلر بخش کوچکی از گازهای فلر موجود در منطقه عسلویه است. به‌طور خلاصه به ازای هر مترمکعب در

ساعت گاز فلر عسلویه می‌توان ۴/۴ کیلووات برق و ۱۱/۵۳ لیتر در ساعت آب در این فرآیند طراحی‌شده، تولید کرد. با توجه به این‌که با استفاده از این حجم از گاز فلر به میزان ۵۷ مگاوات برق و ۱۵۰ هزار لیتر در ساعت آب شیرین تولیدشده است، می‌توان به‌طور هم‌زمان برق موردنیاز ۱۸۱۰۰۰ نفر یا ۴۵۲۵۰ خانواده (اگر هر خانواده به‌طور متوسط ۴ نفر باشند) و آب شیرین موردنیاز ۱۴۰۰۰ نفر یا ۳۵۰۰ خانواده را تأمین کرد. پیشنهاد می‌شود با استفاده از آنالیز حساسیت و همچنین بهینه‌سازی چندهدفه، میزان برق و آب شیرین تولیدشده را در پارامترهای عملیاتی مختلف بررسی و آنالیز کرد. مثلاً با کاهش تولید برق و افزایش تولید حرارت (بخار) می‌توان آب شیرین بیشتری تولید کرد. همچنین پیشنهاد میشود با توجه قیمت و ارزش حرارتی گاز فلر، و با توجه به متلاطم بودن بازار ارز ایران، میزان سود عملیاتی و خالص فروش برق و آب، نرخ بازگشت سرمایه و مقایسه آن با واحد تولید هم‌زمان آب و برق که خوراک آن گاز طبیعی است، صورت بگیرد.

**مراجع**


[1]. Khalili-Garakani, Amirhossein, Mona Iravaninia, and Mahya Nezhadfard. "A review on the potentials of flare gas recovery applications in Iran." Journal of Cleaner Production (2020): 123345.

[2]. Yazdani, Esmaeil, Javad Asadi, Yasaman Hosseinzadeh Dehaghani, and Pejman Kazempoor. "Flare Gas Recovery by Liquid Ring Compressors-System Design and Simulation." Journal of Natural Gas Science and Engineering (2020): 103627.

[3]. Jafari, Mostafa, Khalili-Garakani, Amirhossein, and Mahya Nezhadfard. "Simulation and Economic Analysis of Combined Desalinated Water and Power Generation from Associated Gases of Cheshmeh Khosh." Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology (2020).

[4]. Rahimpour, M. R., Z. Jamshidnejad, S. M. Jokar, G. Karimi, A. Ghorbani, and A. H. Mohammadi. "A comparative study of three different methods for flare gas recovery of Asalooye Gas Refinery." Journal of Natural Gas Science and Engineering 4 (2012): 17-28.

[5]. Hamidzadeh, Zeinab, Sourena Sattari, Mohammad Soltanieh, and Ali Vatani. "Development of a multi-objective decision-making model to recover flare gases in a multi flare gases zone." Energy 203 (2020): 117815.

[6]. Chen, Liwen, Qiang Xu, John L. Gossage, and Helen H. Lou. "Simulation and economic evaluation of a coupled thermal vapor compression desalination process for produced water management." Journal of Natural Gas Science and Engineering 36 (2016): 442-453.

[۷]. جعفری, مصطفی،، صراف زاده، محمدحسین،، «تولید آب شیرین از دریا با استفاده از انرژی بازیافتی گازهای فلر». شانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۹۷).

[۸]. جعفری، مصطفی و قاسم‌زاده، کامران و شهابی، علی‌اصغر،۱۳۹۸، شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت تولید هم‌زمان برق و حرارت از گازهای فلر در نیروگاه سیکل ترکیبی، بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، تهران (۱۳۹۸).

[9]. Khanipour, Mina, Azadeh Mirvakili, Ali Bakhtyari, Mehdi Farniaei, and Mohammad Reza Rahimpour. "Enhancement of synthesis gas and methanol production by flare gas recovery utilizing a membrane-based separation process." Fuel Processing Technology 166 (2017): 186-201.

[10]. Jafari, Mostafa, Kamran Ghasemzadeh, Taher Yusefi Amiri, and Angelo Basile. "Comparative Study of Membrane and Absorption Processes Performance and their Economic Evaluation for $CO_2$ Capturing from Flue Gas." Gas Processing Journal 7, no. 2 (2019): 37-52.

[11]. Liponi, Angelica, Christoph Wieland, and Andrea Baccioli. "Multi-effect

distillation plants for small-scale seawater desalination: thermodynamic and economic improvement." Energy Conversion and Management 205 (2020): 112337.

[12]. Jafari, Mostafa, Sadaf Ashtab, Alireza Behroozsarand, Kamran Ghasemzadeh, and David A. Wood. "Plant-wide Simulation of an Integrated Zero-Emission Process to Convert Flare Gas to Gasoline." Gas Processing Journal 6, no. 1 (2018): 1-20.

