



Investigating the Medium Pressure Flare Performance of South Pars Gas Refinery in Design and Operational Conditions Using CFD Simulation

Mohammad Irani^{1*}, Yaghob Behjat¹

¹ Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

Received: 25 Apr 2023 Accepted: 30 July 2023

Abstract

In this article, the CFD simulation of the medium pressure flare of South Pars 5th Refinery has been carried out in industrial dimensions in order to investigate the effect of the flare tip geometry on the flare combustion characteristics. CFD model was developed. In order to avoid numerical errors proper meshing was done. The results of CFD simulation show that in the operational conditions, the increase in the temperature of the Flare type body due to the impact of the flame is negligible, so its performance is suitable with the current amount of sweeping gas. Therefore, it is not possible to further reduce the gas sent to the MP flare because the flame may be drawn into the flare network, the temperature of the flare tip surface and the wind shield may increase, which in the long run will cause the flare tip surface to be destroyed.

Keyword: Combustion, Flame, MP Flare, CFD.

* iranim@ripi.ir

Please Cite This Article Using:

Irani, M., Behjat, Y., “Investigating the Medium Pressure Flare Performance of South Pars Gas Refinery in Design and Operational Conditions Using CFD Simulation”, Journal of Farayandno – Vol. 18 – No. 82, pp. 5-23, In Persian, (2023).

بررسی عملکرد فلر با فشار متوسط پالایشگاه گازی پارس جنوبی در شرایط طراحی و عملیاتی با استفاده از شبیه سازی CFD

محمد ایرانی^{1*}، یعقوب بهجت¹

¹ پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

دریافت: 1402/02/05 پذیرش: 1402/05/08

چکیده

در این مقاله، شبیه سازی CFD فلر با فشار متوسط (MP) پالایشگاه پنجم پارس جنوبی (فاز 9 و 10) در ابعاد صنعتی به منظور بررسی اثر هندسه تیپ فلر بر مشخصه های احتراقی فلر (شکل و موقعیت شعله) انجام شده است. به منظور جلوگیری از خطاهای عددی، شبکه بندی مناسب انجام گرفت. اجزاء گاز ارسالی به فلر به محض رسیدن به شعله به محصولات تبدیل شده و احتراق تقریباً کامل می باشد نتایج شبیه سازی CFD نشان می دهد در فلر MP در شرایط عملیاتی افزایش دمای بدنه تیپ فلر بر اثر برخورد شعله قابل اغماض (320 درجه سانتی گراد) است متوسط گازهای ارسالی به فلر در حالت عملیاتی برابر با 5611 کیلوگرم بر ساعت می باشد که نسبت به حالت طراحی، دبی بسیار کمی می باشد. بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی به فلر MP توجیه پذیر نمی باشد چرا که ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه بعلا ارتفاع بسیار کم شعله تشکیل شده و سرعت باد محیطی، دمای سطح تیپ فلر و سپر باد افزایش یابد که در دراز مدت سبب تخریب سطح تیپ فلر و تعویض کلی آن گردد. بنابراین عملکرد فلر MP آن با مقدار گاز جاروبی فعلی مناسب است. در صورتیکه سرعت باد بیشتر از حد معمول باشد (تند بادهای موضعی) باید با مقدار گاز سوختی برگشت شعله به داخل تیپ فلر را کنترل کرد.

کلمات کلیدی: احتراق، شعله، فلر MP، شبیه سازی CFD.

