

شبیه‌سازی و تحلیل اکسرژی منابع مصرف‌کننده گازهای بازیابی شده از شبکه فلر در پالایشگاه گازی

مهدی عنایتی، سید محسن حسینی* و فهیمه پرویزیان

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

چکیده

این مقاله به منظور کاهش آلودگی زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، بر روی شبیه‌سازی و تحلیل اکسرژی سامانه بازیابی گازهای شبکه فلر در یک پالایشگاه گازی و منابع مصرفی آن تمرکز دارد. در فرآیند استخراج و فرآوری نفت و گاز، مقادیر زیادی از گازهای استفاده نشده به سمت شبکه فلر هدایت می‌شوند که این امر باعث آلودگی زیست‌محیطی و هدر رفت اقتصادی می‌شود. شبیه‌سازی انجام شده فرآیند نشان می‌دهد که 27800 kg/hr گاز فلر از شبکه فلر پالایشگاه، با فشار 9 bar دمای 25°C قابل بازیابی است. یکی از نکات مهم در زمینه سامانه‌های بازیابی فلر، مصرف بهینه گازهای بازیابی شده است که تحلیل اکسرژی برای شرایط مختلف این امکان را فراهم می‌نماید. در این مقاله، دو سناریو برای مصرف گازهای فلر ارائه شده است. در سناریوی اول، گازهای بازیابی شده تا فشار 70 bar فشرده شده و سپس به واحد شیرین‌سازی گاز پالایشگاه تزریق می‌شود که بازده اکسرژی محاسبه شده برای این سناریو 69% است. در سناریوی دوم، گازهای بازیابی شده فلر به سمت کمپرسورهای موجود در واحد میعانات‌گازی هدایت می‌شوند که بازده اکسرژی محاسبه شده برای این سناریو بیش از 78% می‌باشد. براساس نتایج شبیه‌سازی و تحلیل اکسرژی، این نتیجه حاصل شد که تزریق گازهای فلر بازیابی شده به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات‌گازی، بهترین راهکار برای بهره‌وری اقتصادی بیشتر از گازهای بازیابی شده است.

کلمات کلیدی: فلرینگ، بازیابی گازهای فلر، شبیه‌سازی، اکسرژی، پالایشگاه

مقدمه

جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست گردند. علی‌رغم تمامی مزایای حاصل از وجود شبکه فلر خصوصاً در پالایشگاه‌ها و همچنین در مناطق تولید نفت در راستای حفظ امنیت واحدها و کارکنان، مواردی همچون نشر آلاینده‌های زیست‌محیطی و هدر رفتن حجم عظیمی از انرژی، لزوم تجدیدنظر در ساختار و عملکرد این شبکه را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید [۱].

در عرصه رقابت جهانی و در راستای تولید بیشتر، هزینه کمتر، صنایعی موفق خواهند بود که در این رقابت با تحقیقات و مطالعات بیشتر، موفق به یافتن راهکارهایی برای جلوگیری از اتلاف انرژی و

است و به‌میزان ۴/۶٪ سوزانده شدن گاز طبیعی در کشورمان افزایش یافته است. کشور ایران در حدود ۱۳/۶٪ از کل گازهای سوزانده شده در شبکه فلر در جهان را دارا می‌باشد که موجب شده کشورمان رتبه اول در منطقه خاورمیانه و رتبه سوم در جهان را در زمینه فلرینگ دارا باشد. بیش از ۳۰٪ از گازهای سوزانده شده دربرگیرنده گازهای همراه نفت می‌باشد که به‌علت عدم تعریف و اجرای طرح‌های جمع‌آوری، به‌هنگام تولید نفت سوزانده می‌شود [۵]. پخش گازهای گلخانه‌ای ایران تاکنون ۱۸٪ افزایش داشته درحالی‌که جامعه بین‌المللی از جمله ایران طبق موافقت‌نامه آب و هوایی پاریس، متعهد به کاهش گازهای گلخانه‌ای هستند [۶]. عدم جمع‌آوری و استفاده از گازهای فلر با فرض صادرات گاز طبیعی، امکان کسب درآمد حدود ۴/۶ میلیارد دلار و ۳۳/۷۹ میلیارد دلار در دهه گذشته را از کشور سلب کرده است. بنابراین با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی این موضوع، جمع‌آوری گازهای فلر و جلوگیری از سوزاندن آنها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. هزینه‌های کاهش فلرینگ در ایران حدود ۶۰ تا ۸۰ هزار دلار به ازای هر یک میلیون متر مکعب برآورد شده، درحالی‌که تزریق دوباره گاز به میادین نفتی، درآمد ۲۰۰ هزار دلاری را دربر خواهد داشت و پتانسیل قابل توجهی در این زمینه وجود دارد [۷]. بخش زیادی از گازهای آلاینده تولید شده بر اثر سوزانده شدن گاز در شبکه فلر مربوط به دی‌اکسید کربن می‌باشد. ضریب انتشار گاز دی‌اکسید کربن در کشور ایران سه برابر قاره اروپا می‌باشد. در حدود ۷٪ کل گازهای گلخانه‌ای تولیدی در دنیا مربوط به کشور ایران می‌باشد. عوامل مؤثری که موجب این مسئله در ایران می‌شود مربوط به قیمت پایین سوخت، استفاده از فن‌آوری‌های قدیمی، هدر رفت بالای انرژی در واحدهای فرآیندی و سوزاندن محصولات فرعی و گازهای غیر قابل استفاده در شبکه فلر واحدهای صنعتی می‌باشد.

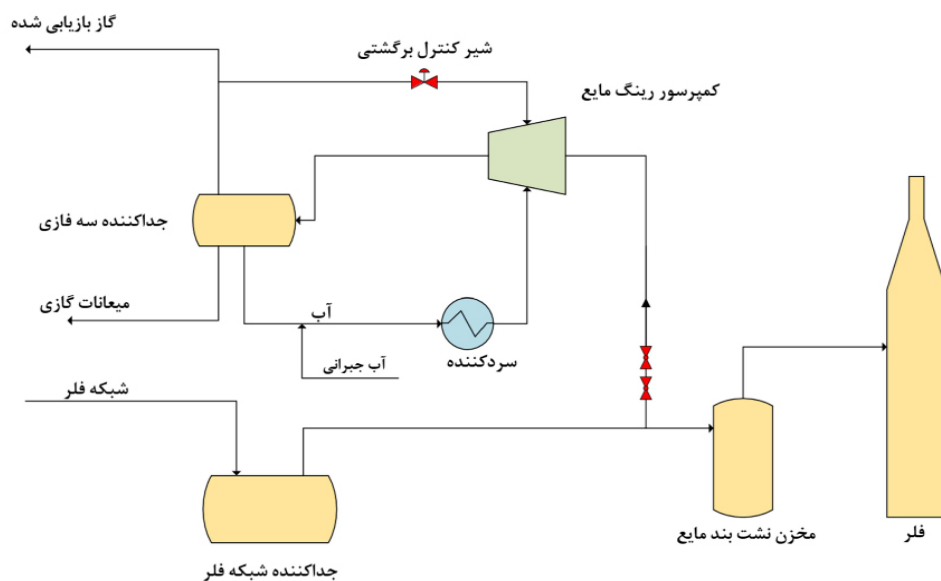
به‌عبارت دیگر از آنجایی‌که اصلی‌ترین راه ائتلاف انرژی در پالایشگاه‌ها، شبکه فلر بوده و بیشترین میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز از همین شبکه متصاعد می‌گردد، توجه به بهینه‌سازی عملکرد و بررسی روش‌هایی در بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. برخی از پیامدهای ناشی از فلرینگ، مانند احتراق ناقص حاصل از سوختن گاز در فلرها، علاوه بر حرارتی که تولید می‌کند، با تولید گازهای سمی مانند منوکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن منجر به اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود. مواد منتشره ناشی از مراحل مختلف فلرینگ عبارتند از: ذرات کربن، ترکیبات آلی فرار سوخته نشده، منوکسید کربن، گازهای اکسید نیتروژن، سولفید هیدروژن، دی‌اکسید گوگرد. علاوه بر آن، صدای ناشی از فلرینگ، فرآیند احتراق ناقص، خطر انفجار و آتش‌سوزی ناشی از برگشت گاز خروجی به سمت دودکش، آسیب به گیاهان و جانوران، تشعشع شدید ناشی از شعله فلر، کاهش ضخامت لایه اوزون، باران‌های اسیدی و گرمایش از دیگر آثار مخرب زیست‌محیطی سوختن گازها در شبکه فلرها می‌باشد [۲]. سالانه حدود ۱۴۰ میلیارد مترمکعب گاز در شبکه فلر سوزانده می‌شود که منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای از قبیل منوکسید کربن، متان و دوده سیاه است. حجم گاز سوزانده شده در شبکه فلر در سراسر جهان به ۱۳۹ میلیارد مترمکعب افزایش یافته است که این حجم از فلرینگ منجر به انتشار سالانه معادل ۵۰۰ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای شده است [۳]. سهم کشور ایران در انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان، ۲/۱٪ می‌باشد که باعث شده ایران از نظر تولید گازهای گلخانه‌ای در رتبه سیزدهم جهان قرار گیرد. بر طبق آمار بانک جهانی در کشور ایران بیش از ۵۸۸ بلیون فوت‌مکعب گاز توسط شبکه فلر سوزانده شده است [۴]. در واقع روزانه به‌میزان ۱/۶۱ بلیون فوت‌مکعب گاز سوزانده شده

