

ارزیابی روش نوین تخمین میزان گاز ارسالی به مشعل و برآورد میزان انتشار ذرات معلق ناشی از مشعل‌سوزی در یک پالایشگاه گاز

مهدی تنه‌زیارتی^{۱*}، نادر بهرامی‌فر^{۱*}، غلام‌رضا باغمیشه^۲ و حبیب‌الله یونسی^۱

۱- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه محیط زیست، سازمان منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

۳- شرکت مهندسی مشاور گسترش فرآیند شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۳

چکیده

ذرات معلق موجود در هوا نظیر کربن سیاه و دوده ناشی از سوختن ناقص کربن یکی از مهمترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌های هوا بوده که می‌توانند عامل بیماری‌های خطرناکی باشند. منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس در جنوب ایران و مجاور پارک ملی دریایی نایبند در استان بوشهر قرار دارد. دوازده پالایشگاه گاز طبیعی و شانزده مجتمع عظیم پتروشیمی در این منطقه ساخته شده است و بیش از ۷۰٪ از کل گاز طبیعی و ۴۵٪ از کل محصولات پتروشیمی کشور را تولید می‌کنند. به دلیل پیچیدگی‌های فرآیندی و احتمالاً عدم دسترسی به تکنولوژی‌های به روز، روزانه بیش از ۱۱۱۰۰ تن گاز توسط ۶۰ مشعل فعال سوخته می‌شود که می‌تواند یکی از دلایل اصلی انتشار کربن سیاه و ذرات معلق باشد. با توجه به اهمیت میزان گاز ارسالی به مشعل در تخمین میزان ذرات منتشره، در این تحقیق بر اساس اطلاعات واقعی فرآیندی و سنجش‌های میدانی، دبی گازهای ارسالی به مشعل تعیین و صحت سنجی گردید. بدین منظور ابتدا تمامی شیرهای کنترل موجود بر سر راه شبکه مشعل شناسایی شده و سپس با استفاده از روابط سیالاتی حاکم بر شیرها، دبی و ترکیب درصد مخلوط گازی ارسالی به مشعل محاسبه شد. سپس براساس مکانیسم احتراق و ترکیبات مختلف موجود در مخلوط گازی ارسالی به مشعل و ضرایب انتشار موجود، میزان انتشار ذرات معلق از مشعل محاسبه شد. صحت مقادیر دبی پیش‌بینی شده توسط مدل با استفاده از دستگاه دبی‌سنج اعتبار سنجی گردید. مربع ضریب همبستگی پیرسون داده‌های حاصل از مقایسه دبی جرمی تجمعی تخمینی توسط مدل با دبی واقعی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج ۰/۹۸۶ بود که نشان از تطابق بالا بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده دارد. بررسی صحت مقادیر ترکیب درصد پیش‌بینی شده توسط مدل، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی، نشان‌دهنده انحراف کمتر از ۱۳٪ بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حقیقی اندازه‌گیری شده است. این نکته بیانگر دقت قابل قبول روش مورد استفاده در مقیاس صنعتی برای تخمین دبی و ترکیب درصد گاز ارسالی به مشعل و در نتیجه تخمین میزان کل ذرات معلق منتشره از مشعل است.

کلمات کلیدی: مشعل، ذرات معلق، آلودگی هوا، پالایشگاه گاز، پتروشیمی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: n.bahramifar@modares.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2018.3371.2547)

مقدمه

منجر به ایجاد بیماری آمفیزم^۲ گردد که ناشی از اثرات شدید مواد سمی بر سلول‌های ریه، مرگ آن‌ها و عدم توان جایگزینی سلول‌های زنده جدید است [۸]. در پالایشگاه‌های نفت و گاز از مشعل‌ها برای سوزاندن ترکیبات آلی موجود در گازهای زائد و ناخواسته در زمان‌های راه‌اندازی، از سرویس خارج کردن، تعمیرات و وقفه‌های فرآیندی استفاده می‌شود [۹]. شکل ۱ شمائی از سامانه مشعل در پالایشگاه گاز را نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود علاوه بر جریان‌های ناشی از کنترل، ایمنی و تخلیه مقطعی که به مشعل ارسال می‌شود، جریان دائمی گاز جارو کننده^۳ و شمعک^۴ را خواهیم داشت. هر نوع اشکال (کنترلی یا فیزیکی) در شیرهایی که تخلیه از آنها به سمت مشعل هدایت می‌شود منجر به افزایش قابل توجه مشعل‌سوزی خواهد شد. سامانه مشعل یک سیستم احتراقی در هوای آزاد برای جلوگیری از ورود گازهای قابل انفجار و سمی به اتمسفر و تبدیل آن‌ها به دی‌اکسیدکربن و آب است. به دلیل احتراق گازهای زائد، دامنه گسترده‌ای از مواد شیمیایی حاصل از احتراق مانند دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، دی‌اکسیدنیتروژن و بخار آب و همچنین مواد شیمیایی ناشی از احتراق ناقص مانند ذرات معلق، دوده، هیدروکربن‌های آروماتیک، آلیفاتیک، سولفید هیدروژن، منواکسید کربن و ... به محیط منتشر می‌شوند.

ذرات معلق در هوا به آن دسته از مواد پراکنده جامد یا مایع اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها از قطر یک ملکول ($0/0002 \mu$) بزرگ‌تر و از 500μ کوچک‌تر باشند [۱]. ذرات را می‌توان برحسب نحوه تشکیل به صورت غبار، دود، دود غلیظ، دود حاصل از خاکستر، غبار مه آلود و یا اسپری طبقه‌بندی کرد [۲]. براساس تعریف سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO) کربن سیاه و دوده ناشی از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی در دسته ذرات معلق قرار می‌گیرند [۳]. در اثر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، گاز و زغال سنگ، آئروسول‌هایی از ذرات خیلی ریز کربن با اندازه $0/5$ تا 1μ تشکیل می‌شود که به آن‌ها دوده اطلاق می‌گردد [۴]. ذرات معلق کربن‌دار به‌ویژه ترکیبات آروماتیک حلقوی به دلیل برخورداری از خاصیت سمی برای سلامتی انسان بسیار خطرآفرین بوده و ممکن است سرطان‌زا باشند [۵]. براساس تخمین سازمان بهداشت جهانی سالانه $500/000$ نفر بر اثر مواجهه با ذرات معلق موجود در هوای آزاد دچار مرگ زودرس می‌شوند [۶]. ذرات کوچک‌تر از 10μ به قسمت‌های تحتانی ریه وارد می‌شوند و ذرات کوچک‌تر از $2/5 \mu$ عمدتاً در کیسه‌های هوایی ریه رسوب می‌کنند یا از جدار ریه عبور کرده و وارد جریان خون می‌شوند [۷]. مواجه طولانی با ذرات حامل مواد سمی می‌تواند