* irananim@ripi.ir

1- مقدمه

فلرینگ بطور گسترده در صنایع پالایشگاهی، پتروشیمی و شیمیایی برای از بین بردن گازهای غیرمطلوب احتراق پذیر توسط سوختن در محیط شعله باز 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 محیط زیست می‌باشد در صنعت عواملی هم چون قطع جریان برق، تغییر در خوراک ورودی به واحدها، بهره برداری بیش از ظرفیت طراحی از واحدهای تولیدی، تعمیر و نگهداری نامناسب، انحراف از روش‌های درست و دستورالعمل‌های بهره برداری، اشتباهات انسانی و ... از جمله عواملی هستند که موجب تغییرات فرآیندی و بالا رفتن فشار در مخازن، برج‌ها و سایر تجهیزات صنعتی می‌گردند [1]. تغییرات فشار به نوبه خود می‌تواند موجب صدمات جبران ناپذیری به تجهیزات صنعتی و در بعضی مواقع صدمات جانی گردد. فلرینگ گازهای همراه یکی از روش‌هایی است که بیشتر در ابعاد فنی به منظور 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. اما این فرآیند خود منشا تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن است.

در صورتی که احتراق در فلر کامل یا به عبارت دیگر بازده فرآیند احتراق در فلر 100% باشد، فقط بخار آب، دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد به عنوان 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 250 ماده سمی شناخته شده نظیر دوده، بنزن، جیوه، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید کربن، آرسنیک، دی‌سولفید کربن، کروم، متان، تولوئن، گازهای اسیدی و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای طی فرآیند فلر به هوا تخلیه می‌شوند که برخی از ترکیبات آزاد شده می‌توانند باعث تشدید بیماری‌های تنفسی از جمله آسم شوند. زاداکبر و همکاران [2]، خطر انتشار ترکیبات سمی برای دو حالت فلر خاموش و روشن در پالایشگاه گاز خانگی 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 صورتی که این شرایط برای مدت طولانی ادامه یابد منجر به مرگ کارکنان خواهد شد. بدین ترتیب، میزان و نوع گازهای انتشار یافته از فلر به محیط زیست تابع بازده احتراق و نوع خوراک ورودی به فلر است [3]. 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. بازده احتراق برای فلری که به خوبی طراحی شده است، معمولاً بالای 90% و گاهی بیش از 98% است. از این رو، طراحی و بهره برداری از این تجهیز فرآیندی در جهت احتراق کامل ترکیبات ورودی امری ضروری است.

مطالعات تجربی و شبیه سازی زیادی درباره فلرها انجام شده است. هوآنگ و همکاران پایداری و رفتار شعله جت احتراقی پروپان را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و روابطی را برای مسیر حرکت جت‌های احتراقی در یک جریان متقاطع ارائه کردند [8]. بورگینگتون و همکاران روشی برای اندازه گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند [9]. جانسون 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 موثر است [10]. نتایج تحقیقات کوستیوک و

جانسون نشان داد که فلرها در هوای ساکن راندمان بالایی داشته و افزایش سرعت وزش باد باعث افت بازده می شود [11]. کاستشیپرا و ادگار، با شبیه سازی CFD اثر تریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرها در مقیاس آزمایشگاهی با شعله غیر پیش آمیخته بررسی کردند [12]. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نسبت های خیلی بالای بخار به سوخت و هوا به سوخت باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می شود. کاستشیپرا و ادگار¹، در تحقیق دیگری عملکرد یک فلر با سرعت های مختلف باد را بررسی کردند. در این مطالعه از یک مکانیسم شامل پنج واکنش و سپس مکانیسمی شامل 23 جزء و 74 واکنش استفاده کردند و رفتار فلر صنعتی و انتشار گاز از آن بررسی شده است. نتایج شبیه سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی هم خوانی خوبی نشان می دهد [13].