با کمک یک سامانه‌ی فشرده‌سازی و بازیابی گاز، میزان گازهای سوزانده شده در پالایشگاه را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و از این طریق گازهایی که به‌سمت شبکه فلر ارسال می‌شوند را جمع‌آوری و سپس به‌عنوان سوخت پالایشگاه و توربین‌های گازی مورد استفاده قرار داد. یکی از منابع مصرف گازهای بازیابی شده در پالایشگاه گازی، استفاده مجدد در واحدهای فرآیندی از قبیل واحد شیرین‌سازی گاز و تزریق به کمپرسورهای واحد پایدار سازی میعانات گازی می‌باشد که نیاز به بررسی و مطالعات کاملی از نظر اقتصاد فرآیند و هزینه‌های عملیاتی و ثابت، ایمنی فرآیند، عملکرد و یکپارچه‌سازی واحدهای فرآیندی دارد [۱۱].

سامانه بازیابی گازهای فلر

پس از انجام تلاش‌های گوناگون در جهت کاهش میزان فلرینگ در دنیا، امروزه با استفاده از سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر امکان بازیابی گازهای ارسالی به فلر و استفاده آن به‌عنوان سوخت بویلرها، فرآورده‌های گازی و تولید برق فراهم می‌شود. شکل ۱ نشان‌دهنده نمای کلی فرآیند سامانه موردنظر می‌باشد.

میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده معادل ۴۶۵ میلیون تن دی‌اکسید کربن می‌باشد. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران در افق انتظار می‌رود معادل ۶۰۰ میلیون تن در سال شود و این درحالی است که طبق پیمان کیوتو کشورهای جهان در جهتی باید پیشرفت نمایند که مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در آنها روند کاهش را دارا باشد [۸]. بزرگترین مجموعه پالایشگاهی کشور که در عسلویه قرار دارد که در حال حاضر هفت پالایشگاه گازی در حال فعالیت می‌باشند که روزانه بیش از ۳۶۵ میلیون فوت مکعب گاز در شبکه‌ی فلر این پالایشگاه‌ها سوزانده می‌شود [۹]، که این مقدار گاز سوزانده شده باعث ایجاد آلودگی توسط گازهای گلخانه‌ای و تاثیر بر محیط زیست منطقه شده است. با توجه به پیمان کیوتو و قوانین بین‌المللی لازم است در جهت کاهش فلرینگ اقدامات مناسبی انجام شود [۱۰]. تا به امروز روش‌ها و راهکارهای متعددی برای کاهش یا بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر ارائه شده است که فعالیت‌های انجام شده در راستای اصلاح واحدهای تولیدکننده گازهای زائد و بهبود بازده شبکه فلر موجود در پالایشگاه بوده است. با پیشرفت فن‌آوری در این زمینه، امروزه می‌توان



شکل ۱ نمای کلی فرآیند سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر

بازگردانده می‌شوند که موجب می‌شود کمپرسور در شرایط دما ثابت گازها را فشرده نماید [۱۲]. با توجه به نوسانات فشار و دما در شبکه فلر، کنترل شرایط عملیاتی به‌صورتی که سامانه بازیابی گازهای فلر همواره در سرویس قرار داشته باشد، امری لازم می‌باشد. برای به‌دست آوردن اطلاعات دقیق درخصوص مقدار گازهای ارسالی به شبکه فلر، نیاز می‌باشد طبق استاندارد به‌مدت شش ماه ترکیب درصد گازهای ارسالی به شبکه فلر مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان سامانه را براساس آن طراحی نمود [۱۳]. ظرفیت طراحی سامانه بازیابی فلر به‌طور معمول ۹۰٪ میزان فلرینگ معمول پالایشگاه در نظر گرفته می‌شود. علت اینکه سامانه بازیابی براساس دریافت کل گازهای ارسالی به فلر طراحی نمی‌شود به‌خاطر حفظ مسایل ایمنی و براساس سناریوهای در نظر گرفته در شرایط اضطراری می‌باشد، لذا همواره مقداری از جریان گازها به‌سمت فلر هدایت می‌شود که این عمل موجب می‌شود که آتشخان فلر همواره روشن باقی بماند تا در صورت از مدار خارج شدن سامانه بتوان گازهای مورد نظر را به‌سمت فلر هدایت نمود. در طراحی که شرکت شل برای سامانه‌ی بازیابی فلر در دو پالایشگاه سارینا و مونترال کانادا انجام داده مقدار ظرفیت سامانه بازیابی گازهای فلر را در ۹۰٪ از فلرینگ عملیات معمول پالایشگاه لحاظ نموده است [۱۳]. با توجه به این نکته، مقدار ظرفیت طراحی در نظر گرفته شده در سامانه پالایشگاه عسلویه برابر با ۹۰٪ از فلرینگ معمول پالایشگاه می‌باشد.

پالایشگاه گازی مورد مطالعه

در بررسی رحیم پور و همکاران مشخص شده است که در پالایشگاه‌های گازی منطقه عسلویه منابع اصلی گازهای ارسالی به شبکه فلر شامل واحد شیرین‌سازی گاز ترش، کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی و واحد شیرین‌سازی گاز اتان می‌باشد [۱۴].

سامانه بازیابی گازهای فلر بعد از تفکیک کننده دوفازی که روی خط اصلی شبکه فلر قرار دارد، نصب می‌شود. تفکیک کننده دوفازی به‌منظور حفاظت سامانه در برابر مایعات موجود در جریان گاز ارسالی به فلر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از تفکیک کننده مورد نظر تجهیز آب‌بند مایع قرار دارد که به‌منظور حفظ فشار مثبت و جلوگیری از بازگشت شعله به درون خط جریان اصلی فلر طراحی شده و می‌بایست قبل از مشعل اصلی سامانه فلرینگ نصب شود و لذا سامانه مذکور می‌تواند قبل از آن قرار گیرد. به‌دلیل وجود کمپرسور توجه به عملکرد و توانایی پاسخ آب‌بند مایع نسبت به خلاء ایجاد شده در زمان راه‌اندازی و در حین کار کمپرسور بسیار مدنظر قرار می‌گیرد لذا میزان مایع موجود در مخزن آن به گونه‌ای تغییر می‌نماید تا در صورت عملکرد کمپرسور، فشار سامانه فلرینگ همچنان مثبت باقی‌مانده و مانع ورود هوا از آتشخان فلر به داخل شبکه فلر گردد. زیرا در صورت ورود هوا، اکسیژن وارد خط لوله اصلی فلر می‌شود، با توجه به ترکیبات موجود در گاز که قابلیت انفجار در حضور اکسیژن را دارا می‌باشند، شرایط انفجار فراهم می‌شود. جریان خروجی از تفکیک کننده دوفازی به دو شاخه تقسیم شده که قسمت عمده بیش از ۹۰٪ آن به‌سوی سامانه بازیابی گازهای فلر هدایت می‌گردد و مابقی به سمت فلر هدایت می‌شود [۱۱]. جریان گاز ورودی به سامانه بازیابی گازهای فلر ابتدا وارد کمپرسور رینگ مایع می‌شود و در ادامه گاز متراکم خروجی از کمپرسور بسوی جدا کننده سه‌فازی هدایت می‌گردد. جریان گاز خروجی از جدا کننده همان گازهای بازیابی شده می‌باشد که با توجه به نوع مصرف به سمت واحد قابل استفاده ارسال می‌شود. جریان مایع هیدروکربنی با توجه به ترکیب درصد آن می‌تواند به‌عنوان سوخت یا خوراک یکی از واحدهای پالایشگاه مورد استفاده قرار گیرد. جریان آب جدا شده پس از سرد شدن در مبدل حرارتی دوباره به درون کمپرسور

