

## شبیه‌سازی و ارزیابی زیست‌محیطی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر

مهدی عنایتی سنگسرکی<sup>۱</sup>، علی وطنی<sup>۲\*</sup>، داود رشتچیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

m.enayati62@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

avatani@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

rashtchian@sharif.edu

**چکیده:** طی فرایندهای استخراج نفت و گاز و فرآوری آن‌ها در پالایشگاه‌ها، مقادیر قابل توجهی از گازهای غیر قابل استفاده در شبکه فلر پالایشگاه‌ها سوزانده می‌شود. گازهای سوزانده شده موجب آلودگی محیط زیست و هدررفت منابع اقتصادی کشور می‌شود. در صورتی که از سامانه‌های بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر استفاده شود، می‌توان زمینه بازیابی انرژی هدررفته و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله ترکیبات  $CO_x$  و  $SO_x$  و  $NO_x$  را فراهم نمود. در این مقاله، ابتدا فرایند سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر، به منظور بازیابی گازهای سوزانده شده بیان شده است. در ادامه، شبیه‌سازی پایای سامانه مورد نظر با انجام مطالعه موردی در یکی از پالایشگاه‌های گازی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در صورت استفاده از سامانه بازیابی گازهای ارسالی به فلر در شرایط عملیاتی معمول پالایشگاه، امکان بازیابی  $(m^3.hr^{-1})$  ۵۹۳۰ گاز طبیعی شیرین شده و  $(ton.hr^{-1})$  ۱۲ میعانات گازی فراهم می‌شود. در ادامه با انجام بررسی زیست‌محیطی مشخص شده است با استفاده از سامانه فوق از تولید ۳۰۰ تن در سال  $NO_x$ ، ۲۱۴۲ تن در سال CO و ۴۳ تن در سال  $SO_2$  جلوگیری می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پالایشگاه، شبکه فلر، سامانه بازیابی گازهای ارسالی به فلر، شبیه‌سازی، گازهای گلخانه‌ای.

همواره کمتر از میزان مصوب برنامه‌های توسعه و بسیار کمتر از میزان مورد نیاز از دید کارشناسان صورت گرفته است. از طرف دیگر، با وجود اجرای طرح‌های فراوان، همچنان مقادیر بسیار زیادی از گازهای همراه (حدود 30 تا 40 میلیون متر مکعب در روز) در کشور بدون هیچ استفاده اقتصادی سوزانده می‌شود و به هدر می‌رود. این در حالی است که این گازهای سوزانده شده یکی از مناسب‌ترین گزینه‌های موجود برای تزریق به مخازن نفتی هستند [6].

پالایشگاه‌های گازی زیادی در دنیا در حال فعالیت‌اند که حجم زیادی از گازهای آلاینده را در اتمسفر پراکنده می‌کنند. آلاینده‌های گازی تولیدشده در شبکه فلر، برای بدن انسان و اکوسیستم، بسیار مضرند. این آلاینده‌ها باعث تولید باران‌های اسیدی و گرم شدن زمین می‌شوند [5]. براساس آمار منتشرشده توسط بانک جهانی [7]، مقدار حجم گازهای سوزانده شده در شبکه فلر، در سال 2010 معادل 4250 میلیارد فوت مکعب در دنیا بوده است. همچنین در این سال، در کشور ایران، 586 میلیارد فوت مکعب گاز سوزانده شده است. این مسئله موجب شده است کشورمان رتبه سوم در جهان و رتبه اول در خاورمیانه را در این زمینه دارا باشد. امروزه با اجرای پروژه‌های پالایشگاه‌های گازی بدون فلر، تلاش چشمگیری برای کاهش میزان گازهای سوزانده شده در شبکه فلر انجام شده است. همچنین پالایشگاه‌هایی با طراحی‌های قدیم‌تر نیز از سامانه FGR<sup>8</sup> به‌منظور کاهش گازهای سوزانده شده در شبکه فلر استفاده می‌شود. با توجه به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه FGR روند استفاده از این تکنولوژی در جهان، رو به رشد است [8]. در زمینه کاهش گازهای ارسالی به شبکه فلر، مطالعات زیادی انجام شده است. قاضی و همکاران بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر را با استفاده از جداکننده‌های چندمرحله‌ای در پالایشگاه نفت خام بررسی کرده‌اند [9]. همچنین زاداکبر و همکاران دو روش را به‌منظور بازیابی و استفاده مجدد گازهای ارسالی به شبکه فلر در پالایشگاه‌های شهید هاشمی‌نژاد (خانگیران) و پتروشیمی تبریز بررسی کرده‌اند [3].

مطالعات انجام‌شده بیشتر در زمینه بررسی میزان فلرینگ در پالایشگاه‌ها و کاهش گازهای سوزانده شده با بهینه‌سازی فرایندهای موجود در پالایشگاه‌هاست. با توجه به اهمیت شناخت سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر و نداشتن اطلاعات کافی در زمینه شبیه‌سازی و نحوه عملکرد سامانه FGR، در این مقاله، ابتدا فرایند سامانه FGR و نحوه عملکرد آن بیان شده و در ادامه، شبیه‌سازی این

بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، یکی از دغدغه‌های اساسی بخش صنعت نفت، گاز و پتروشیمی است. یکی از اصلی‌ترین بخش‌های اتلاف انرژی در پالایشگاه‌ها، شبکه فلرینگ<sup>1</sup> است که بیشترین میزان آلاینده‌ها را دارد؛ لذا توجه به بهینه‌سازی عملکرد و اصلاح این بخش، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در واحدهای پالایشگاهی، گازهای نامرغوب و گازهای تخلیه‌شده از واحدها، هنگام به وجود آمدن شرایط اضطراری، از طریق خط لوله اصلی فلر<sup>2</sup>، به سمت سامانه فلرینگ هدایت شده و در مشعل شبکه فلر سوزانده می‌شوند [1].