اثر وزش باد بر بازده فلرهای صنعتی با استفاده از روشهای CFD توسط کاستشیپرا و ادگار مورد بررسی قرار گرفته است [14]. 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 کوتاه تر از شعله فلر بدون وزش باد می باشد. نتایج شبیه سازی آنها توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. لاوال² و همکاران اثر وزش باد و سرعت جت خروجی از فلر را با استفاده از مدلسازی CFD مورد بررسی قرار دادند [15]. نتایج حاصل از مدل سازی با داده های تجربی اعتبار سنجی گردید. لانگمن و ناتان، اثر نوسانات شدید ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط یک فلر پالایشگاهی را گزارش کردند [16]. سینگ³ و همکاران، با استفاده از یک مدل CFD فلر صنعتی و آزمایشگاهی را شبیه سازی کردند و مدل آنها توانست بازده فلر را با خطای پنج درصد برای فلر صنعتی محاسبه کند [17]. سینگ و همکاران، در مطالعه دیگری با هدف 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 آنها با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر پیش بینی شده برای راندمان احتراق انحراف زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد [18]. جوادی و همکاران اثر وزش باد بر شکل شعله به صورت عددی انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در سرعت های بالاتر از پنج متر بر ثانیه به علت نشست شعله بر روی بدنه، دمای بدنه بالا می رود [19]. صباغ و رهبر تأثیر شکل تیپ فلر بر بیشینه دمای جداره نوک فلر را مطالعه کردند [20]. در این تحقیق نشان داده شد که در هندسه استوانه ای با وجود وزش باد طول شعله بلندتر از هندسه های دیگر است. جوادی و همکاران [21]، 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 آنها 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 کانتینیلو⁴ انجام شد [22]. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه سازی، هندسه فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند.

¹ Castiñeira and Edgar

² Lawal

³ Singh

⁴ Marra and Continillo

با توجه به مباحث مطرح شده در منابع متعدد میتوان چنین نتیجه گرفت که تحقیقات انجام یافته در خصوص فلرها با استفاده از مدل سازی CFD، بیشتر محدود به فلرهایی 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 تاثیر قابل توجه آشفته گی بر سینتیک واکنش های احتراقی دانست.

با توجه به مطالعات کتابخانه ای انجام یافته و شناسایی پارامترهای تاثیر گذار، در این پژوهش، شبیه سازی فلر MP 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 تاثیر مولفه های ذکر شده بر پایداری شعله و عدم پس کشیدن شعله به داخل تیپ فلر با استفاده از تحلیل CFD مورد بررسی قرار گرفت.

2- مدل سازی CFD احتراق در فلر و معادلات حاکم

برای مدل سازی هر جریان 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.

- معادله پیوستگی (بقای جرم)

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

معادله (1) شکل کلی معادله قانون پیوستگی می باشد که در صورت وجود واکنش در سیستم مقدار سمت راست معادله با توجه به سینتیک واکنش غیر صفر خواهد بود. در 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.

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

که مقدار Y_i برابر کسر جرمی هر جزء می باشد و R_i نرخ تولید این جزء در اثر واکنش های شیمیایی است. معادلات 1 و 2 به ترتیب شکل کلی معادلات پیوستگی جرم و اجزاء می باشند. با توجه به تک فازی بودن مساله مقدار پارامترهای S_i و S_m در این شبیه سازی صفر می باشد.

- معادله بقای اندازه حرکت

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

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

که در آن \bar{v}' نوسان ناشی از آشفته گی 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، $\rho \bar{v}' \bar{v}'$ ، عبارت های اضافه ای هستند که از تجزیه متغیرهای آشفته به مقادیر متوسط و نوسانی به وجود می آیند. این عبارات برای کامل شدن معادله 3 باید مدل شوند. برای این منظور از مدل آشفته گی استفاده می گردد.

در این پژوهش از مدل آشفته گی k-ε استاندارد استفاده شده است. مدل k-ε یک مدل نسبتاً ساده کامل می باشد که برای تشریح آشفته گی بکار می رود و برای انتقال خواص آشفته گی توسط جریان متوسط و نفوذ و برای تولید و استهلاک

آشفتگی مفید می‌باشد. در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی (k) و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی آشفته (ε) بصورت همزمان حل می‌شوند. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ شامل دو معادله زیر می‌باشد:

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

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

در نتیجه حل معادلات 4 و 5 مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش را بصورت زیر محاسبه کرد:

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

- معادله بقای انرژی

بقای انرژی برای یک المان سیال با رابطه زیر مدل‌سازی می‌گردد.