همچنین نشان‌دهنده مشخصات جریان ارسالی به مشعل در حالت شرایط عملیاتی نرمال می‌باشد. باتوجه به شرایط عملیاتی، مقدار جریان و ترکیب درصد گازهای فلر امکان شبیه‌سازی سامانه بازیابی فلر فراهم می‌شود. به‌منظور انجام شبیه‌سازی نیاز می‌باشد که شرایط فرآیندی منابع مصرف گازهای بازیابی شده مشخص شود که باتوجه به شرایط مصرف، طراحی و شبیه‌سازی سامانه بازیابی گازهای فلر انجام شود.

سناریوهای مصرف گازهای فلر

مهم‌ترین موضع درخصوص سامانه‌های بازیابی گازهای فلر درخصوص نحوه مصرف آن می‌باشد.

باتوجه به نوع فرآیند و فشار گازهای ارسالی به شبکه فلر، هر پالایشگاه گازی دارای سه شبکه فلر فشار بالا، فشار متوسط و فشار پایین می‌باشد. به‌منظور حفظ فشار مثبت در شبکه فلر و جلوگیری از ورود هوا به شبکه، همواره فشار شبکه مثبت نگه داشته می‌شود که به این منظور از جریان پیوسته گاز به شبکه فلر ارسال می‌شود و همواره سوخته شدن گاز در پالایشگاه گازی مطرح می‌باشد که با استفاده از سامانه بازیابی گازهای فلر امکان استفاده از این گاز فراهم می‌شود. **جدول ۱** مقادیر گازهای سوزانده در شرایط معمول عملیاتی پالایشگاه سوم براساس طراحی و شرایط واقعی نشان می‌دهد. **جدول ۲**

جدول ۱ مقادیر گازهای سوزانده در شرایط معمول عملیاتی پالایشگاه سوم براساس طراحی و شرایط واقعی [۱۴]

پالایشگاه	مقادیر نرمال طراحی فلرینگ پیوسته	
	منبع گازها	MMSCMD
پالایشگاه سوم	فلرینگ نرمال واحد شیرین‌سازی گاز	۰/۱۴
	فلرینگ نرمال واحد شیرین‌سازی اتان	۰/۰۱
	فلرینگ CO ₂ از واحد شیرین‌سازی اتان	۰/۱۴
	فلرینگ پیوسته (Purge, Assist, Sweeping)	۰/۵۵
	کل فلرینگ پیوسته	۰/۸۴
	دمای شبکه فلر (°C)	۲۵
	فشار شبکه فلر (barg)	۱/۷۱

جدول ۲ مشخصات جریان ارسالی به مشعل در حالت شرایط عملیاتی نرمال [۱۵ و ۱۶]

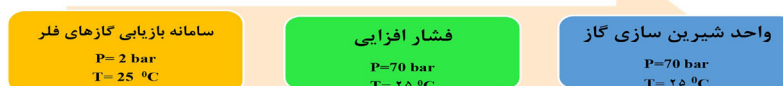
ترکیب درصد	HP-Flare	MP-Flare	LP-Flare
Methane	۸۸/۹۷	۸۶/۶۵	۸۹/۰۳
Ethane	۵/۱۷	۵/۶۰	۴/۹۴
Propane	۱/۷	۲/۰۷	۱/۶۱
i-Butane	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۳۱
n-Butane	۰/۴۹	۰/۷۸	۰/۴۷
i-Pentane	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۲
n-Pentane	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱
H ₂ S	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
H ₂ O	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
N ₂	۲/۸۶	۳/۸۷	۳/۵۷

نسبت به دیگر روش‌ها، هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری داشته و سود سالانه بیشتری را نیز به خود اختصاص می‌دهد، لیکن بازگشت سرمایه آن طولانی‌تر است. در نهایت روش فشار افزایشی گازهای فلر و بازگشت به ابتدای فرآیند پالایشگاه برای پالایشگاه‌های پارس جنوبی مثبت ارزیابی می‌شود [۹]. گازهای فلر دارای ترکیبات اسیدی هیدروژن سولفید و مونوکسید کربن می‌باشند و با توجه به منابع مصرف گازهای بازیابی شده، بهترین انتخاب بازگشت این جریان و تزریق به واحد شیرین‌سازی پالایشگاه می‌باشد. شرایط عملیاتی واحد شیرین‌سازی گاز به صورت فشار ۷۰ bar و دمای ۲۵ °C می‌باشد به این منظور سامانه فلر ریکاوری پس از دریافت گاز از شبکه فلر، فشار و دمای گازها را به شرایط عملیاتی واحد شیرین‌سازی پالایشگاه می‌رساند. شکل ۲ نمای کلی فرآیند تزریق مجدد گازهای فلر بازیابی شده به ابتدای پالایشگاه می‌باشد. فشار گازها در شبکه فلر در شریط نرمال فلرینگ، به صورت اتمسفریک می‌باشد و به منظور افزایش فشار این گازها تا ۷۰ bar و تزریق مجدد به ابتدای پالایشگاه نیاز می‌باشد از کمپرسورهای رفت و برگشتی استفاده شود. با توجه به شرایط عملیاتی و همچنین امکان استفاده از تجهیزات و کمپرسورهای موجود در پالایشگاه دو طرح برای فرآیند مذکور قابل تعریف می‌باشد.

طرح یک: افزایش فشار گاز فلر و تزریق به واحد شیرین‌سازی

در طرح یک جریان گازهای فلر ابتدا توسط سامانه بازیابی فشرده شده و در ادامه توسط کمپرسورهای رفت و برگشتی فشار جریان به میزان فشار ورودی واحد شیرین‌سازی گاز رسانده می‌شود.

منابع مختلفی برای مصرف گازهای بازیابی شده وجود دارد که می‌توان به مصرف گازها به عنوان سوخت پالایشگاه، تبدیل به فرآورده‌های گازی، تولید برق و فشرده‌سازی مجدد و تزریق در خطوط لوله سراسری را اشاره نمود. مقدار جریان گاز فلر، دما، فشار و ترکیب درصد گاز از پارامترهای مهم در طراحی و انتخاب منابع مصرف گازهای فلر می‌باشند. با توجه به بررسی‌های انجام شده و با توجه به نرخ بازگشت سرمایه و لحاظ نمودن محدودیت‌های عملیاتی و فرآیندی پیش‌رو مناسب‌ترین گزینه برای استفاده مجدد از گازهای بازیابی شده، استفاده از آن به عنوان سوخت پالایشگاه می‌باشد. از بررسی‌های که توسط ابراهیم‌پور در زمینه منابع مصرف گازهای بازیابی شده شبکه فلر که در منطقه انرژی پارس- عسلویه انجام شده است، مشخص شده یکی بهترین منابع برای مصرف گازهای بازیابی شده استفاده مجدد و تزریق به ابتدای فرآیند شیرین‌سازی گاز ترش پالایشگاه می‌باشد [۱۷]. رحیم‌پور و همکاران اطلاعات خروجی گاز فلر پالایشگاه‌های عسلویه را به صورت تجمیعی مورد بررسی قرار دادند و پس از انجام شبیه‌سازی بر روی سه روش مصرف گازهای بازیابی شده به این نتیجه رسیدند که با توجه به دبی ۳۶۵ MMSCFD امکان تولید ۲۱۳۰ MW الکتریسیته وجود دارد و یا می‌توان ۴۶۰۰۰ bbl/d میعانات گازی تولید کرد. بررسی‌های انجام شده مشخص شده است که بیشترین بازگشت سرمایه مربوط به فرآیند تولید میعانات گازی می‌باشد ولی بیشترین سرمایه‌گذاری نیز مربوط به آن می‌شود در حالی که فرآیند فشارافزایی، بیشترین بازگشت سرمایه را دارد و از سوی دیگر کمترین سرمایه‌گذاری را به خود اختصاص می‌دهد. در حالی که تولید برق