هدف اصلی از طراحی شبکه فلر، ایجاد امنیت و ایمنی برای واحدهای فرایندی و کارکنان پالایشگاه در برابر خطرات ناشی از افزایش فشار، انتشار و شعله‌ور شدن گازهای پرفشار است [2]. از سوزانده شدن گازها، به میزان قابل توجهی، آلاینده‌های زیست‌محیطی به اتمسفر منتشر می‌شود. مهم‌ترین ترکیبات جریان گازهای ارسالی به شبکه فلر شامل متان، اتان، پروپان، بوتان و سولفید هیدروژن هستند. زمانی که این گازها در شبکه فلر سوزانده می‌شوند، مواد آلاینده محیط زیست مانند  $\text{NO}_x^3$ ،  $\text{SO}_x^4$  و گازهای گلخانه‌ای<sup>5</sup> از قبیل  $\text{CO}^6$  و  $\text{CO}_2^7$  تولید شده و مقادیر زیادی انرژی نیز وارد اتمسفر می‌شود. تاکنون روش‌ها و راهکارهای متعددی برای کاهش یا بازیابی گازهای ارسالی به فلر ارائه شده است؛ از جمله فعالیت‌های انجام‌شده در راستای اصلاح واحدهای تولیدکننده گازهای زائد و بهبود راندمان سامانه فلرینگ موجود [3] و [4]. با پیشرفت فناوری در این زمینه، امروزه می‌توان با کمک سامانه فشرده‌سازی و بازیابی گاز، میزان فلرینگ پالایشگاه را به مقدار چشمگیری کاهش داد و از این طریق، گازهایی را که به سمت شبکه فلر ارسال می‌شوند، جمع‌آوری کرد و سپس به‌عنوان خوراک شبکه سوخت پالایشگاه، بویلرها و توربین‌های گازی، مورد استفاده قرار داد [5].

همچنین یکی از کاربردهای مهم گازهای همراه بازیابی شده، تزریق به مخازن نفتی به‌منظور تثبیت فشار و ازدیاد برداشت از مخازن می‌باشد. با وجود نیاز کشور به استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت نفت و همچنین کارآمد بودن روش تزریق گاز در ایران، به دلایلی مانند مشکل تأمین منابع سرمایه‌ای لازم و همچنین، کمبود گاز مورد نیاز، تزریق گاز

1. Flaring
2. Flare Header Network
3. Nitrogen Oxide
4. Sulphur Oxide
5. Greenhouse Gas
6. Carbon Monoxide
7. Carbon Dioxide

8. Flare Gas Recovery System

سامانه در حالت عملیات نرمال پالایشگاه انجام شده است. همچنین، میزان کاهش گازهای آلاینده‌های منتشرشده توسط شبکه فلر پالایشگاه نمونه با به‌کارگیری سامانه FGR مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2. سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر

پس از انجام تلاش‌های گوناگون در جهت کاهش میزان فلرینگ در دنیا، امروزه با استفاده از سامانه FGR امکان بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر و استفاده از آن‌ها در شبکه سوخت پالایشگاه‌ها، تولید فراورده‌های گازی و تولید برق فراهم شده است [9]. برخی از فواید استفاده از سامانه FGR به‌منظور کاهش فلرینگ عبارت‌اند از [10]:

- کاهش قابل توجه آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوختن گازها مانند ترکیبات ازته و گوگردی؛ از جمله  $NO_x$ ،  $SO_x$  و گازهای گلخانه‌ای مانند مونو اکسید کربن و دی اکسید کربن.
  - استفاده بهینه از گازهای با ارزشی که قبلاً سوزانده می‌شدند، به‌عنوان محصولات با ارزش، خوراک یا سوخت سایر واحدهای عملیاتی موجود در دسترس یا جانبی.
  - افزایش طول عمر آتشخان برج‌های مشعل<sup>1</sup>.
- در خصوص سایر مزایای استفاده از سامانه بازیابی گازهای ارسالی به برج مشعل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [11]:

- از نظر زیست‌محیطی: جلوگیری از افزایش دمای زمین و بارش باران‌های اسیدی.
- از نظر ایمنی: کاهش ریسک امکان انفجار گازهای ارسالی به شبکه فلر در صورتی که سامانه جرقه‌زن آتشخان فلر دچار مشکل شود و نتواند جرقه لازم را در آتشخان فلر ایجاد کند.
- کاهش میزان نیتروژن یا گاز طبیعی که به‌منظور ایجاد فشار مثبت در لوله اصلی شبکه فلر مصرف می‌شوند.
- کاهش میزان بوتیلیتی<sup>2</sup> مصرفی از جمله بخار مصرفی به‌منظور کاهش میزان دود حاصل از سوختن گازها در آتشخان فلر.
- کاهش نور، صوت و تشعشع حرارتی حاصل از فلرینگ.