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

که k_{eff} ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر بوده و $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ انرژی کل سیال در حجم کنترل می‌باشد. همچنین 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 می‌باشد و برای یک سیستم همراه با واکنش شیمیایی مقدار S_h به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

که h_j^0 آنتالپی تشکیل هر جزء و R_j نرخ تولید حجمی اجزاء مختلف در سیستم است.

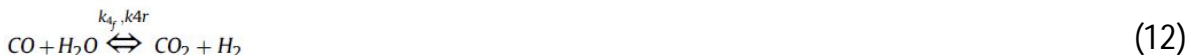
- بررسی مدل‌های سینتیکی بکار رفته

برای سینتیک متان مجموعه واکنش‌های پیشنهادی توسط اسمیت و همکاران، کیم و همکاران و وستبروک و درایر، به طور گسترده برای شبیه‌سازی احتراق مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق با توجه بررسی‌های انجام گرفته پارامترهای سینتیکی بکار رفته بطور مختصر تشریح می‌شود.

در سینتیک ارائه شده توسط اسمیت و همکاران معادلات استوکیومتری برای احتراق متان طبق رابطه‌های 9 تا 12 بیان می‌شوند. ثابت‌های سرعت واکنش برای سه واکنش اول (9 تا 11) با k_1 ، k_2 و k_3 نشان داده شده است. واکنش شیفت آب گاز⁵ (معادله 12) 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 1 آورده شده است.



⁵ Water gas shift (WGS) reaction



جدول 1- پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک اسمیت و همکاران و معادلات سرعت آنها

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

با توجه به غلظت نسبتاً پایین مقادیر اتان، پروپان، بوتان و پنتان، هگزان، هپتان و اکتان در خوراک ورودی به فلر کم فشار (HP)، برای شبیه‌سازی احتراق این اجزا از معادله استوکیومتری تک واکنشی پیشنهاد شده توسط وستبروک و درایر، استفاده می‌شود که طبق رابطه 13 بیان می‌شود.



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 2 آورده شده است.

جدول 2- پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک وستبروک و درایر و معادله سرعت آن

(واحدها بر حسب m، s، z/kmol، K و mol)

معادله سرعت (kmol/s)	انرژی فعال سازی (z/kmol)	ضریب آرنیوس
$[C_2H_6]^{0.2}[O_2]^{1.3}$	$2/027 \times 10^8$	$2/119 \times 10^{11}$
$[C_3H_8]^{0.1}[O_2]^{1.65}$	$1/256 \times 10^8$	$5/96 \times 10^9$
$[C_4H_{10}]^{0.15}[O_2]^{1.6}$	$1/256 \times 10^8$	$4/161 \times 10^9$
$[C_5H_{12}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$3/599 \times 10^9$
$[C_6H_{14}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$3/205 \times 10^9$
$[C_7H_{16}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$2/868 \times 10^9$
$[C_8H_{18}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$2/587 \times 10^9$

- 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 مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

در مدل P1 معادله انتقال تشعشعی یک معادله پخشی است، که حل معادله را ساده می‌کند. این مدل اثرات پراکنش را در نظر می‌گیرد.

برای کاربردهای احتراق که ضخامت نوری بزرگ است به خوبی پاسخ گو است.

مدل P1 می‌تواند به آسانی برای هندسه‌های پیچیده با مختصات خمیده خطی به کار رود.

همان‌طور که ذکر شد مدل تشعشعی 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 14 برای فلاکس تشعشعی به دست می‌آید.

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (14)$$

که در آن G ، تشعشع تابیده و C ، ضریب تابع خطی فاز غیر ایزوتروپیک است. با تعریف Γ به صورت رابطه 14، معادله به شکل 15 ساده شده و در نهایت معادله انتقال به صورت رابطه 23 در می‌آید.

$$\Gamma = \frac{1}{(3(a + \sigma_s) - C\sigma_s)} \quad (15)$$

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (16)$$

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (17)$$

با ترکیب معادلات 15 تا 17 معادله 18 به دست می‌آید.

