

بررسی عملکرد فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی با استفاده از شبیه‌سازی CFD و ارائه راهکار

محمد ایرانی*، یعقوب بهجت

عضو هیئت علمی پژوهشکده گاز، پژوهشگاه صنعت نفت، کد پستی ۱۱۱۳۱۶۵۸۴۱، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: iranim@ripi.ir

مقاله علمی - پژوهشی

صفحه ۸ - ۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

در این تحقیق، شبیه‌سازی فلر LPG^۱ پالایشگاه پارس جنوبی در ابعاد صنعتی به‌منظور بررسی اثر هندسه تیپ فلر بر مشخصه‌های احتراقی فلر شامل شکل و موقعیت شعله با استفاده از تکنیک CFD انجام شده است. به‌منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای عددی، از شبکه محاسباتی هیبریدی مناسب بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مدل توسعه یافته (CFD) شامل پروفایل دمایی و سرعت، پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر و همچنین پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که فلر LPG در شرایط عملیاتی، افزایش دمای بدنه تیپ فلر (۵۲۳ - ۳۵۰ °C) بر اثر برخورد مستقیم شعله در نقاطی از تیپ فلر، قابل توجه است. لذا عملکرد فلر در شرایط عملیاتی با مقدار گاز جارویی فعلی مناسب نیست و ادامه این روند و افزایش دمای سطح بدنه تیپ فلر، در نهایت منجر به تخریب کامل و تعویض کلی آن می‌گردد؛ بنابراین مقدار گاز جارویی تزریق شده به فلر جهت بهبود عملکرد احتراق، باید افزایش یابد. علاوه بر این با توجه به وجود تندبادهای مقطعی و افزایش سرعت باد تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد و مشخصه‌های احتراقی فلر LPG بررسی گردید. نتایج حاصل از مدل CFD نشان داد که انحراف شعله در جهت مسیر باد زیاد بوده و در نتیجه شعله به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود و دمای آب‌بند گازی^۲ و بدنه تیپ فلر و سپر باد تا ۸۵۰ °C بالا افزایش می‌یابد و نهایتاً به تخریب کامل سپر باد می‌انجامد. برای جلوگیری از به وجود آمدن چنین مخاطراتی (هنگام تندباد) باید تزریق گاز سوخت به حدی تنظیم گردد تا از برگشت شعله به درون تیپ فلر جلوگیری شود.

کلید واژه‌ها: مشخصه‌های احتراق، شعله، فلر صنعتی LPG، شبیه‌سازی CFD

۱. مقدمه

آتش‌سوزی تجهیزات را کاهش می‌دهد و از تولید محصولات ناخواسته جلوگیری می‌کند. فلرینگ به‌طور گسترده در صنایع پالایشگاهی، پتروشیمی و شیمیایی برای از بین بردن گازهای غیرمطلوب احتراق‌پذیر توسط سوختن در محیط شعله باز

فلرینگ آفرآیندی است که از طریق آن، گازهای غیرمطلوب احتراق‌پذیر را به‌صورت کنترل شده‌ای می‌سوزانند. در غیر این صورت، این گازها به شکل خطرناک و کنترل نشده‌ای آتش می‌گیرد. فلرینگ، خطرات ناشی از

1. Liquefied Petroleum Gas
2. Gas Seal
3. Flaring



انجام می‌گیرد. هدف از ساخت فلرها دریافت گازهای ناخواسته ارسالی از سوی واحد صنعتی و سوختن این گازها در جهت جلوگیری از ورود آن‌ها به محیط‌زیست می‌باشد. در صنعت عواملی همچون قطع جریان برق، تغییر در خوراک ورودی به واحدها، بهره‌برداری بیش از ظرفیت طراحی از واحدهای تولیدی، تعمیر و نگهداری نامناسب، انحراف از روش‌های درست و دستورالعمل‌های بهره‌برداری، اشتباهات انسانی و ... از جمله عواملی هستند که موجب تغییرات فرآیندی و بالا رفتن فشار در مخازن، برج‌ها و سایر تجهیزات صنعتی می‌گردند [۱]. تغییرات فشار به نوبه خود می‌تواند موجب صدمات جبران‌ناپذیری به تجهیزات صنعتی و در بعضی مواقع صدمات جانی گردد. فلرینگ گازهای همراه یکی از روش‌هایی است که بیشتر در ابعاد فنی به‌منظور افزایش ایمنی تجهیزات و جلوگیری از خطرهای بالقوه مانند انفجار و سایر خطرات احتمالی ناشی از افزایش فشار و شعله‌ور شدن گازهای پرفشار در جریان استحصال نفت خام صورت می‌گیرد.

در صورتی که احتراق در فلر کامل یا به عبارت دیگر بازده فرآیند احتراق در فلر ۱۰۰ درصد باشد، فقط بخار آب و دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصولات احتراق تولید می‌شوند؛ اما در عمل به علت تغییر شرایط عملکردی و انحراف از شرایط طراحی، بازده کاهش می‌یابد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته در جهان، در حدود ۲۵۰ ماده سمی شناخته شده نظیر دوده، بنزن، جیوه، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، دی‌اکسید کربن، آرسنیک، دی‌سولفید کربن، کروم، متان، تولوئن، گازهای اسیدی و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای طی فرآیند فلرینگ به هوا تخلیه می‌شوند که برخی از ترکیبات آزاد شده می‌توانند باعث تشدید بیماری‌های تنفسی از جمله آسم شوند. زاداکبر و همکاران [۲]، خطر انتشار ترکیبات سمی برای دو حالت فلر خاموش و روشن در پالایشگاه گاز خانگی‌ران را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها حاکی از آن بود که کارکنان پالایشگاه در هر دو حالت در معرض تنفس گازهای سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا قرار دارند؛ اما در حالتی که شعله فلر در اثر بارانهای شدید، توفان یا باد شدید خاموش شود خطر بسیار جدی‌تر بوده و در صورتیکه این شرایط برای مدت طولانی ادامه یابد منجر به مرگ کارکنان خواهد شد. بدین ترتیب، میزان و نوع گازهای انتشار یافته از فلر به محیط‌زیست تابع بازده احتراق و نوع خوراک ورودی به فلر است [۳]. بازده احتراق

پایین در فلر به معنای وجود مقدار قابل توجهی ترکیبات آلی فرار در گازهای ارسالی به فلر بوده و بازده بالا نیازمند اختلاط کامل سوخت با هوا و فقدان فاز مایع در حین احتراق است [۴]. بازده احتراق برای فلری که به‌خوبی طراحی شده است، معمولاً بالای ۹۰ درصد و گاهی بیش از ۹۸ درصد است. از این رو، طراحی و بهره‌برداری از این تجهیز فرآیندی در جهت احتراق کامل ترکیبات ورودی امری ضروری است [۵-۸].