سامانه FGR از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که مهم‌ترین جزء آن، کمپرسور رینگ مایع<sup>3</sup> است. اجزای سامانه مورد نظر عبارت‌اند از [12]:

1. کمپرسور که به‌منظور افزایش فشار جریان گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

2. جداکننده دوفازی یا سه‌فازی که به‌منظور جداسازی میعانات گازی که بر اثر فشرده‌سازی گازها تولید شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

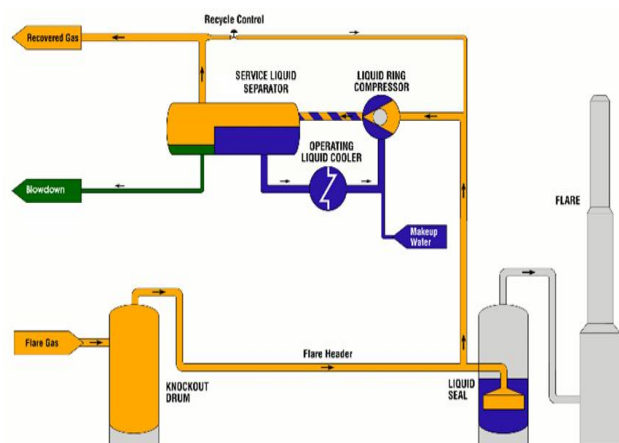
3. مبدل حرارتی سردکننده آب برگشتی به کمپرسور رینگ مایع.

4. آب‌بند مایع<sup>4</sup> که به‌منظور حفظ فشار مثبت در شبکه فلر و جلوگیری از ورود هوا به هدِر<sup>5</sup> اصلی شبکه فلر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین عوامل مؤثر در طراحی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به برج مشعل عبارت‌اند از:

- نرخ حجمی جریان گازهای ارسالی به برج مشعل در شرایط نرمال پالایشگاه.
- ارتفاع مایع در آب‌بند مایع به‌منظور ایجاد فشار استاتیکی (معمولاً مایع مورد نظر مخلوطی از آب و منو اتیلن گلیکول<sup>6</sup> است).
- ترکیب درصد جریان گاز ارسالی به شبکه فلر.
- دما و فشار گازهای ارسالی به شبکه فلر.
- شرایط فرایندی گازهای خروجی از سامانه FGR (منابع مصرف گازها تعیین‌کننده شرایط فرایندی گازهای خروجی از سامانه FGR است).
- ارزش حرارتی گازهای ارسالی به شبکه فلر.

شکل (1) نشان‌دهنده سامانه FGR و اجزای تشکیل‌دهنده آن است. در این سامانه، از کمپرسور رینگ مایع به‌منظور جمع‌آوری و فشرده‌سازی گازها استفاده شده است.



شکل (1): سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر [13]

4. Liquid Seal Drum  
5. Header  
6. Mono Ethylene Glycol

1. Flare Tip  
2. Utility  
3. Liquid Ring Compressor

## 1.2. کمپرسور سامانه FGR

کمپرسور مهم‌ترین قسمت سامانه FGR و در واقع، قلب سامانه مورد نظر است. کمپرسور سامانه FGR می‌بایست دارای قابلیت‌های زیر باشد:

- تغییر ناگهانی فشار و مقدار جریان گاز ارسالی به شبکه فلر.
- تغییر ناگهانی دمای گاز.
- تغییر ناگهانی ترکیب درصد جریان گاز.
- جریان ناپایدار و منقطع گاز ورودی به کمپرسور.

برای انتخاب کمپرسور پارامترهایی از جمله بازده زیاد، نیاز فرایندی، هزینه‌های عملیاتی، قیمت اولیه پایین، تعمیرات و نگهداری پایین در نظر گرفته می‌شود. از میان کمپرسورهای موجود که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، کمپرسور خاص رینگ مایع به عنوان مناسب‌ترین کمپرسور برای عملکرد مناسب سامانه FGR توسط شرکت‌های سازنده سامانه FGR انتخاب می‌شود [13]. مزایای کمپرسور رینگ مایع عبارت‌اند از:

- امکان انتقال سیال دوفازی شامل گاز و مایع؛
- امکان انتقال سیال گازی همراه با ذرات ناخالصی؛
- امکان انتقال گازهای خورنده، آتش‌گیر و سمی؛
- عملکرد بدون نیاز به روغن و ایجاد شرایط دما ثابت در طی فرایند فشرده‌سازی.

در واقع، کمپرسور رینگ مایع یک کمپرسور دورانی جابه‌جایی مثبت است که مشابه کمپرسورهای تیغه‌ای، یک روتور<sup>2</sup> خارج از مرکز درون استاتور<sup>3</sup> آن قرار دارد. بخشی از استاتور با مایعی مانند آب پر می‌شود که با چرخش روتور، نیروی گریز از مرکز، مایع را در یک مسیر حلقه‌ای شکل به اطراف محفظه استاتور کمپرسور منتقل کرده و به چرخش درمی‌آورد. به دلیل خارج از مرکز بودن تیغه‌ها، حلقه مایع به صورت بیضی، اطراف روتور قرار می‌گیرد. مرکز حلقه ارتباط بین نازل ورودی و نازل خروجی را برقرار کرده و یک محفظه گاز تشکیل می‌دهد. با چرخش روتور گاز از نازل ورودی، محفظه گاز را پر کرده و به سمت نازل خروجی هدایت می‌شود. حلقه مایع باعث آب‌بندی فضای بین تیغه‌ها و محاصره شدن گاز درون محفظه شده و با حرکت تیغه‌ها و کاهش فضای خالی، گاز محاصره شده، متراکم می‌گردد و به نازل خروجی منتقل می‌شود. شکل (1) نحوه عملکرد و اجزای داخلی این نوع کمپرسور را نشان می‌دهد.