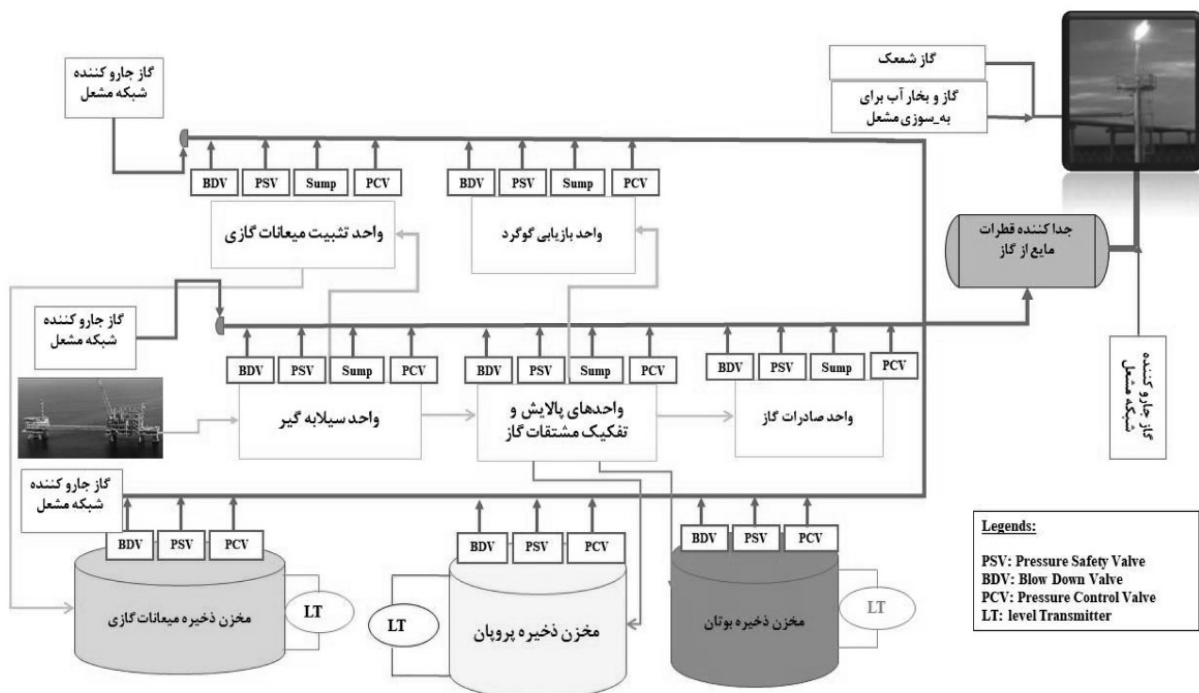


شکل ۱ نمایی از مشعل‌سوزی و کربن نسوخته منتشره از آن

1. World Health Organization
2. Emphysema
3. Sweeping Gas
4. Pilot

ضرورت وجود زیرساختی به منظور پایش و مدیریت مشعل‌سوزی و تعیین میزان آلاینده‌های منتشره از آن الزامی است [۱۲]. براساس نتایج تحقیقات بین المللی سالانه ۲۶۰ هزار تن ذرات معلق آلی (کربن سیاه) ناشی از سوختن گاز در مشعل‌ها در سطح دنیا منتشر می‌گردد [۱۶]. در کشور روسیه به دلیل فعالیت‌های پالایشی گسترده تاثیر مشعل‌سوزی بر تولید ذرات معلق آلی (کربن سیاه) بیشتر گزارش شده است به طوری که از مجموع کل ذرات معلق آلی ناشی از فعالیت انسانی، مشعل‌سوزی سهم ۳۶/۲٪ را به خود اختصاص داده است [۱۷]. با توجه به اثرات زیان‌بار بهداشتی ذرات معلق آلی بر محیط زیست و سلامت ساکنین هم‌جوار این صنایع، ضرورت اجرای برنامه‌های کنترلی جهت کاهش و مدیریت گازهای سوخته شده الزامی است. اندازه‌گیری میزان گازهای منتشره از مشعل با روش‌های مرسوم اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی از دودکش امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل تخمین و برآورد دقیق میزان آلاینده‌های تولیدی ناشی از مشعل امری دشوار است [۱۸].

شکل ۲ نمایشی از مشعل‌سوزی و آلاینده‌های منتشره از سامانه مشعل را نمایش می‌دهد. مشعل‌سوزی سالانه در سطح دنیا بیش از ۱۳۰ میلیارد متر مکعب گاز است [۱۰]. ایران دارای دومین منابع گاز طبیعی دنیا و سومین کشور سوزاننده گازهای زائد در مشعل است. براساس تخمین بانک جهانی در ایران حدود ۱۷/۷ میلیارد متر مکعب گاز در مشعل‌ها سوزانده شده است [۱۱]. مطالعات انجام شده تاثیر مشعل‌سوزی در افزایش غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از 2.5μ در هوای محیط اطراف مشعل‌ها را اثبات نموده است [۱۲ و ۱۳]. تعیین و یا تأیید اثر واقعی مشعل‌سوزی بر محیط پیرامونی به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مستقیم اندازه‌گیری شده از خروجی مشعل، دشوار است [۱۴]. اکثر صنایع نفت و گاز، مشعل‌سوزی‌های غیرنرمال خود را بسیار کمتر از میزان واقعی گزارش می‌کنند و یا بعضاً گزارش نمی‌کنند [۱۵]. به دلیل پیچیدگی ذاتی فرآیندهای تصفیه نفت و گاز انتظار می‌رود که مشعل‌سوزی غیر نرمال رخ دهد به همین دلیل