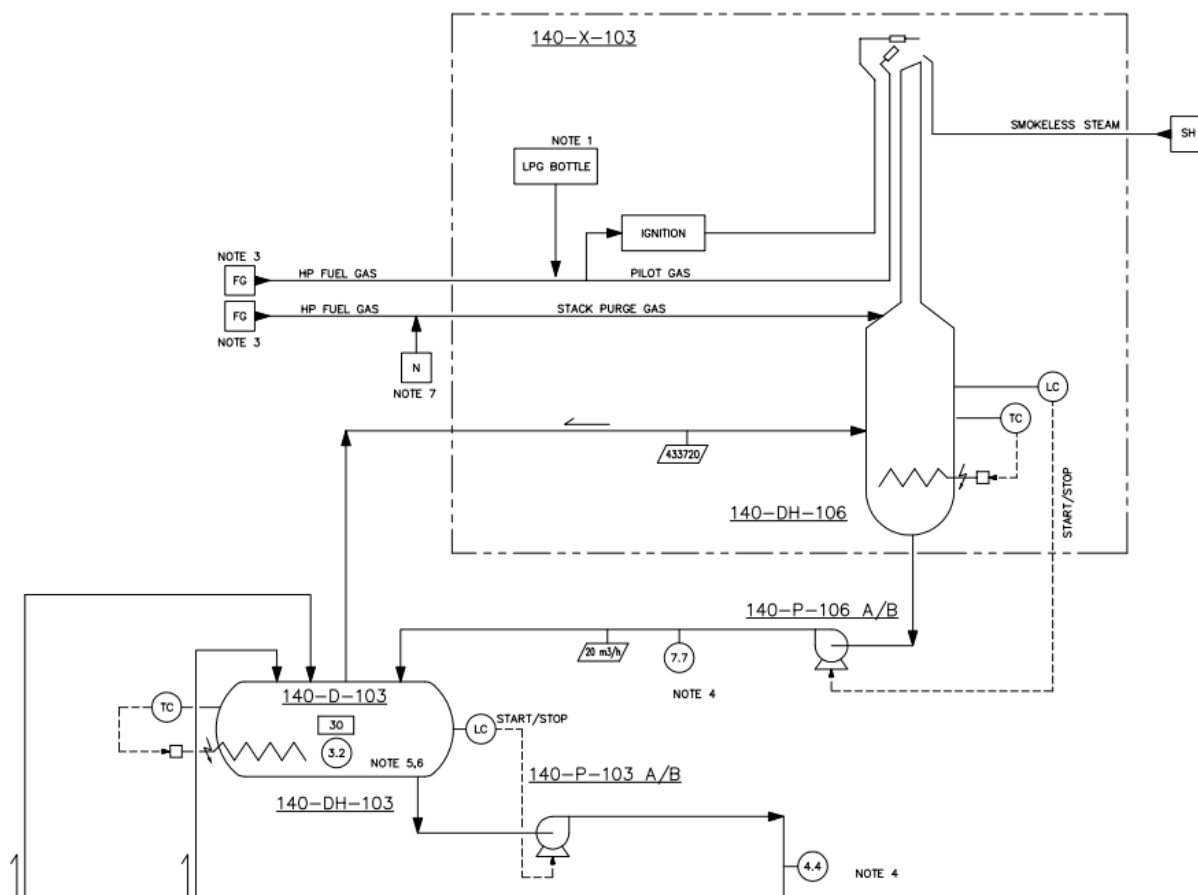
$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (18)$$