سامانه FGR بعد از تفکیک‌کننده دوفازی که روی خط اصلی فلر قرار دارد، نصب می‌شود. تفکیک‌کننده دوفازی<sup>1</sup> به منظور حفاظت سامانه در برابر مایعات موجود در جریان گاز ارسالی به فلر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از تفکیک‌کننده مورد نظر، تجهیز آب‌بند مایع قرار دارد که به منظور حفظ فشار مثبت و جلوگیری از بازگشت شعله به درون خط جریان اصلی فلر طراحی شده و قبل از مشعل اصلی سامانه فلرینگ نصب می‌گردد. محل نصب سامانه FGR بین آب‌بند مایع و تفکیک‌کننده دوفازی است.

به دلیل وجود کمپرسور در سامانه FGR، عملکرد و توانایی پاسخ آب‌بند مایع نسبت به خلأ ایجاد شده در زمان راه‌اندازی و در حین کار کمپرسور، بسیار مدنظر قرار می‌گیرد؛ لذا میزان مایع موجود در مخزن آن به گونه‌ای تغییر می‌کند تا در صورت عملکرد کمپرسور، فشار سامانه فلرینگ همچنان مثبت باقی بماند و مانع مکیدن هوا از آتشخان فلر به داخل سامانه شود؛ زیرا در صورت ورود هوا، اکسیژن وارد خط لوله اصلی فلر می‌شود و با توجه به ترکیبات موجود در گاز که قابلیت انفجار در حضور اکسیژن را دارند، زمینه انفجار فراهم می‌شود [14].

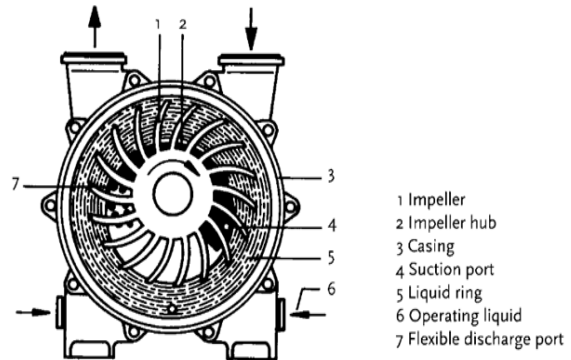
جریان گازهای خروجی از تفکیک‌کننده دوفازی، در حالت عملیات نرمال پالایشگاه، وارد سامانه FGR می‌شود. همچنین، در صورت ایجاد وضعیت غیرنرمال در پالایشگاه که حجم قابل توجهی از گازها به سمت شبکه فلر ارسال می‌شود، جریان گازها ابتدا وارد آب‌بند مایع شده و سپس به سمت آتشخان فلر هدایت می‌شود. در وضعیت نرمال پالایشگاه، جریان گاز ورودی به سامانه FGR، ابتدا وارد کمپرسور شده و در ادامه، گاز متراکم خروجی از کمپرسور، به سوی جداکننده سه‌فازی هدایت می‌شود. جریان گاز خروجی از جداکننده همان گازهای بازیابی شده است که با توجه به منابع مصرف، به سمت واحد قابل استفاده ارسال می‌شود. جریان مایع هیدروکربنی با توجه به ترکیب درصد آن می‌تواند به عنوان سوخت در پالایشگاه مورد استفاده قرار گیرد و یا به سمت مخازن ذخیره‌سازی میعانات گازی ارسال شود. جریان آب جدا شده پس از سرد شدن در مبدل حرارتی، مجدداً به درون کمپرسور بازگردانده شده و موجب می‌شود که کمپرسور در وضعیت دما ثابت، گازها را فشرده کند. همان‌طور که بیان شد، مهم‌ترین تجهیز سامانه مورد نظر، کمپرسور رینگ مایع است. در ادامه، نحوه عملکرد این کمپرسور را بررسی می‌کنیم.

در حالت عملیات نرمال پالایشگاه<sup>2</sup> انجام شده است. جدول (1) نشان‌دهنده مشخصات جریان گازهای ارسالی به شبکه فلر در حالت نرمال عملیاتی در پالایشگاه مورد نظر است.

جدول (1): مشخصات جریان گازهای ارسالی به شبکه فلر در حالت نرمال عملیاتی [17]

ترکیب اجزا	درصد مولی
H <sub>2</sub> O	1/746
Nitrogen	0/607
Carbon Dioxide	10/549
H <sub>2</sub> S	5/699
Methane	41/867
Ethane	8/346
Propane	5/983
i-Butane	1/812
n-Butane	3/554
i-Pentane	3/500
n-Pentane	3/428
C <sub>6</sub>	3/011
C <sub>7</sub>	3/089
C <sub>8</sub>	3/540
C <sub>9</sub> +	3/377
مجموع	100
دبی جریان (Kg.hr <sup>-1</sup> )	76880
دما (C <sup>0</sup> )	50
فشار (Brag)	7/0
وزن مولکولی (Mw)	40/08
ارزش حرارتی (Kj.Kg <sup>-1</sup> )	44104