شکل ۲ ساختار شماتیک سامانه مشعل در پالایشگاه گاز

استفاده از داده‌های واقعی مبتنی بر شرایط عملیاتی واحد صنعتی، عدم صحت سنجی داده‌های خروجی مدل و عدم اندازه‌گیری ترکیب درصد گاز ارسالی به شبکه مشعل، مطالعات انجام شده گذشته دارای محدودیت‌هایی هستند. به منظور فائق آمدن بر محدودیت‌های فنی و تکنولوژیکی، در این پژوهش با استفاده از داده‌های عملیاتی دما و فشار بالا دست و پایین دست شیر کنترلی و اندازه‌گیری ترکیب درصد کلیه مسیرهای منتهی به شبکه مشعل، با استفاده از مدل‌سازی پایا و اسکن پیوسته ۹۷ شیر کنترلی در بازه‌های زمانی ۱۰ min یک بار، میزان و ترکیب درصد و منشاء ارسال کننده گاز به شبکه مشعل شبیه‌سازی شده است. ترکیب درصد و دبی تخمینی توسط مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی اعتبارسنجی شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس در مجاورت شهرستان عسلویه با جمعیتی نزدیک به ۷۴,۰۰۰ نفر، شرق استان بوشهر و در ۳۰۰ km شهر بوشهر قرار گرفته است. در این منطقه حدود ۷۰٪ گاز کشور توسط ۲۴ فاز پالایش گاز (دوازده پالایشگاه) تولید می‌شود و ده‌ها مجتمع بزرگ پتروشیمی و دیگر صنایع پایین‌دستی در نوار باریکی به عرض متوسط ۵ km و طول حدود ۳۰ km در منطقه‌ای که از شمال به سلسله جبال زاگرس و از جنوب به خلیج فارس محصور است مستقر هستند. این توپوگرافی خاص شرایط اکولوژیکی شکننده‌ای را برای ذخیرگاه ژنتیکی پارک ملی دریایی نابیند به وجود آورده است چرا که به دلیل نوع فعالیت این صنایع به صورت پیوسته ۶۰ مشعل فروزان مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌های هوا را به اتمسفر منطقه تخلیه می‌نمایند.

تلاش‌های محدودی جهت مشخص نمودن آلاینده‌های منتشره از مشعل به روش قرائت مستقیم در سطح دنیا انجام شده است. بنابراین داده‌های قرائت مستقیم موجود بسیار کم و محدود به نمونه‌های خاصی هستند [۱۹]. انجمن تولیدکنندگان نفت کانادا^۱، موسسه نفت آمریکا^۲ و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، روشی برای محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از صنعت نفت و گاز تدوین کرده‌اند که پایه محاسبات آن اطلاع از میزان جریان گاز، ترکیب درصد گاز و راندمان احتراق مشعل است [۲۰-۲۲]. دقت اندازه‌گیری در این روش منوط به شرایط کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری تحت شرایط مختلف اعم از نوع سیال، شرایط فشار و دما، دبی گاز عبوری و بازه ترکیب درصد گاز مربوطه است. یکی از مشکلات اساسی استفاده از این روش دقت پایین ابزارهای اندازه‌گیری میزان جریان^۳ و ترکیب گاز برای بازه‌های متفاوت جریان و ترکیب درصد است، به طوری که کالیبراسیون این ابزارها در محدوده خاصی صورت می‌پذیرد و صحت نتایج حاصل از آن‌ها در همان محدوده کالیبراسیون مورد اعتماد است. حال آن‌که با توجه به ماهیت ناپایدار شبکه مشعل تغییرات شدید میزان جریان از حداقل جریان در شرایط نرمال به حداکثر جریان در شرایط اضطراری و همچنین تغییرات بسیار متفاوت در ترکیب گاز ارسالی با توجه به واحد ارسال کننده، دستیابی به نتایج با دقت قابل قبول تقریباً غیر ممکن است [۱۸]. جایگزین استفاده از تجهیزات پایش برخط، روش‌های محاسباتی چون موازنه جرم مواد و انرژی و در سال‌های اخیر شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای توسعه داده شد. اولین بار خزائی و همکاران روش رایانه‌ای مبتنی بر روابط شیرهای کنترلی منتهی به شبکه مشعل براساس داده‌های طراحی برای تخمین دبی گاز ارسالی به مشعل را پیشنهاد دادند [۲۳]. ابوکا و همکاران با استفاده از داده‌های عملیاتی روش مذکور را ارتقاء بخشیدند [۲۴]. به دلیل عدم

1. Canadian Association of Petroleum Producers
2. American Petroleum Institute
3. Flow Meter

تعیین دبی گاز ارسالی به مشعل

برای تعیین دبی جریان گاز ارسالی از ۹۷ شیر کنترلی منتهی به شبکه مشعل به روش مهندسی معکوس و براساس استاندارد ANSI/ISA-۷۵.۰۱.۰۱ مؤسسه ملی استاندارد امریکا^۱ و راهنمای شیرکنترل^۲، روابط ۱ الی ۴، استفاده شده است. استفاده از معادلات متناسب با شرایط فرآیندی و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر معادلات جریان گام مهمی است که به میزان تجربه در حل مسائل تعیین اندازه شیرها وابسته است [۲۵ و ۲۶].

$$C = \frac{q}{N_7 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{G_g T_1 Z}{x}} \quad (1)$$

$$x = \frac{DP}{P_1} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2)$$

$$N_7 = \begin{cases} 3/94 & T_s = 0^\circ C \\ 4/17 & T_s = 15^\circ C \end{cases} \quad (3)$$

$$Y = 1 - \frac{x}{3 F_g x_T} \quad (4)$$

در این روابط C ضریب جریان، q [m³/h] دبی حجمی جریان، P_1 و P_2 [kPa] فشارهای بالا دست و پایین دست شیر کنترل، T_1 [K] دمای بالا دست، G_g وزن مخصوص گاز، F_p فاکتور خطوط لوله، Y فاکتور انبساط، x نسبت اختلاف فشار (ΔP) به فشار مطلق ورودی (P_1)، N_7 عدد ثابت^۳، F_p عامل نسبت گرمای ویژه و x_T فاکتور نسبت اختلاف فشار شیر کنترل بدون اتصالات در جریان اختناقی^۴ است. لازم به ذکر است که اگر P_1 و q به ترتیب در واحدهایی غیر از kPa و K بیان شوند میزان N_7 در معادله ۳ باید بر همان اساس اصلاح شود [۲۵ و ۲۶]. در پالایشگاه مورد مطالعه براساس پارامترهای استخراج شده از برگه مشخصات فنی شیرهای کنترل^۵، ۹۷ شیر کنترل منتهی به شبکه مشعل شناسایی شد و منحنی تغییرات ضریب اندازه (CV)^۶ آن‌ها براساس میزان باز بودن آن استخراج گردید. درصد باز بودن شیرها از روی شناسه هر شیر در سیستم کنترل غیر متمرکز پالایشگاه (DCS)^۷ به صورت پیوسته به مدت دو سال هر ۱۰ min یک بار به صورت اتوماتیک ثبت گردید. با داشتن منحنی تغییرات دبی براساس

میزان باز بودن شیر و دیگر اطلاعات مورد نیاز شامل دما و فشار پشت شیر کنترل و نقطه تنظیم^۸ شیر کنترل از سیستم کنترل غیرمتمرکز پالایشگاه استخراج و در محاسبات معادلات جریان شیر مورد استفاده قرار گرفت. دبی گاز عبوری از هر شیر و دبی مجموع گاز تخلیه شده به شبکه مشعل برآورد گردید. اعتبارسنجی داده‌های تخمینی مدل مورد استفاده برای جریان گاز با استفاده از جریان‌سنج موجود در مسیر منتخب صورت پذیرفت.