مطالعات تجربی و شبیه‌سازی زیادی درباره فلرها انجام شده است. هوآنگ و همکاران پایداری و رفتار شعله جت احتراقی پروپان را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و روابطی را برای مسیر حرکت جت‌های احتراقی در یک جریان متقاطع ارائه کردند [۹]. بورگینگتون و همکاران روشی برای اندازه‌گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند [۱۰]. جانسون^۱ و همکاران با انجام درباره شعله‌های نفوذی در مسیر جریان سیال، نشان دادند که جریان باد و محتوای انرژی سوخت مستقیماً بر روی راندمان احتراق مؤثر است [۱۱]. نتایج تحقیقات کوستیوک^۲ و جانسون نشان داد که فلرها در هوای ساکن راندمان بالایی داشته و افزایش سرعت وزش باد باعث افت بازده می‌شود [۱۲]. کاستیشیرا و ادگار^۳، با شبیه‌سازی CFD اثر تزریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرها در مقیاس آزمایشگاهی با شعله غیر پیش‌آمیخته بررسی کردند [۱۳]. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از بخار آب و هوا باعث اختلاط بهتر سوخت می‌شود ولی نسبت‌های خیلی بالای بخار به سوخت و هوا به سوخت باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می‌شود. کاستیشیرا و ادگار، در تحقیق دیگری عملکرد یک فلر با سرعت‌های مختلف باد را بررسی کردند. در این مطالعه از یک مکانیسم شامل پنج واکنش و سپس مکانیسمی شامل ۲۳ جزء و ۷۴ واکنش استفاده کردند و رفتار فلر صنعتی و انتشار گاز از آن بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی نشان می‌دهد [۱۴].

اثر وزش باد بر بازده فلرهای صنعتی با استفاده از روش CFD توسط کاستیشیرا و ادگار مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. نتایج آن‌ها نشان داد که وزش باد با سرعت متوسط نیز تأثیر قابل توجهی بر کاهش بازده فلر داشته و شعله فلر در معرض باد کوتاه‌تر از شعله فلر بدون وزش باد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

1. Johnson
2. Kostiuk
3. Castiñeira and Edgar





لوال^۱ و همکاران اثر وزش باد و سرعت جت خروجی از فلر را با استفاده از مدل سازی CFD مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. نتایج حاصل از مدل سازی با داده های تجربی اعتبارسنجی گردید. لانگمن^۲ و همکاران، اثر نوسانات شدید ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط یک فلر پالایشگاهی را گزارش کردند [۱۶]. سینگ^۳ و همکاران، با استفاده از یک مدل CFD فلر صنعتی و آزمایشگاهی را شبیه سازی کردند و مدل آن ها توانست بازده فلر را با خطای پنج درصد برای فلر صنعتی محاسبه کند [۱۷]. سینگ و همکاران، در مطالعه دیگری باهدف بررسی تأثیر نسبت سوخت به هوا و سوخت به بخار، با استفاده از CFD عملکرد فلر را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج شبیه سازی آن ها با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر پیش بینی شده برای راندمان احتراق انحراف زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۸]. جوادی و همکاران اثر وزش باد بر شکل شعله به صورت عددی انجام دادند نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که در سرعت های بالاتر از پنج متر بر ثانیه به علت نشست شعله بر روی بدنه، دمای بدنه بالا می رود [۱۹]. صباغ و رهبر تأثیر شکل تیپ فلر بر بیشینه دمای جداره نوک فلر را مطالعه کردند [۲۰]. در این تحقیق نشان داده شد که در هندسه استوانه ای باوجود وزش باد طول شعله بلندتر از هندسه های دیگر است. جوادی و همکاران [۲۱]، تأثیر وزش باد بر شکل شعله فلر و توزیع دما را در پالایشگاه سرخون و قشم با استفاده از شبیه سازی CFD مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد وقتی سرعت باد افزایش می یابد حداکثر دمای شعله کاهش می یابد. همچنین در اثر افزایش سرعت باد، شعله به یک طرف خمیده شده و به دیواره فلر نزدیک می شود. تغییر در حداکثر دمای دیواره فلر و همچنین تغییر در محل شعله باعث ایجاد استرس های قابل توجهی بر دیواره فلر شده و باعث آسیب بدنه فلر می شود. شبیه سازی یک سیستم فلر توسط مارا و کانتینیلو^۴ انجام شد در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه سازی، هندسه فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند [۲۲]. بهجت و همکاران با استفاده از تحلیل CFD مشخصه های احتراق را در فلر کم فشار در مقیاس صنعتی بررسی نمودند و با استفاده از شبیه سازی علل ایجاد تنش های حرارتی در تیپ فلر بررسی گردید [۲۳]. همچنین معروف و همکاران ابتدا با استفاده از API-521

یک فلر را طراحی نمود و سپس با استفاده از روش های CFD عملکرد آن را بررسی نمود. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب فلر را تأیید کرد [۲۴]. با توجه به مباحث مطرح شده در منابع متعدد می توان چنین نتیجه گرفت که تحقیقات انجام یافته در خصوص فلرها با استفاده از مدل سازی CFD، بیشتر محدود به فلرهای در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تحقیقات اندکی بر روی فلرهای صنعتی انجام پذیرفته است که این امر را می توان به دلیل گستردگی بازه زمانی و اندازه فلرها، آشفته گی زیاد جریان، سینتیک پیچیده و تأثیر قابل توجه آشفته گی بر سینتیک واکنش های احتراقی دانست.

با توجه به مطالعات کتابخانه ای انجام یافته تاکنون شبیه سازی در ابعاد صنعتی برای فلر LPG انجام نشده است. در این پژوهش، شبیه سازی فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی در ابعاد واقعی به منظور ارزیابی اثر مشخصه های احتراقی فلر بر شکل و موقعیت شعله و توزیع دمای حاصل در بدنه فلر، آلاینده های خروجی از آن و همچنین تأثیر مؤلفه های ذکر شده بر پایداری شعله و عدم پس کشیدن شعله به داخل تیپ فلر با استفاده از تحلیل CFD مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به در دسترس بودن منابع محاسباتی قوی (Intel® core i9-990K CPU@3.6 GHZ, 32 GB RAM)، شبیه سازی فلر صنعتی LPG با بهره گیری از تکنیک شبکه بندی هیبریدی و در نظر گرفتن تمام پدیده های مرتبط شامل آشفته گی، تشعشع و سینتیک واکنش های احتراقی انجام پذیرفته است.