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و شبیه‌سازی سامانه FGR توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز فرایندهای شیمیایی اسپن پلاس<sup>3</sup>، با در نظر گرفتن اینکه گازهای بازیابی شده در شبکه سوخت فشار پایین پالایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام شده و مشخصات تجهیزات، موازنه جرم، انرژی و شماتیک فرایند به دست آورده شده است. شکل (2) نشان‌دهنده محیط شبیه‌سازی شده فرایند مورد نظر در نرم‌افزار اسپن پلاس است. انتخاب معادله ترمودینامیکی مناسب برای شبیه‌سازی سامانه مورد نظر، اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا حضور آب، سولفید هیدروژن و انواع گازها، محیط قطبی غیر ایدئال را ایجاد می‌کنند. به منظور انجام محاسبات دقیق از معادله ترمودینامیکی NRTL<sup>4</sup> استفاده شده که برای محیط‌های قطبی در حضور آب و هیدروژن سولفید مناسب است.



شکل (2): مکانیسم عملکرد کمپرسور رینگ مایع [15]

### 3. پالایشگاه گازی نمونه

به منظور انجام شبیه‌سازی، از اطلاعات شبکه فلرینگ یکی از پالایشگاه‌های گازی استفاده شده است. خوراک ورودی پالایشگاه توسط خط لوله از سکوی دریایی به پالایشگاه انتقال داده می‌شود. جریان خوراک پس از ورود به پالایشگاه از واحدهای مختلف فرایندی از قبیل جداسازی گاز و میعانات گازی، شیرین‌سازی گاز، تصفیه اتان و پروپان، بازیابی و جامدسازی گوگرد، بازیابی و تغلیظ گلایکول، فشرده‌سازی و ارسال گاز شیرین به خط لوله سراسری و... عبور می‌کند و در نهایت، محصولاتی از قبیل گاز شیرین، میعانات گازی، اتان به عنوان خوراک پتروشیمی، گوگرد جامد، بوتان و پروپان مایع (LPG)<sup>1</sup> تولید می‌شود.

### 4. شبیه‌سازی سامانه FGR

با انجام شبیه‌سازی فرایندهای مختلف شیمیایی توسط نرم‌افزارهای مهندسی، می‌توان رفتار هر فرایند شیمیایی را در شرایط مختلف عملیاتی مورد بررسی قرار داد. [16]. وضعیت فرایندی شبکه فلر از نظر دما، فشار، مقدار جریان و ترکیب درصد گازهای ارسالی به شبکه فلر، بسیار متغیر است. با انجام شبیه‌سازی فرایند سامانه FGR، امکان پیش‌بینی عملکرد سامانه FGR با تغییر متغیرهای عملیاتی و انجام بهینه‌سازی در طراحی سامانه FGR فراهم می‌شود. به منظور شبیه‌سازی سامانه FGR، ابتدا اطلاعات سناریوهای مختلف فلرینگ پیوسته و غیر پیوسته در پالایشگاه جمع‌آوری شده است تا دامنه تغییرات فشار، مقدار جریان گازهای ارسالی به شبکه فلر، ترکیب درصد گازها مشخص شود. با توجه به اینکه سامانه FGR به منظور بازیابی فلرینگ نرمال پالایشگاه طراحی می‌شود، شبیه‌سازی حالت پایای سامانه FGR

2. Normal Continues Flaring

3. Aspen Plus

4. Non-Random Two-Liquid Equation

1. Liquid Petroleum Gas

جدول (2): اطلاعات جریان‌های سامانه FGR شبیه‌سازی شده با توجه به شماتیک فرایند

Compositio n (mol %)	LP Fuel Gas	H <sub>2</sub> S	Water	Liquid-2	Liquid-3
H <sub>2</sub> O	0/88	0	99/95	0/09	2/50
Nitrogen	0/77	0	ناچیز	ناچیز	0/01
CO <sub>2</sub>	13/29	0	64 ppm	0/8	1/90
H <sub>2</sub> S	4 ppm	100	366 ppm	0/6	1/33
Methane	53/27	0	ناچیز	0/8	1/91
Ethane	10/32	0	ناچیز	1/02	2/14
Propane	7/27	0	ناچیز	1/82	4/08
i-Butane	2/05	0	ناچیز	1/38	2/84
n-Butane	3/88	0	ناچیز	3/56	6/86
i-Pentane	3/07	0	ناچیز	9/12	15/16
n-Pentane	2/79	0	ناچیز	7/94	13/78
Hexane	1/81	0	ناچیز	10/84	21/77
Heptane	0/4	0	ناچیز	32/09	18/67
Octane	0/1	0	ناچیز	19/10	6/17
C9 +	3/17	0	ناچیز	11/64	0/88
Mass (Kg.hr <sup>-1</sup> )	40923	3216	287	6917	5121