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

2- تشریح شبکه فلر MP، ترسیم هندسه و ایجاد شبکه محاسباتی فلر صنعتی

خط فلر MP پالایشگاه برای سوزاندن گازهای فشار متوسط مرطوب و گازهای فشار متوسط خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً گازهای اسیدی مرطوب و یا خشک و سرد خروجی از واحدهای فرآیندی و نیز گازهای فشار متوسط خروجی از شیرهای اطمینان و شیرهای تخلیه اضطراری (که در محدوده فشاری 5 تا 28 barg عمل می‌نمایند) وارد خط فلر MP می‌شود که در شرایط زیر سرعت صوت⁶ کار می‌کند. در شکل 1 نمودار جریانی فلر MP نشان داده شده است همان‌طور که در نمودار جریانی خط فلر MP مشاهده می‌شود برای جلوگیری از ورود جریان مایع به دودکش فلر، گازهای ارسالی به فلر قبل از ورود به دودکش وارد یک ظرف قطره‌گیر می‌شوند. بیشترین فشار دودکش فلر MP در حالت عملکرد نرمال برابر 0/7 barg می‌باشد.

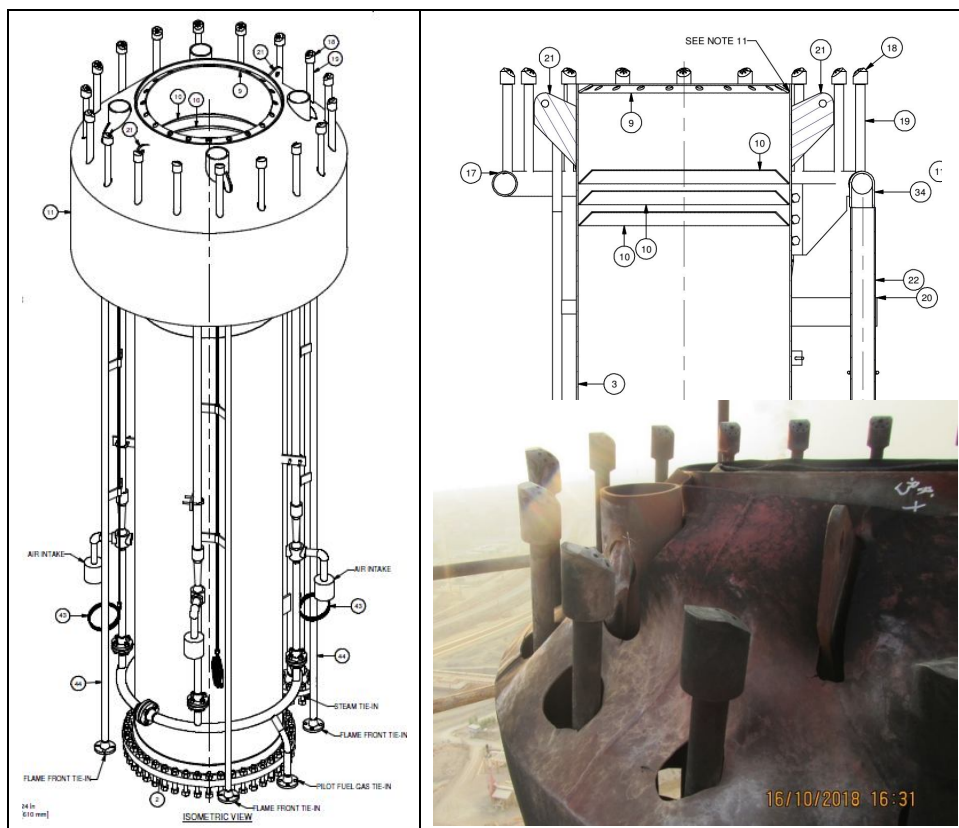
⁶ Sub-Sonic Condition



شکل 1- نمودار جریان‌ی فلر MP

ظرف قطره‌گیر فلر MP مجهز به گرمکن می‌باشد که برای جلوگیری از یخ زدن مایع جدا شده از گاز، دمای ظرف را همواره بالاتر از 10°C نگه می‌دارد. همچنین به منظور جلوگیری از حمل مایعات تشکیل شده در خطوط انتقال در حد فاصل ظرف قطره‌گیر خطوط MP تا دودکش مربوطه، یک ظرف قطره‌گیر یکپارچه در پایین دودکش فلر MP تعبیه شده است.