۲. مدل سازی CFD احتراق در فلر و معادلات حاکم

در این تحقیق از نرم افزار ANSYS FLUENT نسخه ۱۹ برای شبیه سازی استفاده شده است. برای مدل سازی هر جریان تک فاز (محیط گازی) دارای واکنش، معادلات انتقال جرم، اندازه حرکت و انرژی حاکم بر آن سیستم لازم است. معادلات حالت پایدار متوسط رینولدز ناویر-استوکس در ادامه بیان می شوند [۱۲].

۲-۱. معادله پیوستگی (بقای جرم)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

معادله (۱) شکل کلی معادله قانون پیوستگی می باشد. در

1. Lawal
2. Langman
3. Singh
4. Marra and Continillo

صورت وجود چند جزء ماده مختلف در سیستم و با در نظر گرفتن تأثیرات انتقال جرم این رابطه برای هر جزء به صورت رابطه ذیل نوشته خواهد شد.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (2)$$

که مقدار Y_i برابر کسر جرمی هر جزء می باشد، R_i نرخ تولید در اثر واکنش های شیمیایی و J_i انتقال جزء بر اثر نفوذ است.

۲-۲. معادله بقای اندازه حرکت

شکل کلی معادلات بقای اندازه حرکت به صورت زیر می باشد.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \rho \vec{v}' \vec{v}') \quad (3)$$

که در آن v' نوسان ناشی از آشفتگی بردار سرعت، μ ویسکوزیته سیال و P فشار می باشند. علامت بار روی عبارات این معادله به مقادیر متوسط اشاره می کند. تنش های رینولدز، $\rho \vec{v}' \vec{v}'$ عبارت های اضافه ای هستند که از تجزیه متغیرهای آشفتنه به مقادیر متوسط و نوسانی به وجود می آیند. این عبارات برای کامل شدن معادله (۳) باید مدل شوند. برای این منظور از مدل آشفتگی استفاده می گردد. در این پژوهش از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ تصحیح شده (k-ε Realizable) استفاده شده است [۱۳]. در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی (k) و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی آشفتنه (ε) به صورت هم زمان حل می شوند. مدل $k-\varepsilon$ شامل دو معادله زیر می باشد:

$$\rho_f \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho_f \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3k} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

در نتیجه حل معادلات (۴) و (۵) مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می شود که با استفاده از آن ها ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش (μ_t) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

۲-۳. معادله بقای انرژی

بقای انرژی برای یک المان سیال با رابطه زیر مدل سازی

می گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (7)$$

که k_{eff} ثابت رسانش بوده و $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ انرژی کل سیال در حجم کنترل می باشد.

هم چنین برای توضیح کامل تر لازم به ذکر است. $\nabla \cdot \sum_j h_j \vec{J}_j$ ترم انتقال حرارت ناشی از اثرات انتقال جرم می باشد و برای یک سیستم همراه با واکنش شیمیایی مقدار به صورت زیر تعریف می شود.

$$S_{h,rxn} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (8)$$

که h_j^0 آنتالپی تشکیل هر جزء و R_j نرخ تولید حجمی اجزاء مختلف در سیستم است. همچنین محاسبه خصوصیات فیزیکی با استفاده از روابط قانون مخلوط ها انجام گرفته است.

۲-۴. معادله انرژی در جامد

توزیع دما در ناحیه جامد توسط هدایت حرارتی یک بعدی مطابق معادلات ۹ و ۱۰ انجام می گیرد. همچنین در فصل مشترک بین ناحیه سیال و ناحیه جامد در مدل انتقال حرارت مزدوج^۲، انتقال حرارت رسانا در سراسر جامد با انتقال حرارت همرفتی همراه است که توسط معادله ۹ و ۱۰ لحاظ می گردد. در معادلات ۹ و ۱۰، K_{wall} ضریب هدایت حرارتی جامد و K_{fluid} ضریب هدایت حرارتی سیال و $(\nabla \theta)_{wall}$ مربوط به اختلاف دمای سمت جامد و $(\nabla \theta)_{fluid}$ مربوط به اختلاف دمای سمت سیال می باشد.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (9)$$

$$(\nabla \theta)_{FLUID} = \frac{K_{wall}}{K_{fluid}} (\nabla \theta)_{wall} \quad (10)$$

۲-۵. بررسی مدل های سینتیکی بکار رفته

جهت مدل سازی سینتیکی احتراق متان مجموعه واکنش های پیشنهادی توسط اسمیت و همکاران، کیم و همکاران و وستبروک و درایر [۲۷]، به طور گسترده برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در سینتیک ارائه شده توسط اسمیت و همکاران معادلات استوکیومتری برای

1. Mixing Rules
2. Conjugative Heat Transfer



- احتراق متان طبق رابطه‌های (۱۱) تا (۱۴) بیان می‌شوند. (۱۱)
- $$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_1} CO + 2H_2$$
- ثابت‌های سرعت واکنش برای سه واکنش اول (۱۱ تا ۱۳) با k_1 ، k_2 و k_3 نشان داده شده است. واکنش شیفیت آب گاز^۱ (معادله ۱۴) شامل هر دو مرحله رفت (k_{4f}) و برگشت (k_{4r}) می‌باشد. پارامترهای سینتیک آرنیوس مورد استفاده در مدل‌سازی احتراق مربوط به این واکنش‌ها در (جدول ۱) آورده شده است.
- (۱۲)
- $$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_2} H_2O$$
- (۱۳)
- $$CO + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_3} CO_2$$
- (۱۴)
- $$CO + H_2O \xrightleftharpoons[k_{4r}]{k_{4f}} CO_2 + H_2$$

جدول ۱: پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک اسمیت و همکاران [۲۷]

ثابت سرعت	ضریب پیش‌نمایی آرنیوس	انرژی فعال‌سازی (J/kmol)	معادله سرعت (Kmol/m ³ s)
k_1	$4/4 \times 10^{11}$	$1/25 \times 10^8$	$[CH_4]^{0.5}[O_2]^{1.25}$
k_2	$2/5 \times 10^{16}$	$1/68 \times 10^8$	$[H_2]^{0.5}[O_2]^{2.25}[H_2O]^{-1}$
k_3	$3/16 \times 10^{12}$	$1/67 \times 10^8$	$[CO]^{1.5}[O_2]^{0.25}$
k_{4f}	$5/0 \times 10^{12}$	$2/83 \times 10^8$	$[CO]^{0.5}[H_2O]^1$
k_{4r}	$9/5 \times 10^{10}$	$2/39 \times 10^8$	$[CO_2][H_2]^{0.5}$