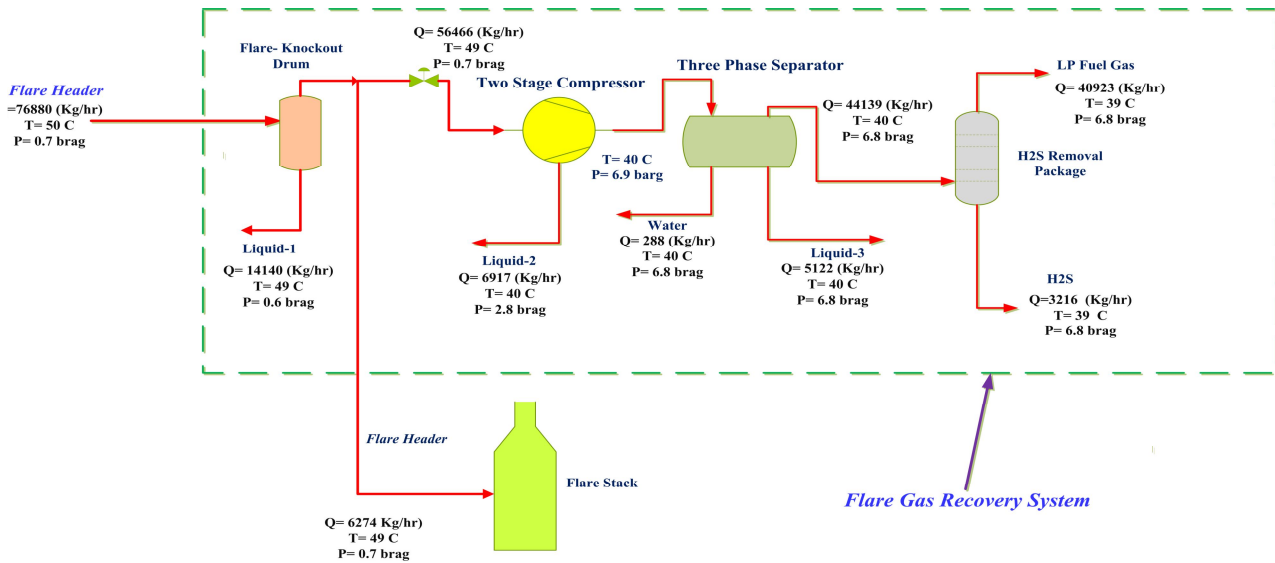
فلرها با اینکه به‌منظور سوزاندن گازها و ایمن نگه داشتن پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی دارای بازده 100 درصد برای تخریب هیدروکربن‌ها نمی‌باشند. در تحقیقاتی که درباره فلرهای منطقه آلبرتا<sup>3</sup> انجام شده است، جانسون و همکاران اعلام نموده‌اند که بازده فلرها کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در طراحی است و در واقع، کمتر از 96 درصد است. با در نظر گرفتن این بازده مشخص است که چهار درصد از کل هیدروکربن‌های ارسالی به شبکه مشعل، بدون سوزانده شدن، مستقیماً به اتمسفر ارسال می‌شوند [19]. همچنین، در تحقیقاتی که چن و همکاران انجام داده‌اند، مشخص شده که اثر گلخانه‌ای حاصل از متان 25 برابر بیشتر از گاز دی‌اکسید کربن است. این نکته درباره مشعل‌هایی که بازده احتراق پایینی دارند، مطرح می‌شود؛ زیرا موجب می‌شوند ترکیبات هیدروکربنی به‌خصوص متان، مستقیماً وارد اتمسفر شود [20]. در این مقاله، به‌منظور بررسی زیست‌محیطی استفاده از سامانه FGR، مقدار انتشار آلاینده‌ها از شبکه فلر، در صورتی که از سامانه FGR استفاده نشود، به‌دست آورده شده است تا بتوان مقایسه‌ای از عملکرد سامانه FGR در جهت کاهش میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌دست آورد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در پروژه‌های اجرایی توسط شرکت شل<sup>1</sup>، مشخص شده است که مقدار جریان قابل بازیابی توسط سامانه FGR، در حدود 90-95 درصد از فلرینگ نرمال پالایشگاه است. به همین منظور، در شبیه‌سازی سامانه FGR نیز 90 درصد از جریان گاز سوزانده شده در حالت عملیات معمول پالایشگاه، به‌عنوان ظرفیت طراحی سامانه FGR در نظر گرفته شده است [18]. در واقع، حتی با نصب سامانه FGR با توجه به ملاحظات ایمنی، آتشخان فلر هیچگاه خاموش نمی‌شود. به‌منظور استفاده از گازهای بازیابی شده به‌عنوان سوخت فشار پایین در پالایشگاه، لازم است که گاز اسیدی سولفید هیدروژن موجود در آن، طی فرایند شیرین‌سازی توسط حلال آمین<sup>2</sup> جداسازی شده و مقدار آن با توجه به مشخصات توربین‌های گازی موجود در پالایشگاه به 4 ppm کاهش داده شود. سوخت فشار پایین مصرفی در پالایشگاه دارای فشار 7 بار و دمای 40 درجه سانتی‌گراد است. به همین منظور، فشار خروجی کمپرسور 7 بار لحاظ شده است. اطلاعات جریان‌های شبیه‌سازی شده که شامل مقدار جریان‌ها و ترکیب درصد اجزاست، در جدول (2) بیان شده است.

## 5. محاسبه مقدار گازهای آلاینده

1. Shell Company  
2. Amine Solution

3. Alberta



شکل (3): نمودار جریان سامانه FGR شبیه سازی شده در نرم افزار اسپن پلاس

$$NHV = 155 + 1425 \times SP.GR \quad (1)$$

$$SP.GR = \frac{MW_{(gas)}}{MW_{(air)}} \quad (2)$$

$$MW(gas) = \sum_{i=1}^n MW_i \times Wt\% = 22.73$$

$$SP.GR = \frac{22.73}{29} = 0.783$$

$$NHV = 155 + (1425 \times 0.783) = 1270.77 \text{ BTU.SCF}^{-1}$$

## 2.5. مقدار انتشار CO و NO<sub>2</sub>

در پالایشگاه گازی مورد نظر، از فلرهای نوع کمک بخار<sup>5</sup> استفاده می شود که از بخار به منظور ایجاد احتراق بدون دود استفاده می شود. با توجه به ارزش حرارتی بالای گازهای سوزانده شده، ضرایب نشر<sup>6</sup> آلاینده ها انتخاب می شود و در ادامه، به کمک ضرایب نشر می توان میزان انتشار آلاینده ها را محاسبه کرد. ضریب نشر آلاینده های NO<sub>x</sub> و CO در جدول (3) ارائه شده است.