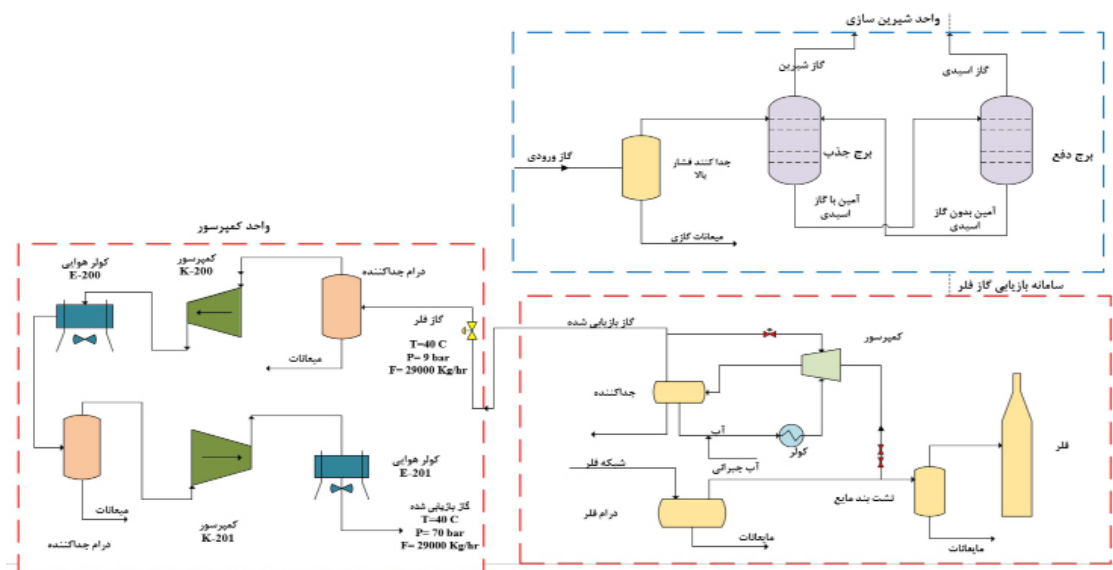
شکل ۲ نمای کلی فرآیند تزریق مجدد گازهای فلر بازیابی شده به ابتدای پالایشگاه

گازهای فلر در واحد شیرین‌سازی جداسازی و مجدداً مورد استفاده قرار داد.

طرح دو- افزایش فشار گاز فلر و تزریق به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی

در این طرح گازهای فلر پس از جمع‌آوری از شبکه فلر توسط سامانه بازیابی گاز فلر به فشار ۹ bar افزایش فشار داده می‌شوند و در ادامه به کمپرسورهای موجود در واحد تثبیت میعانات گازی ارسال می‌شوند. در واحد پایدارسازی میعانات، میعانات گازی پس از جداسازی از گاز طبیعی حاوی ترکیبات فراری از هیدروکربن‌های سبک همچون متان، اتان می‌باشد که چنانچه در شرایط محیطی مناسب قرار گیرند، می‌توانند از فاز مایع جدا شده و باعث دو فاز شدن سیستم و پیوستن به فاز گازی شوند که این امر اثرات نامطلوبی در کیفیت محصول، نگهداری و انتقال میعانات گازی به همراه خواهد داشت. بنابراین به منظور رسیدن به شرایط مطلوب جهت نگهداری، انتقال نیاز می‌باشد به صورت پایدار در فاز مایع قرار داشته باشند که در این واحد، فشار بخار میعانات با جداسازی ترکیبات فرار کاهش داده می‌شود. گازهای سبک جدا شده از میعانات گازی پس از فشرده‌سازی به واحد شیرین‌سازی گاز پالایشگاه ارسال می‌شوند.

شکل ۳ نشان‌دهنده فرآیند مربوط به طرح یک می‌باشد. در فرآیند فشرده‌سازی دمای گاز افزایش می‌یابد و باتوجه به اینکه گازهای فلر قابلیت انفجار را دارند، دمای خروجی کمپرسور دارای محدودیت می‌باشد و براساس استاندارد انستیتو نفت آمریکا دمای خروجی کمپرسورها 160°C می‌تواند باشد. به این منظور در سامانه بازیابی گازهای فلر از کمپرسورهای رینگ مایع استفاده می‌شود که امکان فشرده‌سازی در شرایط دما ثابت را فراهم می‌نماید. این نوع کمپرسورها براساس طراحی فشار خروجی ۹ bar را در حالت دما ثابت می‌توانند ایجاد کنند [۱۸]. به منظور افزایش فشار به ۷۰ bar نیاز می‌باشد که از کمپرسورهای رفت و برگشتی چند مرحله ای استفاده شود تا بتواند فشار گاز را از ۹ به ۷۰ bar افزایش دهد. باتوجه به نسبت تراکم در کمپرسور و افزایش فشار نیاز است از کولرهای میانی به منظور کنترل دما 160°C استفاده شود [۱۹]. جریان گاز پس از ازدیاد فشار به واحد شیرین‌سازی پالایشگاه تزریق می‌شود. در واحد شیرین‌سازی گاز ترکیبات اسیدی سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن توسط حلال آمین جداسازی می‌شود. باتوجه به وجود ترکیبات اسیدی در گازهای فلر به منظور استفاده مجدد آن می‌توان ترکیبات اسیدی را از



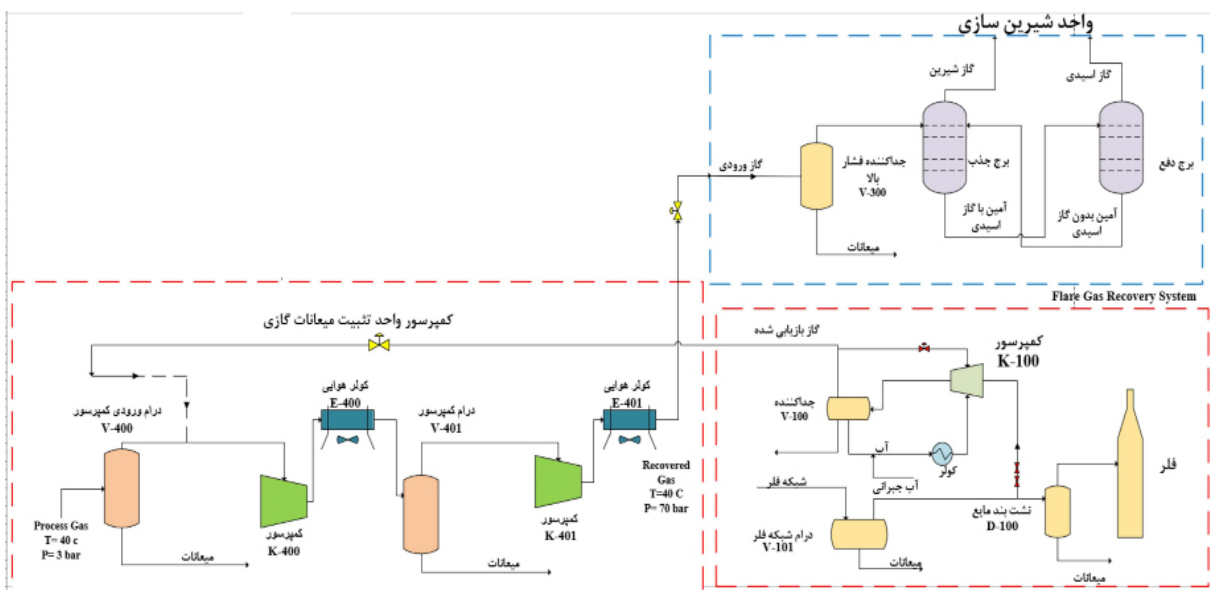
شکل ۳ نمای کلی فرآیند مربوط به طرح یک مصرف گازهای بازیابی شده