تعیین ترکیب درصد گاز ارسالی به مشعل

از کلیه ۹۷ مسیر شناسایی شده ارسال کننده گاز به شبکه مشعل در چهار فصل نمونه‌برداری براساس روش‌های استاندارد ASTM D1145, D1265 صورت پذیرفت [۲۷ و ۲۸]. نمونه‌ها توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل 7890A GC System ساخت شرکت Agilent Technologies براساس استانداردهای ASTM D1945-03 و GPA Standard 2261-99 آنالیز شد [۲۹-۳۱]. برای اعتبارسنجی داده‌های خروجی مدل مورد استفاده در تخمین مناسب ترکیب درصد گاز نهایی مشعل نیز در چند مرحله نمونه‌برداری و آنالیز با روش استاندارد اشاره شده از گاز شبکه مشعل انجام پذیرفت و با نتایج خروجی مدل مقایسه گردید. دستگاه کروماتوگرافی گازی با قابلیت اندازه‌گیری ترکیبات گاز طبیعی، هلیوم و هیدروژن مجهز به ۶ ستون پر شده و ۴ شیر کنترلی با قابلیت تغییر مسیر جریان گاز ورودی و خروجی ستون (جریان معکوس)^۹ برای جداسازی ترکیبات C_{۶+} و ۲ شناساگر هدایت حرارتی (TCD)^{۱۰} مورد استفاده قرار گرفت.

1. American National Standards Institute

2. Control Valve Handbook

3. Numerical Constant

4. Choked Flow

5. Instrument Specification Sheet

6. Valve Sizing Coefficient

7. Decentralized Control System

8. Set Point

9. Back-Flash

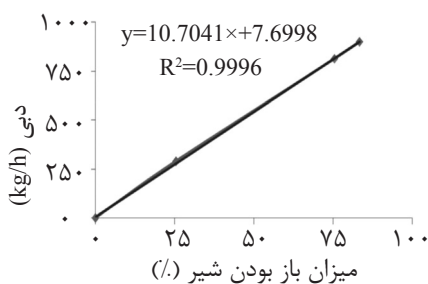
10. Thermal Conductivity Detector

مشعل با دود کم ۰/۰۲۷، مشعل با دود متوسط ۰/۱۲ و در مشعل با دود زیاد ۰/۱۹ پوند ذرات معلق به محیط منتشر می‌گردد [۲۱].

نتایج

تعیین دبی گاز ارسالی به مشعل

در شکل ۳ تغییرات دبی عبوری برحسب درصد باز بودن شیر منتهی به شبکه مشعل در واحد شیرین‌سازی گاز نشان داده شده است. با توجه به خطی بودن نسبت دبی گاز عبوری با درصد باز بودن شیر و براساس معادله خط منتج از نمودار شکل ۳ براساس میزان باز بودن لحظه‌ای شیر (اطلاعات ثبت شده با فاصله زمانی ۱۰ min)، دبی جرمی گاز عبوری از آن محاسبه گردید. اکثر شیرهای منتهی به شبکه مشعل در پالایشگاه مورد مطالعه از نوع خطی بودند و به همین روش دبی گاز خروجی از ۹۷ شیر کنترلی شناسایی شده منتهی به شبکه مشعل و دبی گاز نهایی ارسالی به مشعل در هر ۱۰ min یک‌بار برآورد گردید. زیر سیستم ۱ (شکل ۴) شماتیک بخشی از واحد بازیافت گوگرد است. 0284FI یک جریان‌سنج است و دبی گاز اسیدی تغلیظ شده خروجی از بالای Regeneration Reflux Drum را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۳ تغییرات دبی عبوری از شیر 0081PV101 برحسب درصد باز بودن [۲۶]

برنامه دمایی برای جداسازی بهتر ترکیبات سنگین با دمای اولیه 90°C به مدت ۶ min و افزایش دما با نرخ 10°C در دقیقه جهت رسیدن به دمای ثابت 120°C به مدت ۱۶ min تعریف گردید. لوپ نمونه‌برداری نصب شده بر روی دستگاه ۵۰۰ میکرولیتر بوده که به شیر تزریق مستقیم گاز^۱ از ظرف مخصوص نمونه‌برداری گاز متصل بود. براساس روش استاندارد مورد استفاده، دستگاه GC توسط گازهای مرجع ساخت شرکت Air Liquide's Scott TM با ترکیب درصدهای مشابه با گاز طبیعی، گاز ترش، گاز اسیدی، تأیید شده و نزدیک به شرایط نمونه به روش استاندارد خارجی^۲ کالیبره و منحنی کالیبراسیون برای هر ترکیب جداگانه رسم گردید.

برآورد میزان انتشار ذرات معلق

پس از برآورد حجم و ترکیب درصد گاز ارسالی به مشعل، با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) میزان انتشار کل ذرات معلق از سامانه مشعل برآورد گردید [۲۱].