به منظور محاسبه مقدار انتشار آلاینده ها، ابتدا ارزش حرارتی

گازهای ارسالی به شبکه فلر محاسبه شده و در ادامه، مقدار انتشار هریک از آلاینده ها براساس مقدار ارزش حرارتی و ضرایب نشر آن ها، محاسبه شده است.

## 1.5. محاسبه ارزش حرارتی سوخت

در ابتدا ارزش حرارتی سوخت (NHV)<sup>1</sup> با توجه به معادله (1) از روش مکلر<sup>2</sup> محاسبه می شود. در این روش، ابتدا وزن مولکولی جریان گاز (MW)<sup>3</sup> محاسبه می شود و در ادامه، وزن مخصوص ویژه جریان گاز (SP.GR)<sup>4</sup> با استفاده از معادله (2) محاسبه می شود [21]. مراحل انجام محاسبات به صورت زیر است:

1. Net Heat Value
2. Meckler
3. Molecular Weight
4. Specific Gravity

5. Steam Assistance  
6. Emission Factor

جدول (3): ضرایب نشر آلاینده‌های CO و NO<sub>x</sub> برای سامانه فلرینگ [15]

نوع فلر	ارزش حرارتی گاز هدررفته	NO <sub>x</sub> (bm.MMBTU <sup>-1</sup> )	CO(bm.MMBTU <sup>-1</sup> )
Steam assist	بالا، بیش از 1000 Btu بر فوت مکعب	0/0485	0/3503
Steam assist	پایین، کمتر از 1000 Btu بر فوت مکعب	0/068	0/3465

### 6. نتیجه‌گیری

شبکه فلر به‌عنوان یکی از منابع مهم تولید آلاینده‌ها در پالایشگاه‌های نفت و گاز و مجتمع‌های پتروشیمی مطرح می‌شود. امروزه به‌کمک استفاده از سامانه‌های بازیابی گازهای ارسالی به فلر امکان کاهش تولید گازهای آلاینده و هدررفت انرژی که بر اثر سوختن گازها در شبکه فلر تولید می‌شوند، فراهم شده است.

در این مقاله، در ابتدا فرایند و عملکرد سامانه FGR و تجهیزات مورد استفاده در آن، به‌خصوص نحوه عملکرد کمپرسور رینگ مایع توضیح داده شده و پارامترهای مهم در طراحی سامانه مورد نظر بیان شده است. در ادامه شبیه‌سازی سامانه FGR در حالت فلرینگ پیوسته پالایشگاه گازی نمونه، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز فرایند اسپین پلاس انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در صورت استفاده از سامانه بازیابی فلر، امکان بازیابی (m<sup>3</sup>.hr<sup>-1</sup>) 5930 گاز طبیعی شیرین شده و (ton.hr<sup>-1</sup>) 12 میعانات گازی فراهم می‌شود. همچنین، با انجام بررسی محیط زیستی مشخص شده است با استفاده از سامانه فوق از تولید 300 تن در سال NO<sub>x</sub>، 2142 تن در سال CO و 43 تن در سال SO<sub>2</sub> جلوگیری می‌شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از شرکت نفت و گاز پارس که برای تهیه این مقاله همکاری نموده‌اند، سپاسگزاری کنند.

$$\left(\frac{0.0485 \text{ lb}_{\text{NO}_x}}{\text{MMBTU}}\right) \left(\frac{1270.77 \text{ BTU}}{\text{SCF}}\right) \left(\frac{1 \text{ MMBTU}}{10^6 \text{ BTU}}\right) \left(\frac{26.76 \times 10^6 \text{ SCF}}{1 \text{ day}}\right) = 1649.4 \text{ lb}_{\text{NO}_x} \cdot \text{day}^{-1}$$

$$\left(\frac{0.0485 \text{ lb}_{\text{NO}_x}}{\text{MMBTU}}\right) \left(\frac{1270.77 \text{ BTU}}{\text{SCF}}\right) \left(\frac{1 \text{ MMBTU}}{10^6 \text{ BTU}}\right) \left(\frac{26.76 \times 10^6 \text{ SCF}}{1 \text{ day}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{2000 \text{ lb}}\right) \left(\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}}\right) = 824.6 \text{ Kg NO}_x \cdot \text{day}^{-1}$$