[13]. Ghasemzadeh, Kamran, Mostafa Jafari, and Ali A. Babalou. "Performance investigation of membrane process in natural gas sweeting by membrane process: Modeling study." Chemical Product and Process Modeling 11, no. 1 (2016): 23-27.

[14]. Azadi, P., and Sh Hassanajili. "Improvement of gas separation properties of polyurethane membrane using plasma grafting." Iranian Journal of Chemical Engineering 14, no. 3 (2017): 19-30.

[۱۵]. جعفری, م.، قاسم‌زاده، ک.، و زینالی، ا.، «مطالعه و ارزیابی اقتصادی فرآیند غشایی واحد شیرین سازی گاز طبیعی»، شانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۹۷).

[16]. Nezhadfard, Mahya, and Amirhossein Khalili-Garakani. "Power generation as a useful option for flare gas recovery: Enviro-economic evaluation of different scenarios." Energy (2020): 117940.

[17]. Mabrouk, Abdel Nasser, and Hassan ES Fath. "Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology." Desalination 371 (2015): 115-125.

[۱۸]. صراف‌زاده, م. «ارزیابی فنی و اقتصادی روش‌های نمک‌زدایی از آب دریا با در نظر گرفتن ویژگی‌های بومی در نقاط مختلف دنیا»، فصلنامه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۱۳۹۶).

[19]. Dhiantravan, P et al., "Desalination-Team A-Process design." Retrieved from https://process design. Mccormick.northwestern.edu/index.php/Desalination_-_Team_A (15 October, 2020).

[20]. Gülen, S. " A Cheaper HRSG with Advanced Gas Turbines", Viewed 1 october 2020,https://www.power-eng.com/2017/03/09/a-cheaper-hrsg-with-dvanced-gas-turbines/#gref, (2017).

[21]. Jafari, Mostafa, Mohammad-Hosein Sarrafzadeh; Kamran Ghasemzadeh. "Simulation and economic evaluation of heat and power generation from flare gases in a combined cycle power plant". Energy Equipment and Systems, 8, 4, (2020), 307-322.

[22]. Jafari, Mostafa, Kamran Ghasemzadeh; Taher Yusefi Amiri; Angelo Basile. "Comparative Study of Membrane and Absorption Processes Performance and their Economic Evaluation for $CO_2$ Capturing from Flue Gas". Gas Processing Journal, 7, 2, (2019), 37-52.

[23]. Okullo, Aldo, Noah Tibasiima, and Joshua Barasa. "Simulation of Electricity Generation from Biogas for Ugandan Rural Community." American Journal of Chemical Engineering 6, no. 3, (2018).

[24]. Jafari, Mostafa, Mohammad shahab Deljoo, Ali Vatani, "Simulation and Economic Evaluation of Polygeneration System for Coproduction of Power, Steam, CH3OH, H2, and $CO_2$ from Flare Gas". Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology, 9, 4, 2020, 93-114.

[25]. Mabrouk, Abdel Nasser, and Hassan ES Fath. "Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology." Desalination 371, 115-125, 2015.

# Economic Evaluation of Water Desalination and Power Generation Using Flare Gases of Assaluyeh

**Mostafa Jafari[1], Mohammad Hossein Sarrafzadeh[2*], Mohammad Shahab Deljoo[3]**

1. PhD student in Chemical Engineering, School of Chemical engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Professor, School of Chemical engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Graduate student of chemical engineering, School of Chemical engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author Email Address: sarrafzdh@ut.ac.ir

**Abstract**

*Water resource management in the areas close to oil platforms, refineries and petrochemical plants in the south of Iran has attracted more attention due to its enormous volume, high salinity as well as high costs. In many industries, a considerable amount of thermal energy is wasted which can be used for water desalination, as the most effective factor in the production cost of desalination plant is energy. Therefore, one of the challenges of the seawater desalination process by using thermal methods such as multi-stage flash (MSF), multi-effect distillation (MED) and etc., specifically in the countries which have very expensive energy resources, is the thermal energy supply. The purpose of this study is the simulation and economic evaluation of the combined power and water generation process by using flare gases. Due to the fact that flare gas contains acid gases, first, it is treated with a membrane process, and then it's sent into a combined cycle power plant to generate power and thermal energy (vapor). The seawater desalination process is a multi-stage flash distillation type, and its thermal energy is supplied by a combined cycle power plant. The results show that if flare gas with a capacity of 13,000 m3/h is used, it can generate 57 MW of power and 150,000 L/h of water with a total capital cost of 98.40 million USD. With this amount of power and water generated by the process, it is easy to supply power of 45,000 households and water of 3,500 households.*

**Keywords:** *Water and Energy Nexus, Flare Gases, Multi-stage Flash, Economic Evaluation, Membrane.*