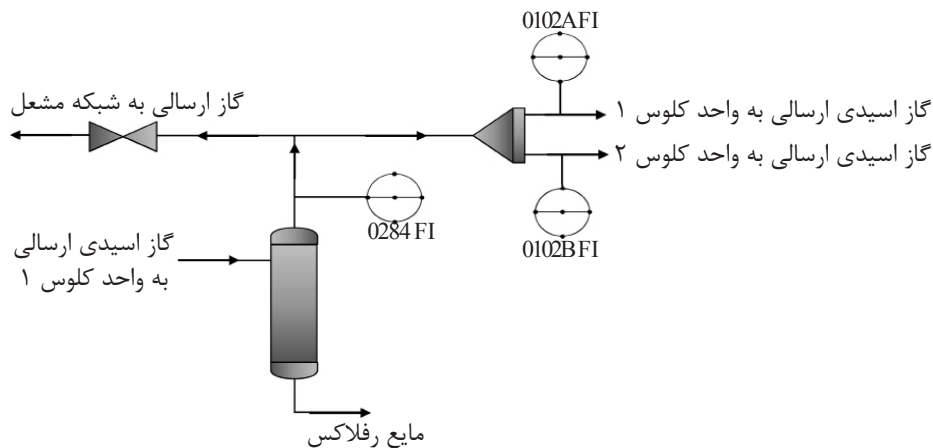
$$E_{PM} = [Q_{Std,n} \times LHV_{Mixture} \times EF_{PM}] / \rho^{id} \quad (5)$$

که در این رابطه E_{PM} میزان انتشار ذرات معلق براساس وزن در دوره زمانی مورد نظر (Kg/m^3) ، $Q_{Std,n}$ حجم گاز ارسالی به شبکه مشعل در دوره اندازه‌گیری براساس فوت مکعب در شرایط استاندارد (scf)^۳، $LHV_{Mixture}$ ارزش حرارتی گاز مشعل شده در دوره اندازه‌گیری با واحد MMBtu/scf ، EF_{PM} فاکتور انتشار ذرات معلق در مشعل با واحد (Kg/m^3) ، ρ^{id} دانسیته گاز ایده‌ال برحسب جرم در واحد حجم می‌باشد. لازم به ذکر است که دانسیته گاز ایده‌ال از معادله ۶ به دست می‌آید.

$$\rho^{id} = (P/RT) \sum_{j=1}^n (x_j M_j) = MP/RT \quad (6)$$

که در آن P فشار مطلق (Psia)، R ثابت گاز، T دمای مطلق، $(8.31448 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$ ، x درصد مولی، M جرم مولی و Z اجزای ترکیب است. فاکتور انتشار ذرات معلق در مشعل در شرایط مختلف عملیاتی متفاوت است به طوری که به ازای آزاد شدن هر یک میلیون بی‌تی‌یو انرژی در مشعل بدون دود صفر،

1. Gas Injection Port
2. External Standard
3. Standard Cubic Feet
4. Million British Thermal Unit



شکل ۴ شماتیک اعتبارسنجی دبی تخمینی گاز ارسالی به مشعل

برای تعیین ترکیب درصد گاز ارسالی به مشعل، از کلیه منابع شناسایی شده نمونه برداری و پس از آنالیز، نتایج در بانک اطلاعات مدل مورد استفاده ثبت گردیدند. با نمونه برداری و آنالیز گاز نهایی مشعل و مقایسه نتایج آن با داده‌های تخمین زده شده توسط مدل، اعتبارسنجی و دقت مدل در برآورد ترکیب درصد گاز مشعل انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. اعداد ارائه شده در این جدول متوسط ۴ دوره نمونه برداری و آنالیز گازهای ارسالی به مشعل است. صحت نتایج محاسباتی برای ترکیباتی که بیش از ۹۸٪ غلظت در نمونه گاز مشعل را دارند کمتر از $\pm 13\%$ است. برای ترکیباتی که مجموع غلظت آنها سهمی کمتر از ۲٪ در ترکیب درصد گاز مشعل دارند حدود ۳۲/۵٪ است ولی به دلیل پایین بودن درصد آنها در گاز مشعل، خطای تخمین آنها در خطای تخمین میزان ذرات معلق وزن کمتری خواهد داشت. براساس برآورد مدل میزان سهم سالانه مشعل سوزی هر واحد عملیاتی و میزان و سهم انتشار ذرات معلق ناشی از هر واحد عملیاتی در جدول ۳ گزارش شده است. بر این اساس واحد تثبیت میعانات گازی با سهم مشعل سوزی کمتر نسبت به واحد تصفیه گاز مسبب انتشار میزان بیشتری ذرات معلق بوده که دلیل آن وجود ترکیبات سنگین تر هیدروکربنی در ترکیب درصد گاز واحد تثبیت میعانات گازی است.

جریان سنج‌های A/B0102FI دبی گاز ارسالی به فرآیند کلو ۱ را اندازه‌گیری می‌کنند. مشخصات جریان سنج‌های مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده است کلیه جریان سنج‌ها مورد استفاده براساس دستورالعمل استاندارد کالیبره و آزمایش شدند. با استفاده از رابطه ۷ میزان گاز ارسالی به مشعل در شرایط وضعیت پایدار^۲ محاسبه شد.

$$F_{\text{Flare}} = F_1 - (F_2 + F_3) \quad (7)$$

که در آن F_{Flare} دبی تخمینی گاز ارسالی به مشعل براساس روابط تعیین اندازه شیرهای کنترلی برای شیرکنترل 0216PV و F_1 ، F_2 و F_3 به ترتیب دبی گاز اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج‌های اعتبارسنجی صحت دبی تخمینی توسط مدل، به مدت ۶۰ روز با فاصله زمانی ۱۰ min، نتایج محاسباتی دبی عبوری از شیرکنترل (گاز ارسالی به شبکه مشعل) با ۸۵۶۷ داده منتج از رابطه ۸ مقایسه گردید که در شکل ۵ ارائه شده است. مربع ضریب همبستگی پیرسون داده‌های حاصل از مقایسه دبی تجمعی تخمینی توسط مدل با دبی واقعی اندازه‌گیری شده توسط دبی سنج ۰/۹۸۶ بود که نشان از تطابق بسیار خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده دارد.

تعیین ترکیب درصد گاز ارسالی به مشعل

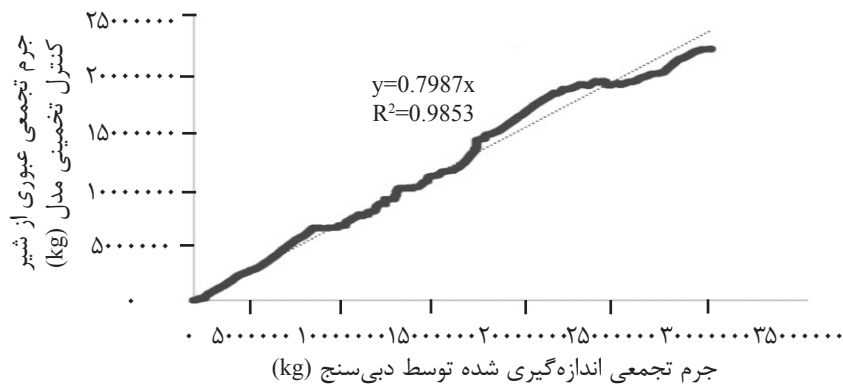
پس از حصول اطمینان از صحت و دقت روش آنالیز

1. Claus Process
2. Steady State Conditions

جدول ۱ مشخصات جریان سنج‌های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی دبی تخمینی گاز ارسالی به مشعل توسط مدل

دقت: % *	فشار عملیاتی (psi)	دمای فرآیندی (°C)	سازوکار جریان سنجی	شرکت سازنده
±۱~±۲	۶۰۰۰	۵۴۰	لوله ونتوری	Samil industry co.