درحالی‌که از یک شرایط عملیاتی به یک شرایط عملیاتی دیگر تغییر می‌کنیم، فراهم می‌شود. استفاده از شبیه‌سازی برای واحدهای فرآیندی موجب می‌شود مقدار هزینه ثابت و عملیاتی فرآیند کاهش یابد [۲۰ و ۲۱]. شبیه‌سازی سامانه‌ی بازیابی گازهای ارسالی به فلر در شناخت نحوه عملکرد این سامانه در جهت بازیابی حداکثری و تأثیر آن بر شبکه فلر پالایشگاه کمک مؤثری می‌نماید. در طی شبیه‌سازی پایا، موازنه جرم و انرژی فرآیند انجام شده است و مشخصات هر یک از جریان‌ها و تجهیزات موجود محاسبه شده است. باتوجه به ترکیب گازهای فلر و حضور گازهای اسیدی از رابطه حالت پنگ-رابینسون به‌منظور محاسبات داده‌های ترمودینامیکی استفاده شده است و شبیه‌سازی در حالت پایا انجام شده است. جریان گازهای فلر از هر یک از هدرهای فشار بالا، متوسط و کم در ابتدا جمع‌آوری شده و پس از آن با فشار ۱/۷ bar و دمای 25°C به سامانه بازیابی گازهای فلر ارسال می‌شود. **جدول ۳** نشان‌دهنده ترکیب درصد مربوط به هر یک از جریان‌های فرآیند مذکور می‌باشد. **جدول ۴** نشان‌دهنده مشخصات کمپرسور سامانه بازیابی گازهای فلر می‌باشد.

در سناریو دوم گازهای بازیابی شده در شبکه فلر به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات تزریق شده و نهایتاً به‌همراه گازهای سبک به واحد شیرین‌سازی گاز پالایشگاه تزریق می‌شوند. کمپرسور واحد تثبیت میعانات گازی از نوع رفت و برگشتی دو مرحله‌ای می‌باشد. **شکل ۴** نشان‌دهنده نمای کلی فرآیند طرح دوم تزریق گازهای فلر بازیابی شده به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی می‌باشد.

شبیه‌سازی سامانه بازیابی گازهای فلر

به‌کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای، این امکان فراهم می‌گردد که طرح‌های مختلف پیشنهادی به‌راحتی و با دقت و سرعت بالا با هم مقایسه شده و مناسب‌ترین طرح در حالت عملیاتی بهینه‌سازی و انتخاب شود. باتوجه به اینکه تمامی پارامترهای شبکه فلر به‌شدت متغییر می‌باشد، امکان تغییر دادن چندین پارامتر عملیاتی به‌کمک مدل رایانه‌ای و مشاهده اثرات و نتایج آن در بازده، مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرآیند بسیار مفید می‌باشد. زمانی‌که از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی فرآیند استفاده می‌کنیم امکان پیش‌بینی رفتار تجهیزات فرآیندی



شکل ۴ نمای کلی فرآیند طرح دوم تزریق گازهای فلر بازیابی شده به واحد تثبیت میعانات گازی

جدول ۳ ترکیب درصد مربوط به هر یک از جریان‌های فرآیند بازیابی گازهای فلر

گاز بازیابی شده	میعانات	گاز فشرده شده	گاز فلر	درصد مولی
۰/۸۷۸۶	۰	۰/۸۷۸۸	۰/۸۷۹۸	Methane
۰/۰۴۶۹	۰	۰/۰۴۷۱	۰/۰۴۸۱	Ethane
۰/۰۱۵۷	۰	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۶۹	Propane
۰/۰۰۱۶	۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۸	H ₂ S
۰/۰۰۰۱	۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	H ₂ O
۰/۰۰۰۳	۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۵	n-Pentane
۰/۰۰۰۳	۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۳	i-Pentane
۰/۰۰۰۲	۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۴	n-Butane
۰/۰۰۲۸	۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴۰	i-Butane
۰/۰۰۰۲	۰	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۳۲	CO ₂
۰/۰۳۹۷	۰	۰/۰۳۹۹	۰/۰۴۰۹	N ₂
۲۵	۲۵	۱۵۲	۲۵	Temp (°C)
۹/۷۱	۹/۷۱	۹/۷۱	۱/۷۱	Pressure (bar)

جدول ۴ مشخصات کمپرسور سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر

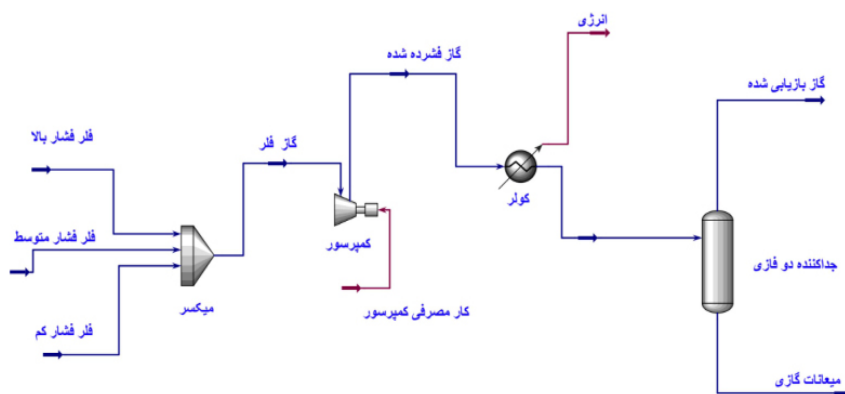
مقدار	شرایط
۱۴۲۷۰	هد آدیباتیک (m)
۱۴۶۸۰	هد پلی تروپیک (m)
۷۵	بازده آدیباتیک (%)
۷۷/۱۸	بازده پلی تروپیک (%)
۱۵۰۳	توان مصرفی (kW)
۰	اتلافات اصطحکاک
۱	ضریب پلی تروپیک
۱/۳۶	توان پلی تروپیک
۱/۲۶	توان ایزوترمال
۶۵۴۴	سرعت روتور (rpm)

مشخصات کولر خنک‌کننده جریان گازهای بازیابی شده می‌باشد.

تحلیل اکسرژی

تحلیل انرژی در یک پالایشگاه گازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مصرف انرژی در فرآیندهای مختلف این صنعت می‌تواند به‌عنوان یکی از عوامل اساسی تأثیرگذار بر هزینه‌ها و بهره‌وری باشد.

مقدار توان مصرفی کمپرسور ۱۵۰۷ KW با راندمان ۷۷٪ در حالت پلی تروپیک می‌باشد. با افزایش فشار گاز دمای آن به ۱۵۲ °C افزایش پیدا می‌کند که با استفاده از مبدل حرارتی دما آن به ۲۵ °C رسانده می‌شود و نهایتاً میعانات گازی توسط جداکننده دوفازی جداسازی می‌شود. شکل ۵ نشان‌دهنده نمای کلی فرآیند شبیه‌سازی شده سامانه بازیابی گازهای فلر می‌باشد و جدول ۵ نشان‌دهنده



شکل ۵ نمای کلی فرآیند شبیه‌سازی شده سامانه FGR

جدول ۵ مشخصات کولر سامانه بازیابی گازهای فلر

مقدار	شرایط
۱۲۶/۸	دمای ورودی (°C)
۲۵	دمای خروجی (°C)
۰/۱	افت فشار (bar)
۱۸۳۰	بار حرارتی (kw)

بازده اکسرژی کمتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده وجود انرژی‌های بی‌استفاده و ضایعات انرژی در فرآیند است. برای بهبود بازده اکسرژی، اقدامات بهینه‌سازی در طراحی و عملیات سیستم‌ها اجرا می‌شود که این اقدامات شامل بهبود راندمان تجهیزات، کاهش افت فشار، بهینه‌سازی دما و فشار در انتقال گرما، و استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته می‌شوند. با تعریف سناریوهای مختلف برای یک فرآیند و بررسی اکسرژی امکان ارزیابی بازده عملکرد فرآیند فراهم می‌شود. چیدمان تجهیزات، انتخاب نوع تجهیزات و بهینه‌سازی شرایط و پارامترهای عملیاتی در محاسبه نهایی بازده اکسرژی یک سیستم تأثیر گذار می‌باشد. اکسرژی تغییرات انتالپی و انترپی سیستم را لحاظ می‌کند و اختلاف انتالپی به‌عنوان توانایی انجام کار در یک سیستم نسبت به آنترپی مجموع برگشت ناپذیری‌های سیستم می‌باشد. روابط ۴-۱ نشان‌دهنده روابط مربوط به محاسبه اکسرژی فرآیند می‌باشد. به‌منظور انجام مطالعات اکسرژی از نرم‌افزار اسپن پلاس استفاده شده است.