- با توجه به وجود اجزاء اتان، پروپان، بوتان و پنتان، هگزان، هپتان و اکتان در خوراک ورودی به فلر LPG، برای شبیه‌سازی احتراق این اجزا از معادله استوکیومتری تک واکنشی پیشنهاد شده توسط وستبروک و درایر، استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱۵) بیان می‌شود.
- $$Fuel + n_1O_2 \rightarrow n_2CO_2 + n_3H_2O \quad (15)$$
- که در معادله استوکیومتری به جای Fuel، اتان، بوتان یا پنتان جایگذاری می‌شود. پارامترهای سینتیک آرنیوس مورد استفاده در مدل‌سازی احتراق مربوط به این واکنش در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای سینتیک آرنیوس معادله سرعت آن [۲۶]

ضریب آرنیوس	انرژی فعال‌سازی (J/kmol)	معادله سرعت (Kmol/m ³ s)
$2/119 \times 10^{11}$	$2/027 \times 10^8$	$[C_2H_6]^{0.2}[O_2]^{1.3}$
$5/96 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_3H_8]^{0.1}[O_2]^{1.65}$
$4/161 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_4H_{10}]^{0.15}[O_2]^{1.6}$
$3/599 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_3H_{12}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$3/205 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_6H_{14}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$2/868 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_7H_{16}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$2/587 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_8H_{18}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$

۲-۶. مدل‌سازی تشعشع

برای محاسبه شار تشعشعی باید ابتدا معادله انتقال حرارت تشعشعی حل شده و سپس شدت تابش در موقعیت‌های مختلف محاسبه گردد. مدل تشعشعی P1 که در این تحقیق برای مدل‌سازی تشعشع مورد استفاده قرار گرفت، ساده‌ترین حالت از مدل کلی‌تر P-N می‌باشد که بر پایه بسط شدت تشعشع (I) در یک سری هارمونیک کروی اورتوگونال شکل گرفته است. این روش به دلیل سادگی و کارآمد بودن به یکی از محبوب‌ترین روش‌های حل معادلات انتقال حرارت تشعشعی تبدیل شده است. از

1. Water Gas Shift (WGS) Reaction

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (17)$$

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (18)$$

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (19)$$

با ترکیب معادلات ۱۶ تا ۱۹ معادله (۲۰) به دست می‌آید

$$-\nabla q_r = aG + 4a\sigma T^4 \quad (20)$$

مقدار $-\nabla q_r$ می‌تواند به‌طور مستقیم در معادله انرژی جایگذاری شود و با استفاده از آن چشمه ناشی از تشعشع را محاسبه کرد [۲۷].

۳. روش شبیه‌سازی و شرایط مرزی مورد استفاده

برای شبیه‌سازی فلر LPG از الگوریتم سیمپل^۱ برای پیوستگی فشار و سرعت استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور جداسازی معادلات انتقال اجزاء از روش جداسازی درجه یک^۲ و برای دیگر معادلات از روش جداسازی درجه دو^۳ استفاده شد. آشفتگی توسط معادله k-ε Realizable مدل‌سازی گردید. برای محاسبه تأثیر تشعشع بر انتقال حرارت، مدل P-1 مورد استفاده قرار گرفت. (جدول ۳) شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی فلر LPG را نشان می‌دهد.

جدول ۳: شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی فلر LPG

شرایط مرزی مورد استفاده	مرز مورد نظر
دیواره با شرط عدم لغزش	دیواره‌های فلر
شرط مرزی انتقال حرارت: کوپل ضریب انتشار فولاد برابر با ۰/۸۵	
دیواره با شرط تنش برشی برابر با صفر	دیواره انتهای دامنه محاسباتی
دما ثابت برابر با K ۳۰۰ ضریب انتشار برابر با یک	
دیواره با شرط تنش برشی برابر با صفر	کف دامنه محاسباتی
دما ثابت برابر با K ۳۰۰ ضریب انتشار برابر با یک	
فشار خروجی ثابت برابر با فشار اتمسفری	فشار خروجی محدوده محاسباتی

به‌وضوح مشخص است تیپ فلر شامل استوانه‌هایی با قطر کم جهت تزریق بخار و ایجاد جت به شعله می‌باشد.

مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- در مدل P1 معادله انتقال تشعشعی یک معادله پخششی است، که حل معادله را ساده می‌کند.
- این مدل اثرات پراکنش را در نظر می‌گیرد.
- برای کاربردهای احتراقی که ضخامت نوری (نفوذپذیری نور در ماده) بزرگ است به‌خوبی پاسخ‌گو است.
- مدل P1 می‌تواند به‌آسانی برای هندسه‌های پیچیده به کار رود. همان‌طور که ذکر شد مدل تشعشع P1 ساده‌ترین حالت مدل کلی P-N است که بر پایه بسط شدت تشعشعی (I) به یک سری هارمونیک کروی اورتوگونال شکل گرفته است.

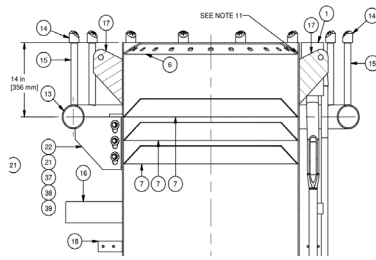
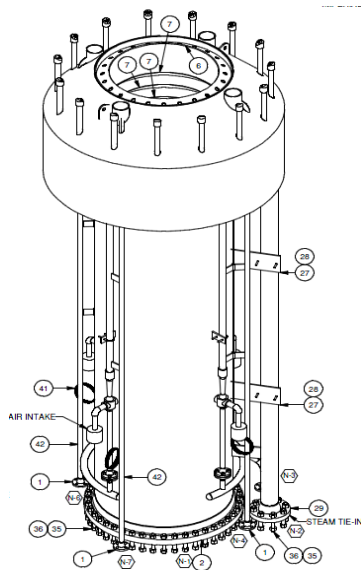
چنانچه تنها چهار ترم در این سری به کار رود، معادله (۱۶) برای شار تشعشعی به دست می‌آید.

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (16)$$

که در آن G ، تشعشع تابیده و C ، ضریب تابع خطی فاز غیر ایزوتروپیک است. با تعریف Γ به‌صورت رابطه (۱۷)، معادله به شکل (۱۸) ساده شده و در نهایت معادله انتقال به‌صورت رابطه (۱۸) درمی‌آید.