* دقت نسب به مقیاس کامل (full scale)



شکل ۵ مقایسه جرم واقعی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج با جرم عبوری تجمعی^۱ تخمینی توسط مدل برای تعداد ۸۵۶۷ داده میدانی

جدول ۲ اعتبارسنجی ترکیب درصد تخمینی گاز ارسالی به مشعل توسط مدل با نمونه‌برداری واقعی

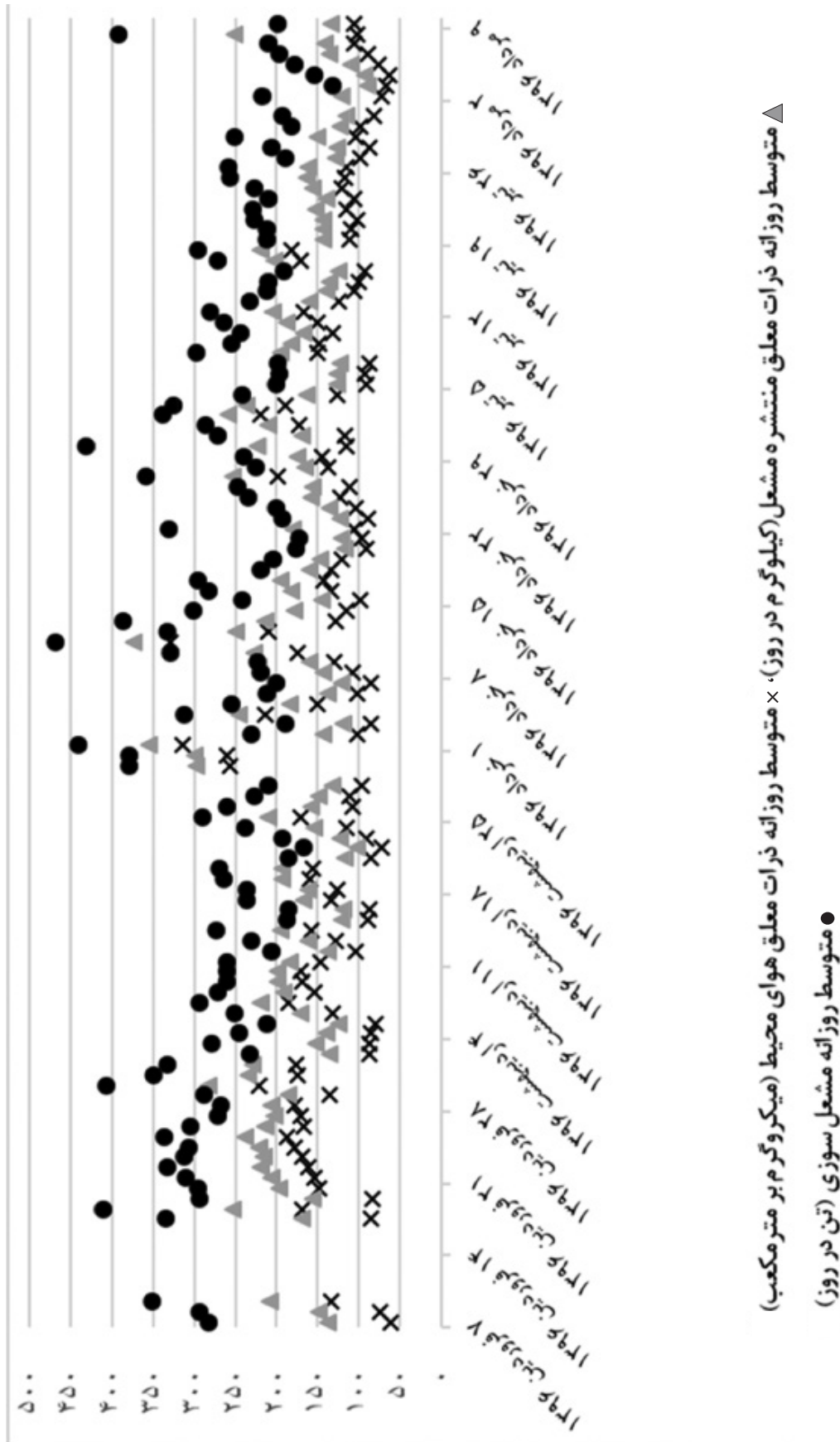
میزان انحراف از حالت واقعی (%)	درصد مولی		ترکیبات
	اندازه‌گیری شده	تخمین زده شده	
۹/۵۳	۲۶/۳۰	۳۱/۸۴	دی اکسید کربن
-۶/۹۹	۵/۶۶	۴/۹۲	دی اکسید گوگرد
۲/۹۳	۴۷/۹۷	۵۰/۸۷	متان
-۳/۴۳	۵/۲۷	۴/۹۲	اتان
۱۲/۷۴	۲/۹۸	۳/۸۵	پروپان
-۶/۱۴	۱/۲۱	۱/۰۷	ایزو بوتان
-۲۲/۱۵	۱/۹۳	۱/۲۳	نرمال بوتان
۲/۹۴	۰/۳۳	۰/۳۵	ایزوپنتان
۱۳/۷۹	۰/۲۵	۰/۳۳	نرمال پنتان
۳۲/۵۳	۰/۲۸	۰/۵۵	هگزان و سنگین‌تر