### 5.3. محاسبه مقدار دی‌اکسید گوگرد

با توجه به اینکه احتراق در آتشخان فلر، دارای راندمان 100 درصد نیست و معمولاً راندمان احتراق 98 درصد لحاظ می‌شود، در صورتی که راندمان تخریب فلر کامل لحاظ شود و با توجه به ترکیب درصد گاز H<sub>2</sub>S در جریان گازهای ارسالی به سامانه فلر، می‌توان مقدار دی‌اکسید گوگرد منتشرشده در اتمسفر را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\left(\frac{0.35 \text{ lb}_{\text{CO}_2}}{\text{MMBTU}}\right) \left(\frac{1270.77 \text{ BTU}}{\text{SCF}}\right) \left(\frac{1 \text{ MMBTU}}{10^6 \text{ BTU}}\right) \left(\frac{26.76 \times 10^6 \text{ SCF}}{1 \text{ day}}\right) = 11912.2 \text{ lb CO}_2 \cdot \text{day}^{-1}$$

$$\left(\frac{0.35 \text{ lb}_{\text{CO}_2}}{\text{MMBTU}}\right) \left(\frac{1270.77 \text{ BTU}}{\text{SCF}}\right) \left(\frac{1 \text{ MMBTU}}{10^6 \text{ BTU}}\right) \left(\frac{26.76 \times 10^6 \text{ SCF}}{1 \text{ day}}\right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{2000 \text{ lb}}\right) \left(\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}}\right) = 5951 \text{ Kg CO}_2 \cdot \text{day}^{-1}$$



- [1] Peterson, J., Cooper, H., Baukal, C., "Minimize Facility Flaring", Journal of Hydrocarbon processing, pp. 111-115, June 2007.
- [2] Cairncross, E., "Report and Technical Protocol for the Monitoring and Regulation of flaring From Oil Refineries in South Africa", UEM Flaring Project Final Report, 2007.
- [3] Zadakbar, O., Vatani, A., Karimpour, K., "Flare Gas Recovery in Oil and Gas Refineries", Oil & Gas Science and Technology, Vol. 63, No. 6, pp. 705-711, 2008.
- [4] Zadakbar, O., Vatani, A., Mokhatab, S., "Gas Refineries Can Benefit From Installing a Flare Gas Recovery System", Journal of Hydrocarbon Processing, No.8, Vol. 89, pp. 51-54, 2010.
- [5] BJORNDALEN, N., MUSTAFIZ, S., RAHMAN, M.H., ISLAM, M.R., "No-flare Design: Converting Waste to Value Addition", Journal of Energy Sources, Vol. 27, pp. 371-380, 2005.
- [6] سحابی، محمود، وطنی، علی، حسینی فراهانی، محمدرضا، «بررسی ضرورت استفاده از گازهای همراه برای تزریق به مخازن نفتی کشور»، پنجمین کنگره ملی انرژی و اقتصاد، تهران، خرداد ماه 1389.
- [7] Energy Information Administration, 2012, Homepage; Available Online: <http://www.eia.doe.gov>.
- [8] Rahimpour, M.R., Asgari, A., "Production of Hydrogen from Purge Gases of Ammonia Plants in a Catalytic Hydrogen-Perm Selective Membrane Reactor", Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 5795-5802, 2009.
- [9] Rahimpour M., Jamshidnejad Z., Jokar S.M., Karimi, G., Ghorbani, A., Mohammadi, A.H., "Comparative Study of Three Different Methods for Flare Gas Recovery of Asaloyeh Gas Refineries", Journal of Natural Gas Science and Engineering, pp. 17-28, 2012.
- [10] Mourad, D., Ghazi, O., Noureddine, B., "Recovery of Flared Gas through Crude Oil Stabilization by a Multi- Staged Separation with Intermediate Feeds: a Case Study", Korean Journal Chemical Engineering, Vol. 26, pp. 1706-1716, 2009.
- [11] سحابی، محمود، وطنی، علی، زاداکبر، امید، حسینی فراهانی، محمدرضا، «مطالعه انواع روش‌های تقلیل گازهای ارسالی به سامانه برج مشعل در پالایشگاه‌ها و ارزیابی فناوری‌های نوین برای بازیابی آن‌ها»، ماهنامه تخصصی علمی- ترویجی فرآیند نو، شماره 26، خرداد و تیر 1389.
- [12] Fisher, P. W., Brennan, D., "Minimize Flaring with Flare Gas Recovery", Journal of Hydrocarbon Processing, pp. 83-85, 2002.
- [13] Raul, R., "Condensation-Based Technologies for Gas Recovery Allowing Zero Flaring", Gas Arabia Summit 5th Annual Meeting, Abu Dhabi, UAE, February 2010.
- [14] Hofmann, A., Tobler, K., "Flare Gas Recovery Cleaner Solution for Oil & Gas Industry", Annual Downstream Conference Refines Your Strategy, Bucharest, 2010.
- [15] Helmut, B., "Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressor and System, Conventional and Hermetic Design", Translate By Christine Anher, ISBN 3-527-31249-8, 2005.
- [16] Anne, S. B., Bommineni, P., "Dynamic Analysis of a CSTR using Aspen Dynamics", International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences, Malaysia, 2012.
- [17] Gas Processing Plant Data of Operating Manual Utilities and off Sites, 2004.
- [18] Allen, G.D., Wey, R.E., Chan, H., "Flare Gas Recovery in Shell Canada Refineries", the Fifth Industrial Energy Technology Conference, Houston, April 1983.
- [19] Johnson, M., Kostiuk, L., Spangelo J., "A Characterization of Solution Gas Flaring in Alberta", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 51, pp. 1167-1177, 2011.

39 شبیه‌سازی و ارزیابی زیست‌محیطی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر

- [20] Chen, Z., Marquis, M., Qin, D., "Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", IPCC, pp. 996, Cambridge, New York, 2007.
- [21] Smith, S., Petty, B., "Basis for Emission Calculation from Flare System", American Flame Research, Committee, Salt Lake city, Utah, September, 2012.