در (شکل ۱) شماتیک تیپ فلر LPG طبق نقشه‌های طراحی و عکس گرفته شده در حین تعمیرات اساسی پالایشگاه نشان داده شده است. همان‌طور که در (شکل ۱)

1. Simple
2. First-Order Upwind
3. Second-Order Upwind



شکل ۱: تصویر واقعی، نمای از راست و ایزومتریک تیپ فلر LPG

در (جدول ۴) ترکیب درصد گازهای ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط طراحی و عملیاتی آورده شده است همچنین.

جدول ۴: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر LPG

ترکیب درصد (mol%)	اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد (mol%)	اجزای ارسالی به فلر
۰/۰۰۶	C ₄ H ₁₀	۷/۴۹۳۰	H ₂ O
۰/۰۰۱۵	C ₅ H ₁₂	۰/۰۱۳۳	N ₂
۰/۰۵۹۳	C ₆	۵۴/۳۹۲۰	CO ₂
۰/۰۱۴۸	C ₇	۰/۵۴۸۹	CH ₄
۰/۰۱۰۷	C ₈	۰/۰۴۲۲	C ₂ H ₆
۳۷/۳۳۳۶	H ₂ S	۰/۰۱۳۱	C ₃ H ₈

در (جدول ۵) میزان گاز ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه پنجم پارس جنوبی گزارش شده است.

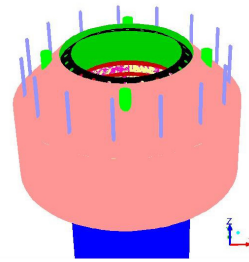
نرم افزار مناسب (GAMBIT) و مطابق با نقشه های طراحی می باشد. با توجه به پیچیدگی طراحی تیپ فلر و تأثیر هر کدام از بخش ها و جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده تیپ فلر، لازم است تمام جزئیات و المان های تیپ فلر بر اساس نقشه های طراحی در ترسیم هندسه رعایت شود. در این شبیه سازی همان طور که در (شکل ۲) نشان داده است، ترسیم هندسه تیپ فلر با جزئیات مربوطه انجام شده است. همان طور که در (شکل ۲) ملاحظه می شود، هندسه ترسیم شده منطبق با شماتیک فلر LPG نشان داده شده بر اساس نقشه های طراحی و عکس های اخذ شده از تیپ فلر به هنگام تعمیرات اساسی می باشد. بطوریکه هندسه ترسیم شده فاقد هرگونه ساده سازی بوده و تمام جزئیات تیپ فلر در شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

در (جدول ۵) میزان گاز ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه پنجم پارس جنوبی گزارش شده است.

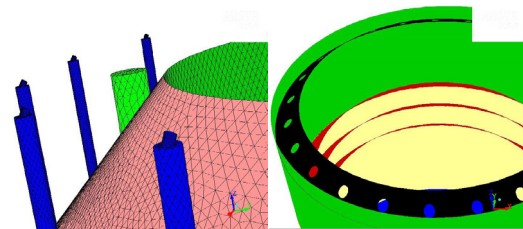
جدول ۵: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر LPG

نوع جریان	مقدار طراحی	مقدار عملیاتی
میزان گاز ارسالی به فلر (Kg/hr)	۷/۴۹۳۰	۷/۴۹۳۰
میزان بخار (Kg/hr)	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۳۳
میزان Assist Gas (Kg/hr)	۵۴/۳۹۲۰	۵۴/۳۹۲۰
میزان Purget Gas (NM3/hr)	۰/۵۴۸۹	۰/۵۴۸۹
میزان Pilot Gas (NM3/hr)	۰/۰۴۲۲	۰/۰۴۲۲

اولین گام جهت شبیه سازی CFD ایجاد هندسه در



نمای کلی از تیپ فلر

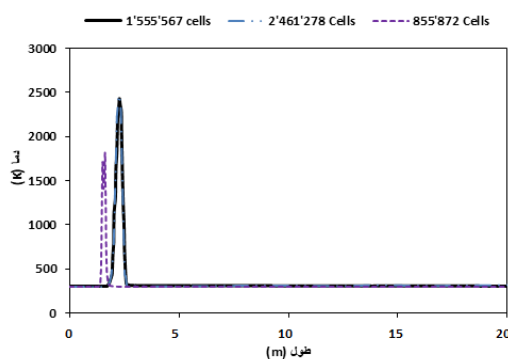


نمایی از تثبیت کننده شعله

نمایی از Gas Seal

شکل ۴: نمای از هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده

سلول (حجم کنترلی) که در نهایت برای بررسی استقلال نتایج مدل سازی از مش بندی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه می شود. با توجه به بررسی پدیده احتراق در این پروژه، پروفایل های دمای پیش بینی شده از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. نمودار تغییرات دمای پیش بینی شده جریان گاز در راستای خط افقی به ارتفاع ۱۰ متر در جهت وزش باد برای سه شبکه بندی مختلف در (شکل ۳) آورده شده است. با توجه به (شکل ۳) می توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد حجم های کنترلی به بیش از ۱،۵۵۵،۵۶۷ تأثیر قابل ملاحظه ای در نتایج پیش بینی شده ندارد؛ بنابراین شبکه بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷ سلول به عنوان شبکه بندی بهینه برای انجام محاسبات انتخاب گردید؛ بنابراین وجود تفاوت جزئی در پاسخ های به دست آمده از دو شبکه بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷ و ۲،۴۶۱،۲۷۸ سلول منطقی بوده و می تواند ناشی از تغییرات تناوبی اندک پاسخ در طی محاسبات سعی و خطا باشد.



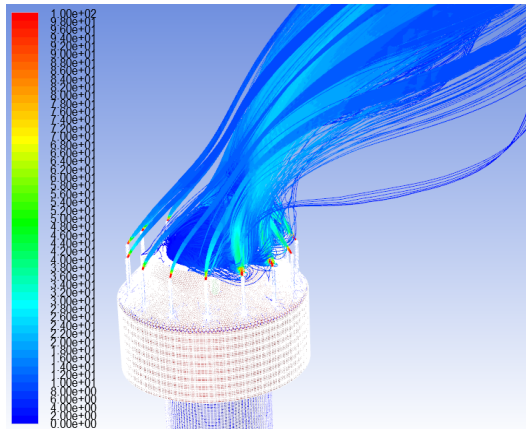
شکل ۳: دمای پیش بینی شده جریان گاز در راستای یک خط افقی در جهت وزش باد و ارتفاع ۱۰ متر