جدول ۳ میزان و سهم سالانه مشعل‌سوزی و ذرات معلق منتشره ناشی از هر واحد عملیاتی

نام واحد فرآیندی	میزان مشعل‌سوزی (تن/سال)	سهم مشعل‌سوزی %	میزان ذرات معلق (تن/سال)	سهم انتشار ذرات معلق %
واحد تصفیه گاز	۱۵۶۶۸۹	۲۵/۰۵	۴۸/۸۹	۱۷/۸۰
واحد تثبیت میعانات گازی	۱۲۰۱۴۶	۱۹/۲۱	۶۳/۶۶	۲۳/۱۷
واحد بازیافت اتان	۶۴۳۰۵	۱۰/۲۸	۳۴/۹۱	۱۲/۷۱
واحد بازیافت گوگرد	۶۳۱۳۰	۱۰/۰۹	۱۱/۹۶	۴/۳۵
واحد تجهیزات دریافت گاز	۵۷۷۵۱	۹/۲۳	۳۰/۷۷	۱۱/۲۰
واحد پشتیبان تثبیت میعانات گازی	۴۰۳۶۰	۶/۴۵	۲۱/۵۳	۷/۸۴
واحد تصفیه و نمزدایی اتان	۳۷۱۹۹	۵/۹۵	۱۵/۷۵	۵/۷۳
واحد جداسازی گاز مایع	۳۰۹۸۳	۴/۹۵	۱۶/۶۵	۶/۰۶
واحد نمزدایی و حذف جیوه	۲۳۸۷۲	۳/۸۲	۱۲/۹۶	۴/۷۲
جمع	۵۹۴۴۳۵		۲۵۷/۰۸	

مقایسه نتایج محاسبات و اعتبارسنجی ترکیب درصد و دبی گاز مشعل شده با اندازه‌گیری‌ها میدانی نشان می‌دهد روش مورد استفاده، دقت و صحت لازم را برای تخمین دبی و ترکیب درصد گاز مشعل شده، که مبنای محاسبه میزان انتشار ذرات معلق ناشی از مشعل‌سوزی است، را دارد. در شکل ۶، صرفاً جهت تأیید اثر ذرات معلق ناشی از مشعل‌سوزی بر غلظت ذرات معلق محیطی، نتایج مقادیر غلظت متوسط ذرات معلق با قطر کمتر از 10μ (در یکی از ایستگاه‌ها پایش دائمی آلودگی هوا در پایین دست مشعل‌های مورد مطالعه) به طور کیفی با مقادیر متوسط روزانه گازهای سوزانده شده و متوسط ذرات معلق ناشی از احتراق این گازها در مشعل ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود روند تغییرات مقادیر ذرات معلق تخمین زده شده (براساس میزان مشعل‌سوزی) هماهنگی معناداری با غلظت محیطی ذرات معلق ثبت شده در ایستگاه پایش محیطی دارد.

براساس متوسط‌گیری از نتایج ۵۲۸ روز مدل‌سازی، متوسط روزانه کل مشعل‌سوزی $1628/59$ تن با انحراف معیار $44332/95$ است این میزان مشعل‌سوزی به طور متوسط روزانه $704/33$ kg ذرات معلق آلی یا کربن سیاه را با انحراف استاندارد $17/9$ منتشر می‌کند. بالا بودن انحراف معیار مشعل‌سوزی و به تبع آن ذرات معلق منتشره از آن به دلیل تغییرات متناوب میزان دبی گاز ارسالی به مشعل و ترکیب درصد متغیر آن است. با این تغییرات زیاد دبی گاز و ترکیب درصد آن امکان استفاده از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری دبی پیچیده بوده و از لحاظ عملیاتی غیرممکن است. در صورتی که با روش تشریح شده به راحتی می‌توان دبی گاز نهایی ارسال شده به مشعل را با تقریب مناسب در هر دوره زمانی برآورد کرد و در نهایت میزان ذرات معلق منتشر شده از مشعل را با دقت خوبی تخمین زد.



نتیجه‌گیری

کل مشعل‌سوزی پالایشگاه گاز مورد مطالعه در این پژوهش روزانه ۱۶۲۸/۵۹ تن با انحراف معیار ۴۴۳۲/۹۵ است. این میزان مشعل‌سوزی به‌طور متوسط روزانه ۷۰۴/۳۳ kg ذرات معلق با پایه کربن را با انحراف استاندارد ۱۷/۹ منتشر می‌کند. بالا بودن انحراف معیار مشعل‌سوزی و ذرات معلق منتشره از آن به دلیل تغییرات متناوب میزان دبی گاز ارسالی به مشعل و ترکیب درصد متغیر آن است. نتایج تحقیق، تاثیرگذاری متفاوت واحد فرآیندی بر میزان انتشار ذرات معلق را پررنگ نموده است به طوری که واحد تصفیه گاز با نزدیک به ۱۵۷ هزار تن مشعل‌سوزی در طول سال و برخورداری از سهم ۲۵٪ از کل مجموع مشعل‌سوزی، ۴۹۰۰۰ kg ذرات معلق در سال معادل ۱۸٪ از کل ذرات معلق را منتشر نموده است در حالی که واحد تثبیت میعانات گازی با ۱۲۰ هزار تن مشعل‌سوزی در طول سال و برخورداری از سهم ۱۹٪ از کل مجموع مشعل‌سوزی، ۶۳۰۰۰ kg ذرات معلق در سال معادل ۲۳٪ از کل ذرات معلق را منتشر نموده است. با توجه به مشکل حاد ذرات معلق محیطی در مناطق جنوبی کشور و استقرار پالایشگاه‌های نفت و گاز در این مناطق، ضرورت پایش و مدیریت مشعل‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. استفاده از روش تشریح شده بدون نیاز به نصب تجهیزات جدید و پیشرفته اندازه‌گیری و هزینه‌های جدید قادر خواهد بود میزان ذرات معلق منتشره از مشعل را با تقریب مناسبی برآورد نماید و با تعیین منابع و سهم هر واحد در ارسال گاز به شبکه مشعل، تصمیم‌گیری درباره بازیابی گازهای مشعل به منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها خصوصاً ذرات معلق را امکان‌پذیر می‌نماید.