این تحلیل به‌واحد مدیریت پالایشگاه امکان می‌دهد تا نقاط قوت و ضعف در مصرف انرژی را شناسایی کرده و بهبودهای لازم را اعمال نماید. در واقع اکسرژی، بیشترین میزان کاری است که می‌توان از یک سیستم ایده‌آل، با توجه به مقدار انرژی اعمال شده دریافت کرد. راندمان اکسرژی پارامتر مهمی می‌باشد که نشان‌دهنده بازده کلی یک فرآیند با توجه به کلیه تجهیزات موجود و انرژی‌های مصرفی آن می‌باشد. بازده اکسرژی یک پارامتر حیاتی در تحلیل انرژی سیستم‌هاست و نشان‌دهنده میزان کاربردی بودن انرژی در یک فرآیند است. این بازده، نسبت اکسرژی خروجی به اکسرژی ورودی سیستم را محاسبه می‌کند و به‌عنوان نشانگری از کارایی انرژی سیستم عمل می‌کند. مقدار بازده اکسرژی بین صفر و ۱ (یا به‌صورت درصد بین ۰ تا ۱۰۰٪) قرار می‌گیرد، که ایده‌آل‌ترین حالت آن برابر با ۱ می‌باشد. بالاترین مقدار ممکن به این معناست که تمام انرژی وارد شده به سیستم به شکل کار مفید خروجی داده شده است. در صورتی که

عواملی که بر این مقدار تأثیر می‌گذارند، می‌تواند به بهبود کلان کارایی سیستم کمک کند [۲۲]. انتخاب نوع مبدل حرارتی از نوع پوسته و لوله و صفحه‌ای، انتخاب کمپرسور، تغییر پارامترهای نسبت تراکم و دما می‌توان راندمان اکسرژی فرآیند بهبود دهد و موجب کاهش مصرف انرژی شود [۲۲].

جدول ۶ نشان‌دهنده موازنه اکسرژی سامانه بازیابی گازهای فلر می‌باشد. باتوجه به داده‌های به‌دست آمده درخصوص هر یک از جریان‌های سامانه بازیابی گازهای فلر امکان محاسبه راندمان اکسرژی فرآیند فراهم می‌شود که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$(۳) \quad \frac{100}{(1917 + 1854 + 2210)} * 64 = 64 / 45 \%$$

راندمان اکسرژی = $(1972 + 1870 + 13)$

تحلیل اکسرژی طرح یک

طرح اول درخصوص ازدیاد فشار گازهای بازیابی شده از شبکه فلر توسط کمپرسورهای رفت و برگشتی از فشار ۹ bar به ۷۰ می‌باشد. در ابتدا طرح براساس اکسرژی جریان‌ها شبیه‌سازی شده و داده‌های به‌دست آمده به‌منظور محاسبه راندمان اکسرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه ترمودینامیکی لحاظ شده در این شبیه‌سازی از نوع پنگ-رابینسون می‌باشد که محاسبه دقیق پارامترهای ترمودینامیکی انتالپی، انترپوی و اکسرژی فراهم می‌شود. باتوجه به محاسبات انجام شده، بازده اکسرژی طرح یک $69/01\%$ می‌باشد. بازده اکسرژی به‌میزان $69/01\%$ ، به‌عنوان یک شاخص کلان در تجزیه و تحلیل بهره‌وری انرژی در طرح اول، نشانگر بهره‌وری و عملکرد انرژی مورد استفاده است.

تحلیل بازده اکسرژی به مدیران این امکان را می‌دهد تا در جهت افزایش کارایی انرژی و کاهش هزینه‌ها، تصمیمات استراتژیکی اتخاذ کنند و فرآیندها را با بهینه‌ترین شکل ممکن اداره کنند. از این‌رو، توجه به بازده اکسرژی به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی در مدیریت انرژی و پایداری سیستم‌های صنعتی حائز اهمیت بسیار است.

$$(۱) \quad \Delta E = \Delta H - *T\Delta S$$

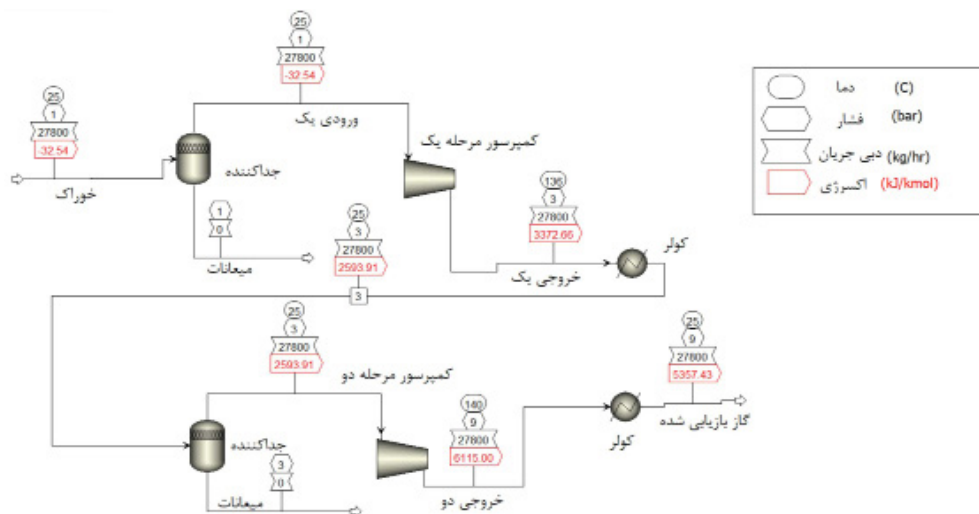
(۲) راندمان اکسرژی = (اکسرژی خروجی از فرآیند) / (اکسرژی ورودی به فرآیند)

تحلیل اکسرژی سامانه بازیابی گازهای فلر

به‌منظور انجام تحلیل اکسرژی، مقدار اکسرژی جریان‌ها و انرژی ورودی و خروجی توسط کمپرسورها و کولرها محاسبه می‌شود و نهایتاً راندمان اکسرژی محاسبه می‌شود. راندمان اکسرژی نسبت مقدار اکسرژی ورودی به فرآیند به اکسرژی خروجی از فرآیند می‌باشد. اکسرژی ورودی مربوط به اکسرژی جریان‌های ورودی و کمپرسورها می‌باشد و اکسرژی خروجی مربوط به جریان خروجی و کولرهای میانی می‌باشد. باتوجه به داده‌های به‌دست آمده درخصوص هر یک از جریان‌های سامانه بازیابی گازهای فلر، راندمان اکسرژی محاسبه شده $64/45\%$ می‌باشد. این مقدار از اهمیت ویژه برخوردار است، زیرا براساس نوع کمپرسور، راندمان و نسبت تراکم، دمای گازهای خروجی از کمپرسور و کولرهای میانی محاسبه شده است. این اطلاعات مشخص می‌کنند که به چه مقدار سیستم بازیابی گازهای فلر در بهره‌وری انرژی خود بهینه عمل می‌کند. نکته مهم این است که این راندمان تأثیر مستقیم در هزینه‌ها و کارایی سیستم دارد. بنابراین، بهبود و بهینه‌سازی

جدول ۶ داده‌های اکسرژی جریان‌های سامانه بازیابی گازهای فلر

نام جریان	Units	ورودی یک	خروجی یک	خروجی دوم	خوراک	گاز بازیابی
مولار اکسرژی	kJ/kmol	-۳۳	۳۳۷۳	۶۱۱۵	-۳۳	۵۳۵۷
اکسرژی جرمی	kJ/kg	-۲	۱۸۰	۳۲۷	-۲	۲۸۶
اکسرژی جریان	kW	-۱۳	۱۳۹۱	۲۵۲۲	-۱۳	۲۲۱۰