۴. نتایج شبیه سازی فلر LPG

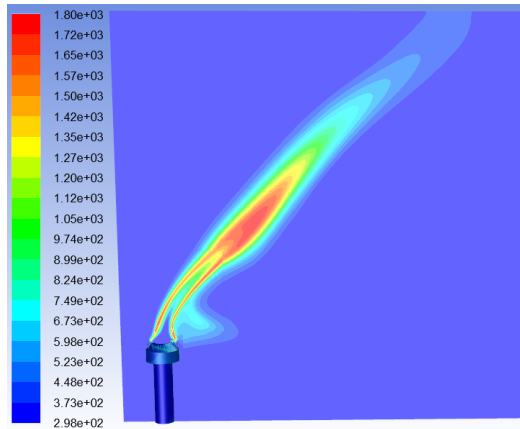
خوراک با مشخصات ارائه شده در (جدول ۴) گزارش، وارد تیپ فلر LPG می شود و اکسیژن مورد نیاز از طریق هوای محیط با سرعت باد وارد ناحیه احتراق می گردد. پس از انجام واکنش، شعله تشکیل شده و محصولات حاصل از احتراق تولید می گردند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو حالت طراحی و عملیاتی ارائه می گردد. در (شکل ۴) پروفایل دمایی و شکل شعله تشکیل شده در فلر LPG در شرایط طراحی آورده شده است. همان طور که در شکل مشخص است به علت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل می شود. به طوری که ارتفاع شعله تشکیل شده حدود ۱۵ متر می باشد و بخش وسیعی از محفظه اطراف فلر، شامل شعله بوده و دمای بالایی دارد.

با توجه به هندسه ترسیم شده فلر، کیفیت شبکه محاسباتی تأثیر چشم گیری بر نتایج شبیه سازی CFD دارد. از این رو برای دستیابی به نتایج صحیح و با کمترین خطای ممکن در مطالعه CFD شبیه سازی فرایند احتراق در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن تمام پدیده های انتقال (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش های شیمیایی) انجام پذیرفت. بر این اساس فضایی مکعب مستطیل شکل به ابعاد $20 \times 20 \times 3$ m که ۱۶ متر بالای تیپ فلر در آن قرار دارد به عنوان فضای شبیه سازی طراحی شد.

ایجاد شبکه محاسباتی مناسب موجب همگرایی بهتر در حل معادلات و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می تواند موجب ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. در این پروژه علاوه بر انتخاب شبکه مناسب، از مستقل بودن نتایج حل معادلات از شبکه استفاده شده، اطمینان حاصل گردیده است. در اطراف تثبیت کننده شعله، نازل های تزریق بخار Gas Seal و بخش های داخلی تیپ فلر مش ها ریزتر انتخاب شدند تا اطلاعات دقیق تری در این نواحی به دست آید. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه ۶ وجهی (شبکه منظم) برای کاهش خطاهای عددی، همانند نفوذ کاذب استفاده شده است. در این تحقیق هدف شبیه سازی فلر LPG مدنظر است برای بررسی مش بندی طراحی شده، این مش بندی با اندازه های مختلف در دامنه محاسباتی اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در این گزارش نتایج سه مش بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷، ۲،۴۶۱،۲۷۸ و ۸۵۵،۸۷۲



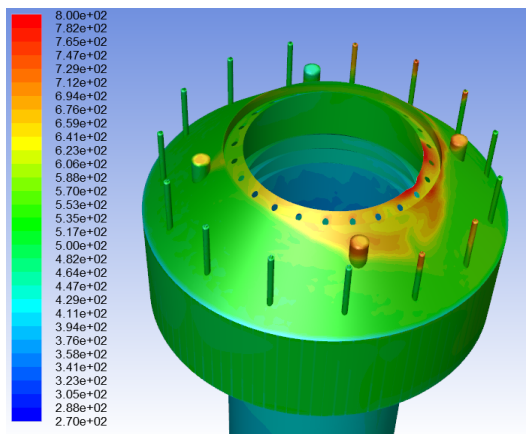
شکل ۶: مسیر حرکت بخار آب تزریقی به همراه گازهای ارسالی به فلر LPG



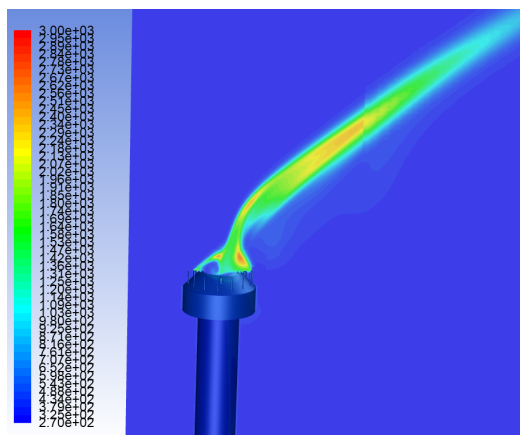
شکل ۴: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط طراحی)

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD که در بالا گزارش شده است در اثر سرعت باد شعله به میزان کمی به سمت سپر باد منحرف می‌گردد. از طرف دیگر سرعت بالای تزریق بخار آب از طریق نازل‌های طراحی شده در اطراف تیپ فلر باعث عدم برخورد مستقیم شعله به سپر باد می‌گردد. همچنین به علت هیدرودینامیک ایجاد شده در تیپ فلر و طراحی مناسب نازل‌های تزریق بخار، شاهد عدم برگشت شعله به داخل تیپ فلر می‌باشیم به‌طوریکه دمای Gas Seal و بدنه داخلی تیپ فلر افزایشی ندارد.

در (شکل ۵) پروفایل دمایی (شکل شعله) گازهای حاصل از احتراق در فلر LPG در شرایط عملیاتی آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت اثر سرعت باد، شعله در جهت باد به صورت ملایم متمایل شده است. چون جهت وزش باد از سمت چپ به راست می‌باشد، شعله به سمت راست کشیده شده است.



شکل ۷: پروفایل دمای سپر باد تیپ فلر LPG (شرایط عملیاتی)



شکل ۵: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط عملیاتی)

در (شکل ۷) پروفایل دمایی صفحه مشبک و سپر باد تیپ فلر LPG در حالت عملیاتی نشان داده شده است. مطابق (شکل ۷) دمای سپر باد و صفحه مشبک بالای تیپ فلر به علت برخورد و تماس با شعله، در برخی نقاط محدود دارای دمای بالاتری هستند. این افزایش دما به تخریب اجزای تیپ فلر می‌انجامد که در (شکل ۸) به‌وضوح دیده می‌شود.

مسیر حرکت بخار آب تزریقی به همراه گازهای ارسالی به فلر LPG و گازهای حاصل از احتراق در (شکل ۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است تفاوت سرعت بخار آب تزریق شده از نازل‌ها با سرعت گازهای ارسالی به فلر و در محدوده تزریق بخار آب در تیپ فلر، قابل ملاحظه است و بخار آب تزریق شده با سرعت زیاد و با اختلاط مناسب از تیپ فلر خارج می‌گردد.