در شکل 2 شماتیک تیپ فلر MP طبق نقشه‌های طراحی و عکس گرفته شده در حین تعمیرات اساسی پالایشگاه نشان داده شده است. همانطور که در شکل 2 به وضوح مشخص است تیپ فلر شامل استوانه‌هایی با قطر کم و زاویه دار جهت ایجاد جت و تثبیت کننده شعله می‌باشد.



شکل 2- شماتیک طراحی تیپ فلر HP

در جدول 3 ترکیب درصد گازهای ارسالی به فلر MP بر اساس شرایط طراحی و عملیاتی آورده شده است.

جدول 3- ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر MP

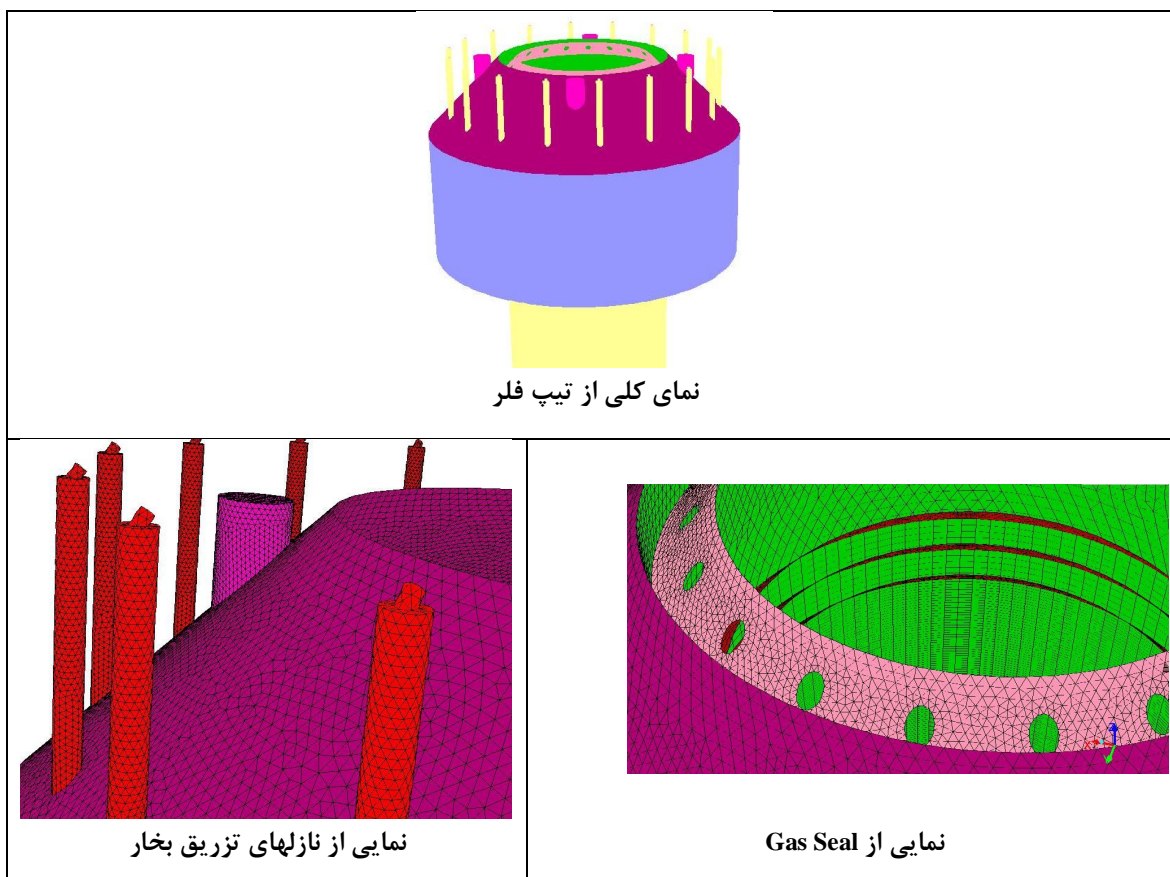
اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد (%mol)	اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد (%mol)
H ₂ O	7.4930	C ₄ H ₁₀	0.006
N ₂	0.0133	C ₅ H ₁₂	0.0015
CO ₂	54.3920	C ₆	0.0593
CH ₄	0.5489	C ₇	0.0148
C ₂ H ₆	0.0422	C ₈	0.0107
C ₃ H ₈	0.0131	H ₂ S	37.3336