تشکر و قدرانی

از شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی به‌عنوان حامی مالی پروژه پژوهشی، نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

علائم و نشانه‌ها

ANSI: موسسه ملی استاندارد امریکا
C: ضریب جریان
CV: ضریب تعیین اندازه شیر
DCS: سیستم کنترل متمرکز
EF_{PM}: فاکتور انتشار ذرات معلق (ton)
E_{PM}: جرم انتشار متان (ton)
F₁: نرخ جریان اندازه‌گیری شده توسط شیر (FI0284)
F₂: نرخ جریان اندازه‌گیری شده توسط شیر (FI0102A)
F₃: نرخ جریان اندازه‌گیری شده توسط شیر (FI0102B)
FFlare: نرخ فلرینگ تخمین زده شده براساس روابط تعیین اندازه شیر کنترلی برای شیر (FI0102A)
F_p: فاکتور هندسی لوله
F_γ: فاکتور نسبت حرارت ویژه
GC: کروماتوگرافی گازی
G_g: وزن مخصوص گاز
LHV_{Mixture}: پایین‌ترین ارزش حرارتی مخلوط
M: وزن مولکولی
MMBtu: میلیون واحد حرارتی بریتانیایی
N_γ: ضریب ثابت
P: فشار (kPa)
P₁: فشار بالا / ورودی مطلق (kPa)
P₂: فشار پایین (kPa)
PCV: شیرهای کنترل فشار
q: جریان حجمی (m³/h)
scf: استاندارد فوت مکعب
Sep: جداسازی
SPCC: مربع ضریب همبستگی پیرسون
T₁: دمای بالادست (K)
TCD: آشکارساز هدایت حرارتی

x : نسبت اختلاف فشار به فشار مطلق ورودی
 x_T : فاکتور نسبت دیفرانسیل فشار یک شیر کنترل بدون اتصالات متصل در جریان متوقف شده
 Y : فاکتور انبساط
 ΔP : دیفرانسیل فشار
 p^{id} : دانسیته مخلوط ایده‌آل

مراجع

- [1]. Erfanmanesh M. and M. Afyuni., "Environmental pollution (water, soil and air)," Isfahan: Arkan Publication, 218-19, 2013.
- [2]. Peavy H. S. R. and Tchobanoglous D. R., "Environmental engineering," 1985.
- [3]. Organization W. H., "Air Quality Guidelines for Europe," 2000.
- [4]. Dehghani M., "Guidelines of hospital environmental health," Tehran: Nakhli, 233-240, 2000.
- [5]. Tiwary A. and Williams I., "Air pollution: measurement, modelling and mitigation," CRC Press, 2018.
- [6]. Colls J., "Air pollution," Taylor, Francis. Inc, Lamdon and New York, 2003.
- [7]. Ghiasseddin M., "Air pollution sources, effects and control," Vol. 1., Iran: University of Tehran 903, 2015.
- [8]. Jaecker Voirol A. and Pelt P., "PM10 emission inventory in Ile de France for transport and industrial sources: PM10 re-suspension, a key factor for air quality," Environmental Modelling & Software, Vol. 15, No. 6, p. 575-581, 2000.
- [9]. Soltanieh, M., Zohrabian A., Gholipour M. J. and Kalnay E., "A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran," International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 49: pp. 488-509, 2016.
- [10]. Fawole O. G., Cai X. M., and MacKenzie A., "Gas flaring and resultant air pollution: A review focusing on black carbon," Environmental Pollution, Vol. 216, pp. 182-197, 2016.
- [11]. "The World Bank report on Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR)," <http://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction>.
- [12]. Wolf F. G., "Operationalizing and testing normal accident theory in petrochemical plants and refineries," Production and Operations Management, Vol. 10, No. 3, pp. 292-305, 2001.
- [13]. Kulkarni P., Chellam S. and Fraser M. P., "Tracking petroleum refinery emission events using lanthanum and lanthanides as elemental markers for PM2.5," Environmental Science & Technology, Vol. 41, No. 19, p. 6748-6754, 2007.
- [14]. Castiñeira D., Rawlings B. C. and Edgar T. F., "Multivariate image analysis (MIA) for industrial flare combustion control," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 51, No. 39, pp. 12642-12652, 2012.
- [15]. McCoy B. J., Fischbeck P. S. and Gerard D., "How big is big? How often is often? characterizing texas petroleum refining upset air emissions," Atmospheric Environment, Vol. 44, No. 34, pp. 4230-4239, 2010.
- [16]. Bond T.C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S. B., Kärcher D. Koch, Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., M. Z. Jacobson, Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G. and Zender C. S., "Bounding the role of black carbon

- in the climate system: A scientific assessment*,” Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 118, No. 11, pp. 5380-5552, 2013.
- [17]. Huang K., Joshua S. Fu, Vitaly Y. Prikhodko, Storey J. M., Romanov A., Hodson E. L., Cresko J., Irina Morozova, Ignatieva Y. and Cabaniss J., “*Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation*,” Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 120, No.21, 2015.
- [18]. Cuclis A. “*Why emission factors don’t work at refineries and what to do about it*,” in Workshop in Research Triangle Park hosted by EPA in., 2006.
- [19]. Singh K. D., Dabade T., Vaid H., Gangadharan P., Chen D., Lou H. H., Li X., Li K. and Martin Ch. B., “*Computational fluid dynamics modeling of industrial flares operated in stand-by mode*,” Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 51, No. 39, pp. 12611-12620, 2012.
- [20]. Shires T. and Loughran C J., “*Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry*,” Prepared by URS Corporation for the American Petroleum Institute (API). API, Washington DC, 2009.
- [21]. EPA U. S., “*Emission estimation protocol for petroleum refineries*,” O.o.A.Q.P.a. Standards, Editor. U.S. Environmental Protection Agency., pp 6-6, 2015.
- [22]. CAPP, “*Estimation of flaring and venting volumes from upstream oil and gas facilities*,” C.A.o.P. Producers, Editor., CAPP, Canadian p. 59, 2002.
- [23]. Khazaei M. and Pakizehseresht M., “*A New practical way for calculating the amount of gas flared based on PVs in South Pars gas development projects of IRAN*,” in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. 2009. Society of Petroleum Engineers.
- [24]. Ebuka, U., Chukwunonso A., Nnaemeka N. and Princewill I., “*A Proposed simplified technique for accurate measurement and calculation of flared gas volume for nigerian oil fields*,” in SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [25]. Fisher L., “*Control valve handbook*,” Fourth E-dition. Fisher LLC, Marshalltown, 2005.
- [26]. ANSI/ISA, “*Industrial-process control valves - Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions*,” American National Standards Institute: USA. pp. 76-76, 2012.
- [27]. ASTM, ASTM D1145, “*Test method for sampling of natural gas*,” ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 1986.
- [28]. ASTM, ASTM D1265-11(2017)e1, “*Standard Practice for Sampling Liquefied Petroleum (LP) Gases, Manual Method*,” 2017, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [29]. Standard G., “*Analysis for natural gas and similar gaseous mixtures by gas chromatography*,” Revised in. 2000.
- [30]. Kubát, J., Macák J., Mizera J. and Zchoval J., “*Analysis of natural gas by gas chromatography*,” Journal of Chromatography A, Vol. 148, No.1, pp. 189-193, 1978.
- [31]. ASTM, ASTM D1945-14, “*Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography*,” , ASTM International West Conshohocken, PA. 2014..