شکل ۶ نمای کلی موازنه اکسرژی سامانه بازیابی گازهای فلر

می‌شوند. کمپرسورهای استفاده شده از نوع رفت و برگشتی و دارای کولرهای میانی به‌منظور ایجاد شرایط دما ثابت در فرآیند فشرده‌سازی می‌باشند. باتوجه به مقدار اکسرژی جریان‌ها و انرژی وارد شده توسط کمپرسورها و انرژی خروجی توسط کولرها مقدار راندمان اکسرژی محاسبه شده برای این فرآیند $78/59\%$ می‌باشد. باتوجه به داده‌های به‌دست آمده درخصوص هر یک از جریان‌های سامانه بازیابی گازهای فلر امکان محاسبه راندمان اکسرژی فرآیند فراهم می‌شود که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$(5) \quad 78/59\% = 100 * (2254 + 2528 + 5569) / (2913)$$

$$+ (2211 + 797 + 2213) = \text{راندمان اکسرژی}$$

بازده اکسرژی بالا در یک فرآیند نشان‌دهنده بهره‌وری و کارایی سیستم و مقدار تبدیل انرژی به کار مفید می‌باشد. با افزایش بازده اکسرژی، میزان انرژی که به‌عنوان کار در دسترس قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد و همچنین اتلاف انرژی کمتر می‌شود. این امر به معنای بهبود عملکرد و بهره‌وری فرآیند، کاهش هزینه‌ها و حتی کاهش اثرات منفی بر محیط زیست می‌باشد. شکل ۷ نشان‌دهنده راندمان اکسرژی فرآیند بازیابی گازهای فلر و سناریوهای مختلف مصرف می‌باشد.

این عدد نشان می‌دهد که درصد قابل توجهی از انرژی وارد شده به سیستم تبدیل به کار مفید و مفید در خروجی شده است. برای بهبود بازده اکسرژی به‌میزان بالاتر، امکانات مختلفی می‌توانند مورد ارزیابی قرار گیرند. اولاً، بهینه‌سازی فرآیندها و تجهیزات با توجه به انتقال حرارت و جریان گاز درون سیستم می‌تواند کمک کند. باتوجه به داده‌های به‌دست آمده درخصوص هر یک از جریان‌های سامانه بازیابی گازهای فلر امکان محاسبه راندمان اکسرژی فرآیند فراهم می‌شود که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$(4) \quad 69/01\% = 100 * (1929 + 2001 + 4146) / (1526 + 1837 + 2211)$$

$$= \text{راندمان اکسرژی}$$

تحلیل اکسرژی طرح دو

واحد تثبیت میعانات گازی یکی از اجزای مهم در ساختار یک پالایشگاه گازی است که وظیفه اصلی آن تنظیم فشار بخار میعانات گازی استخراج‌شده از فرآیند پالایش گاز می‌باشد. طرح دوم درخصوص تزریق گازهای فلر بازیابی شده به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی می‌باشد. جریان گازهای فلر پس از بازیابی توسط سامانه بازیابی گازهای فلر با فشار ۹ bar به کمپرسورهای رفت و برگشتی واحد تزریق شده و پس از افزایش فشار به ۷۰ bar نهایتاً به واحد شیرین‌سازی گاز پالایشگاه ارسال



شکل ۷ راندمان اکسرژی فرآیند بازیابی گازهای فلر

گازهای فلر پس از بازیابی توسط کمپرسورهای رفت و برگشتی دو مرحله ای از فشار ۹ به ۷۰ مترکیم شده و در ادامه به واحد شیرین سازی پالایشگاه تزریق می شود. در طرح دوم گازهای بازیابی شده از شبکه فلر به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی تزریق شده و با افزایش فشار ۷۰ bar به واحد شیرین سازی پالایشگاه تزریق می شوند. براساس تحلیل اکسرژی جریان های ورودی و خروجی، انرژی ورودی توسط کمپرسورها و انرژی خروجی توسط کولرها، مقدار راندمان اکسرژی طرح یک برابر با ۶۹٪ و برای طرح دوم ۷۸٪ می باشد. براساس نتایج شبیه سازی و تحلیل اکسرژی، به نتیجه رسیده ایم که تزریق گازهای فلر بازیابی شده به کمپرسورهای واحد تثبیت میعانات گازی، بهترین راهکار برای بهره وری بیشتر از گازهای بازیابی شده است.

نتیجه گیری

باتوجه به متغیر بودن شرایط عملیاتی در شبکه فلر به خصوص در زمان راه اندازی و از سرویس خارج شدن واحدهای فرآیندی، به کمک شبیه سازی می توان رفتار سامانه ای بازیابی گازهای فلر را در هر یک از حالت های فرآیندی مورد بررسی قرار داد. در این مقاله شبیه سازی سامانه بازیابی گازهای فلر در پالایشگاه گازی شده است. با انجام شبیه سازی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر مشخص شده است که امکان بازیابی گازهای فلر kg/hr ۲۷۸۰۰ در دمای $25^{\circ}C$ و فشار ۹ bar فراهم می باشد. کمپرسورهای مورد استفاده از نوع رفت و برگشتی با راندمان ۷۶٪ دارای کولر میانی می باشند. در ادامه تحلیل اکسرژی طرح های مصرف گازهای بازیابی شده مورد بررسی قرار داده شده است. در طرح یک

مراجع

- [1]. Sangsaraki, M. E., Vatani, A., & Rachtchian, D. (2014). Dynamic Simulation of Flare Gas Recovery System in the Case of Total Shut Down with Implement Case Study in South Pars. The 8th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2014). Kish, Iran, 24-27 February.
- [2]. Pawan, M. (2014). Impacts of global warming on environment. International Research Journal of Environmental Sciences, 3(3), 72-78.
- [3]. Vakylabad, A. B., & Moravvej, Z. (2023). Environmental challenges of gases vent from flares and chimneys. In Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries, 307-333. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-323-95154-8.00004-9.
- [4]. Shahab-Deljoo, M., Medi, B., Kazi, M. K., & Jafari, M. (2023). A techno-economic review of gas flaring in Iran and its human and environmental impacts. Process Safety and Environmental Protection, 173, 642-665. doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.051.
- [5]. Soltanieh, M., Zohrabian, A., Gholipour, M. J., & Kalnay, E. (2016). A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran. International Journal of Greenhouse Gas Control, 49, 488-509. doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.02.010.
- [6]. Vahabpour, A., Shojaee, S. M., Tahmasebzadeh, M., & Rasouli, F. (2018). A study on environmental effects

policy, 8(27), 133-154.

[7]. Enayati, M., Hosseini, S. M., & Parvizian, F. (2024). Simulation and exergy analysis of consuming resources of gases recovered from the flare network in gas refinery. *Journal of Petroleum Research*. doi: 10.22078/pr.2024.5373.3389.

[8]. Mirzaei, M., & Bekri, M. (2017). Energy consumption and CO₂ emissions in Iran, 2025. *Environmental Research*, 154, 345-351. doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.023.

[9]. Rahimpour, M. R., Jamshidnejad, Z., Jokar, S. M., Karimi, G., Ghorbani, A., & Mohammadi, A. H. (2012). A comparative study of three different methods for flare gas recovery of Asaloooye Gas Refinery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 4, 17-28. doi.org/10.1016/j.jngse.2011.10.001.

[10]. Suykens, C. (2010). Gas flaring in developing countries-need for Kyoto Mechanisms or sectoral crediting mechanisms. *CCLR*, 4, 42.

[11]. Sangsaraki, M. E., & Anajafi, E. (2015, January). Design criteria and simulation of flare gas recovery system. In *International conference on chemical, food and environment engineering (ICCFEE'15)*. Dubai.

[12]. Yazdani, E., Asadi, J., Dehaghani, Y. H., & Kazempoor, P. (2020). Flare gas recovery by liquid ring compressors-system design and simulation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84, 103627. doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103627.

[13]. Allen, G.D., R.E. Wey, H.H. Chan., (1983). Flare Gas Recovery in Shell Canadian Refineries. in *The fifth industrial energy technology conference*, Houston. URI <https://hdl.handle.net/1969.1/94519>.

[14]. Davoudi, M., Rahimpour, M. R., Jokar, S. M., Nikbakht, F., & Abbasfard, H. (2013). The major sources of gas flaring and air contamination in the natural gas processing plants: A case study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 13, 7-19. doi.org/10.1016/j.jngse.2013.03.002.