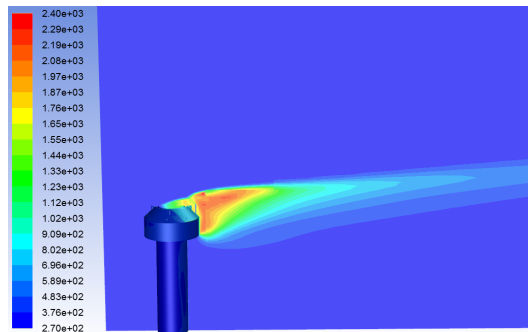




شکل ۸: تخریب تیپ فلر LPG در اثر تنش‌های حرارتی (شرایط عملیاتی)

۵. بررسی اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد فلر LPG

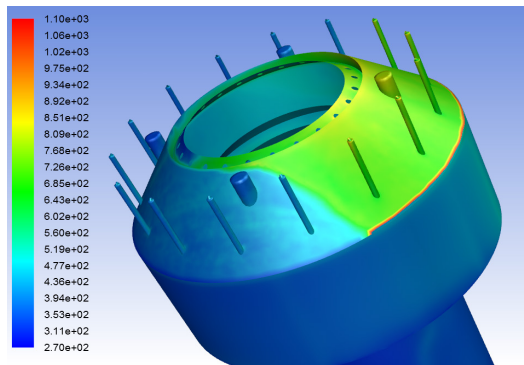
با توجه به وجود تندبادهای مقطعی در سال‌های گذشته و افزایش سرعت باد حتی تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت (معادل با ۳۰/۵ متر بر ثانیه) اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد و مشخصه‌های احتراقی فلر LPG و نهایتاً راهکار مناسب جهت کاهش مخاطرات به‌وجود آمده در ذیل تشریح شده است.



شکل ۹: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط عملیاتی در حالت تندباد)

در (شکل ۹) پروفایل دمایی (شکل شعله) حاصل از احتراق در فلر LPG در شرایط عملیاتی در مواقعی که سرعت باد محیطی به مقدار ۳۰/۵ متر بر ثانیه (۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) افزایش یافته، آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت سرعت بسیار زیاد باد، ارتفاع شعله نسبت به حالتی که سرعت باد محیطی برابر با ۵ متر بر ثانیه (شرایط نرمال آب و هوایی منطقه) می‌باشد در جهت باد بسیار کشیده‌تر می‌باشد. به علت تفاوت سرعت گازهای خروجی از دهانه تیپ فلر و سرعت تندباد، بخشی از هوا به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود که منجر به تشکیل شعله در بخش بالایی تیپ فلر می‌شود. پروفایل دما در نوک تیپ فلر LPG (محدوده سپر باد) در شرایط کارکرد عملیاتی در (شکل ۱۰) در حالتی که سرعت

باد محیطی در منطقه به ۳۰/۵ متر بر ثانیه (۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) افزایش یافته، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است تشکیل شعله به علت سرعت بالای باد و متمایل شدن شعله در جهت افق باعث برخورد شدید شعله به بدنه تیپ فلر خصوصاً سپر باد می‌گردد. از طرف دیگر به علت کشیده شدن بخشی از هوا به داخل تیپ فلر در محدوده بالایی تیپ فلر قسمتی از شعله در محدوده Gas Seal تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر تشکیل می‌شود. برخورد مستقیم شعله به سپر باد و همچنین وجود شعله در قسمت داخلی تیپ فلر در دراز مدت باعث اعمال تنش‌های حرارتی به بدنه تیپ فلر شده (۵۰۰-۸۵۰ °C) و موجب تخریب بدنه تیپ فلر می‌شود؛ بنابراین جهت کاهش برخورد مستقیم شعله به بدنه تیپ فلر بایستی سرعت گازهای خروجی از تیپ فلر افزایش یابد تا شعله به سمت بالا کشیده شود و بر سرعت افقی باد غلبه کند. یکی از راه‌های مؤثر در حالتی که تندباد مقطعی وجود دارد، افزایش سرعت گازهای حاصل از احتراق در خروجی تیپ فلر با افزایش میزان تزریق گاز Purge یا گاز جارویی^۱ به تیپ فلر ممکن می‌باشد. با افزایش میزان تزریق گاز به شبکه فلر LPG میزان احتراق و در نتیجه گازهای حاصل از احتراق افزایش یافته و محصولات حاصل از واکنش احتراقی با سرعت بالایی به بالای تیپ فلر پرتاب می‌شوند. سرعت بالای گازهای حاصل از احتراق در خروجی تیپ فلر باعث غلبه بر سرعت باد افقی شده و از برخورد مستقیم شعله با بدنه تیپ فلر خصوصاً سپر باد جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۰: پروفایل دما و برخورد شعله به سپر باد در نوک تیپ فلر LPG (شرایط عملیاتی در حالت تندباد)

با مقایسه نتایج ترسیم شده و پارامترهای احتراقی در فلر LPG در قسمت‌های قبل برای دو حالت سرعت باد ۵ و ۳۰/۵ متر بر ثانیه می‌توان نتیجه‌گیری ذیل را در قالب (جدول ۶) ارائه داد.

1. Sweep

مراجع:

- W. Kostiuk, "The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow," *Combust. Flame*, vol. 119, no. 3, pp. 319–334, Nov. 1999.
- [11]. M. R. JOHNSON, D. J. WILSON, and L. W. KOSTIUK, "A FUEL STRIPPING MECHANISM FOR WAKE-STABILIZED JET DIFFUSION FLAMES IN CROSSFLOW," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 169, no. 1, pp. 155–174, Aug. 2001.
- [12]. L. Kostiuk, M. Johnson, and G. Thomas, "University of Alberta Flare Research Project Final Report November 1996–September 2004," 2004.
- [13]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "CFD for Simulation of Steam-Assisted and Air-Assisted Flare Combustion Systems," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 1044–1056, May 2006.
- [14]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "Computational Fluid Dynamics for Simulation of Wind-Tunnel Experiments on Flare Combustion Systems," *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 3, pp. 1698–1706, May 2008.
- [15]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "CFD for Simulation of Crosswind on the Efficiency of High Momentum Jet Turbulent Combustion Flames," *J. Environ. Eng.*, vol. 134, no. 7, pp. 561–571, 2008.
- [16]. M. S. Lawal, M. Fairweather, D. B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, and A. Williams, "Computational Study of a Lifted Turbulent Jet Flame in a Cross-flow: Flame Length and Emissions," *Proc. 2nd Annu. Gas Process. Symp.*, pp. 237–245, 2010.
- [1]. آشنایی با فلر. مدیریت بهداشت و ایمنی محیط زیست شرکت ملی پالایش و پخش، ۱۳۹۱.
- [۲]. امید زاد اکبر، ع. و. م. انبیاء «بررسی سیستم‌های کاهش و بازیابی گازهای ارسالی به مشعل پالایشگاه (فلر)» پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، بهمن.
- [3]. D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, L. B. Evans, and W. M. Vatavuk, "Flares. Part i: Flaring technologies for controlling voc-containing waste streams," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 42, no. 3, pp. 333–340, 1992.
- [4]. D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, and R. Corporation, *FLARES*. 1995.
- [5]. A. Bahadori, "Blow-Down and Flare Systems", *Natural Gas Processing*, Elsevier, 2014, pp. 275–312.
- [6]. B. Karthikeyan, "Manage Change to Flare Systems", <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2020/January>.
- [7]. Y. AKTAŞ, Ö. ÖZARIK, "Dynamics of operation for flare systems", *Digital Refining, Combustion Systems and Engineering*, Apr-2014.
- [8]. A. Kumar, S. Phadatare, P. Deore, "A GUIDE ON SMOKELESS FLARING: AIR/STEAM ASSISTED AND HIGH PRESSURE FLARING", *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020, Vol. 4, Issue 12.
- [9]. R. F. Huang and J. M. Chang, "The stability and visualized flame and flow structures of a combusting jet in cross flow," *Combust. Flame*, vol. 98, no. 3, pp. 267–278, Aug. 1994.
- [10]. E. Bourguignon, M. R. Johnson, and L.



- [25]. A. A. Maarooof, J. D. Smith, M. H.S. Zangana, "Design and simulation of a utility oilfield flare in Iraq/Kurdistan region using CFD and API-521 methodology", *Heliyon*, vol. 9, no. 8, 2023.
- [26]. C.K. Westbrook, F.L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames", *Combustion Science and Technology*, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.
- [27]. Frenklach, M.; Wang, H.; Goldenberg, M.; Smith, G. P.; Golden, D. M.; Bowman, C. T.; Hanson, R. K.; Gardiner, W. C.; Lissianski, V. GRI-Mech: An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion; Gas Research Institute: 1995; Tech. Rep. GRI-95/0058.
- [28]. ANSYS Fluent 19.1 User Manual Guide, www.ansys.com.
- [17]. A. S. Langman and G. J. Nathan, "Influence of a combustion-driven oscillation on global mixing in the flame from a refinery flare," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 199–210, Jan. 2011.
- [18]. K. D. Singh et al., "Computational fluid dynamics modeling of industrial flares operated in stand-by mode," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 39, pp. 12611–12620, 2012.
- [19]. K. D. Singh, P. Gangadharan, D. H. Chen, H. H. Lou, X. Li, and P. Richmond, "Computational fluid dynamics modeling of laboratory flames and an industrial flare," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 64, no. 11, pp. 1328–1340, 2014.
- [۲۰]. س. جوادی، م. عنبرسوز، ع. قبادی، م. کهرم، «بررسی عددی اثر باد بر شکل شعله در مشعل بلند پالایشگاه سرخون و قشم»، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، جلد ۲۸، شماره دو، سال ۱۳۹۳.
- [۲۱]. ر. صباغ، ن. رهبر، «بررسی تأثیر شکل هندسی بر پیشینه دمای جداره‌ی نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، جلد ۴، شماره ۴، ۱۳۹۴.
- [22]. M. Javadi et al., "Numerical Investigation of Wind Effects on the Flame Shape of Sarkhoon and Qeshm 's Refinery Flares," vol. 28, no. 2, 2017.
- [23]. F. S. Marra and G. Continillo, "Dynamic Numerical Simulation of an Enclosed Flare," in *Combustion Colloquia, XXXII Event of The Italian Section of The Combustion*, 2009, pp. 1–6.
- [۲۴]. یعقوب بهجت، محمد ایرانی، جعفر صادق زاده اهری، مهدی میرزا آقائبار «آنالیز مشخصه‌های احتراق و بررسی علت ایجاد تنش حرارتی در فلر پالایشگاه گاز با استفاده از تحلیل CFD» نشریه پژوهش نفت شماره ۱۳۱ مهر و آبان ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۶.س



Investigating the Performance of the LPG Flare of the Fifth South Pars refinery Using CFD Simulation and Providing a Solution

Mohammad Irani *, Yaghoubeh Behjatn

Faculty Member, Gas Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Postal Code: 1485613111, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 11 March 2024

Revised: 23 April 2024

Accepted: 15 May 2024

Keywords:

Combustion Characteristics

Flame

LPG industrial flare

CFD simulation

ABSTRACT

In this research, the simulation of the LPG flare of South Pars Refinery in industrial dimensions was carried out in order to investigate the effect of the flare tip geometry on the combustion characteristics of the flare, including the shape and position of the flame, using CFD technique. In order to prevent numerical errors, a suitable hybrid grid was used. The results of the developed model (CFD) include the temperature and velocity profile, the concentration profile of the components of the gases sent to the flare, as well as the concentration profile of the components of the combustion products. The results of CFD simulation show that in the LPG flare in operating conditions, in some points of the flare tip, the increase in the temperature of the flare tip body (523-350 °C) due to the direct impact of the flame is significant in a limited way. Therefore, the performance of the flare in operating conditions is not suitable with the current amount of sweeping gas. With the continuation of this process and the increase in the surface temperature of the flare type body, it will eventually lead to its complete destruction and replacement. Therefore, the amount of sweep gas injected into the flare should be increased to improve the combustion performance. In addition, due to the presence of sectional gusts and the increase in wind speed up to 110 km/h, the effect of sectional gusts on the performance and combustion characteristics of the LPG flare was investigated. The results of the CFD model showed that the flame deviation in the direction of the wind direction is high and as a result the flame is drawn into the flare tip and the temperature of the gas seal and the flare tip body and the wind shield increases up to 850 °C and finally to Complete destruction of the wind shield. In order to avoid such dangers (when the wind is strong), the fuel gas injection should be adjusted to a level to prevent the flame from returning to the flare tip.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

M. Irani, Y. Behjat, Investigating the Performance of the LPG Flare of the Fifth South Pars refinery Using CFD Simulation and Providing a Solution. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2024; 11(1): 8-21. (https://www.ijge.irangi.org/article_722818.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: iranim@ripi.ir, (M. Irani).

Available online 01 September 2024

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