[15]. Enayati, M., Hosseini, S. M., & Parvizian, F. (2024). Simulation and exergy analysis of consuming resources of gases recovered from the flare network in gas refinery. *Journal of Petroleum Research*. doi: 10.22078/pr.2024.5373.3389.

[16]. Enayati, M., Hosseini, S. M., & Parvizian, F. (2024). Simulation and exergy analysis of consuming resources of gases recovered from the flare network in gas refinery. *Journal of Petroleum Research*. doi: 10.22078/pr.2024.5373.3389.

[17]. Rahimpour, M. R., Jamshidnejad, Z., Jokar, S. M., Karimi, G., Ghorbani, A., & Mohammadi, A. H. (2012). A comparative study of three different methods for flare gas recovery of Asaloooye Gas Refinery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 4, 17-28. doi.org/10.1016/j.jngse.2011.10.001.

[18]. Asadi, J., Yazdani, E., Dehaghani, Y. H., & Kazempoor, P. (2021). Technical evaluation and optimization of a Flare Gas Recovery System for Improving Energy Efficiency and Reducing Emissions. *Energy Conversion and Management*, 236, 114076. doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114076.

[19]. Ervasti, T., Niinikoski, H., Mäki-Lohiluoma, E., Leppinen, H., Ketolainen, J., Korhonen, O., & Lakio, S. (2020). The comparison of two challenging low dose APIs in a continuous direct compression process. *Pharmaceutics*, 12(3), 279. doi.org/10.3390/pharmaceutics12030279.

[20]. Patel, V., Feng, J., Dasgupta, S., Ramdoss, P., & Wu, J. (2007). Application of dynamic simulation in the design, Operation, and troubleshooting of compressor systems. In *Proceedings of the 36th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories. URI <https://hdl.handle.net/1969.1/163148>.

[21]. Sahoo, M. (2013). High back pressure on pressure safety valves (PSVs) in a flare system. *Developing the Simulation model, Identifying and analyzing the back-pressure build-up* (Master's thesis, The University of Bergen). URI <https://hdl.handle.net/1956/7691>.

[22]. BoroumandJazi, G., Saidur, R., Rismanchi, B., & Mekhilef, S. (2012). A review on the relation between the energy and exergy efficiency analysis and the technical characteristic of the renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3131-3135. doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.057.

Materials and Methods

The study focusing on gas refineries in the Asalouye region highlighted the significant sources of gases directed to the flare network, which include gases from various units such as the sweetening unit, condensate stabilization unit, sweeping, purge gas, and the ethane sweetening unit at the refinery. Each gas refinery in the area is equipped with three distinct flare networks, catering to high pressure, medium pressure, and low-pressure gas flaring based on the process type and gas pressure requirements. The effectiveness of flare gas recovery systems is closely tied to the source of consumption. It has been recognized that an optimal approach for efficiently utilizing the recovered gases involves their reutilization and introduction at the initiation of the sour gas sweetening process within the refinery.

Two consumption scenarios have been outlined for the utilization of recovered flare gases. In the first scenario, the flare gas flow undergoes compression by the recovery system to reach a pressure of 9 bar. Subsequently, reciprocating compressors are employed to further increase the pressure to match the input pressure of the gas sweetening unit at 70 bar and a temperature of 25 degrees Celsius. In the second scenario, flare gases are initially collected from the flare network and pressurized to 9 bar by the flare gas recovery system. The pressurized gases are then directed to the compressors within the gas condensate stabilization unit before being injected into the gas sweetening unit for further processing. The methodology of the study involves several steps. Initially, the flare gases recovery system is simulated

to achieve values for increasing the pressure of recovered gases to 9 bar and maintaining a temperature of 25 degrees Celsius. Subsequently, simulations are conducted for both the first and second scenarios. Once the process details are obtained, exergy simulation and analysis are performed using Aspen Plus software to calculate and analyze the exergy efficiency of each scenario.

Results and Discussion

During the steady state simulation, the mass and energy balance of the process are performed, and the characteristics of each flow and equipment are calculated. Taking into account the composition of flare gases and the presence of acid gases, Peng-Robinson's equation of state is employed to calculate thermodynamic data, ensuring a steady-state simulation. Initially, the flare gases from the high, medium, and low-pressure headers are collected and then directed to the flare gas recovery system at a pressure of 1.7 bar and a temperature of 25 degrees Celsius. The compressor consumes 1507 kilowatts of power and operates polytropically with an efficiency of 77%. Upon increasing the gas pressure, its temperature rises to 152 degrees Celsius, which is subsequently reduced to 25 degrees Celsius using a heat exchanger. Finally, the gas condensate is separated using a two-phase separator. The simulation schematic of the flare gas recovery system in Aspen Hysys is illustrated in Fig. 2. Additionally, simulations for the first and second scenarios are conducted, and all necessary data for exergy simulation are extracted.

Fig. 2 Simulation schematic of flare gas recovery system in Aspen Hysys.

Exergy considers changes in the enthalpy and entropy of a system, with the difference in enthalpy representing the system's ability to perform work compared to entropy, which accounts for the sum of irreversibility within the system. Moreover, to conduct exergy analysis, the exergy of streams and the energy input and output by compressors and coolers are calculated, culminating in the determination of exergy efficiency. Furthermore, exergy efficiency represents the ratio of exergy input to the process compared to exergy output, where input exergy relates to the exergy of incoming streams and compressors, while output exergy pertains to outgoing streams and intermediate coolers.

Based on data acquired for each stream within the flare gas recovery system, the calculated exergy efficiency is 64.45%. The first scenario involves elevating the pressure of gases recovered from the flare network using reciprocating compressors, raising the pressure from 9 to 70 bar. Initially, the scenario is simulated based on the exergy of streams, and the resultant data is utilized to compute the exergy efficiency. The simulation employs a Robinson-type thermodynamic equation, ensuring accurate calculations of parameters like enthalpy, entropy, and exergy. According to calculations, the exergy efficiency for scenario one is determined to be 69.01%.

In the second scenario, recovered flare gases are injected into the compressors of the gas condensate stabilization unit. After recovery by the flare gas recovery system, the gases are injected into reciprocating compressors of the unit at 9 bar pressure. Following pressure elevation to 70 bar, they are subsequently directed to the gas sweetening unit of the refinery. These compressors are reciprocating and include intermediate coolers to maintain constant temperature conditions during the compression process. Based on the exergy of streams, energy input by compressors, and output energy by coolers, the calculated exergy efficiency for this process is 78.59%.

Conclusions

This article focuses on simulating the flare gas recovery system within a gas refinery. Through

simulation, it has been determined that the recovery system can capture 27,800 kilograms per hour of flare gases at 25 degrees Celsius and 9 bar pressure. Utilizing reciprocating compressors with a 76% efficiency, equipped with intermediate coolers, the system's performance is further analyzed through exergy analysis. In scenario one, flare gases are compressed from 9 to 70 bar pressure using two-stage reciprocating compressors post-recovery, and then directed to the refinery's sweetening unit. In the second scenario, gases recovered from the flare network are injected into the compressors of the gas condensate stabilization unit. Following pressure elevation to 70 bar, they are subsequently directed to the refinery's sweetening unit. Through exergy analysis of input and output flows, considering energy input by compressors and output energy by coolers, scenario one yields an exergy efficiency of 69%, while scenario two achieves 78%. Based on the simulation and exergy analysis results, it is concluded that injecting the recovered flare gases into the compressors of the gas condensate stabilization unit presents the optimal solution for enhancing the efficiency of recovered gases.

References

1. Enayati, M., Vatani A., Rachtchian D., (2014). Dynamic Simulation of Flare Gas Recovery System in the Case of Total Shut Down with Implement Case Study in South Pars. In the 8th International Chemical Engineering Congress and Exhibition.
2. Vakylabad, A. B., & Moravvej, Z. (2023). Environmental challenges of gases vent from flares and chimneys. In *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries*. 307-333. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-323-95154-8.00004-9.
3. Shahab-Deljoo, M., Medi, B., Kazi, M.K. and Jafari, M., (2023). A techno-economic review of gas flaring in Iran and its human and environmental impacts. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, pp.642-665. doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.051.