همچنین در جدول 4 میزان گاز ارسالی به فلر MP بر اساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه پنجم پارس جنوبی گزارش شده است.

جدول 4- میزان گاز ارسالی به فلر MP بر اساس شرایط عملیاتی

مقدار عملیاتی	مقدار طراحی	نوع جریان
5611	30806	میزان گاز ارسالی به فلر (Kg/hr)
33/8	1397	میزان بخار (Kg/hr)
0	0	میزان Assist Gas (Kg/hr)
26/3	20	میزان Purge Gas (NM ³ /hr)
5/7	5/7	میزان Pilot Gas (NM ³ /hr)

اولین گام جهت شبیه‌سازی CFD ایجاد هندسه در نرم‌افزار مناسب و مطابق با نقشه‌های طراحی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی طراحی تیپ فلر و تاثیر هر کدام از بخش‌ها و جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده تیپ فلر، لازم است تمام جزئیات و المان‌های تیپ فلر بر اساس نقشه‌های طراحی در ترسیم هندسه رعایت شود. در این شبیه‌سازی همانطور که در شکل 3 نشان داده است، ترسیم هندسه تیپ فلر با جزئیات مربوطه انجام شده است. نرم افزار استفاده شده جهت ساخت هندسه فلر، GAMBIT و ورژن آن 2.4.6 است. همانطور که در شکل 3 ملاحظه می‌شود، هندسه ترسیم شده منطبق با شماتیک فلر HP نشان داده شده بر اساس نقشه‌های طراحی و عکس‌های اخذ شده از تیپ فلر به هنگام تعمیرات اساسی می‌باشد. بطوریکه هندسه ترسیم شده فاقد هر گونه ساده‌سازی بوده و تمام جزئیات تیپ فلر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.



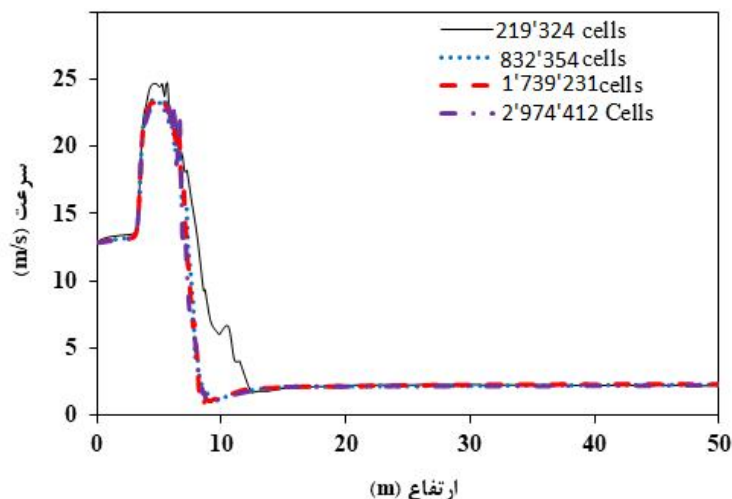
شکل 3- نمای از هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده

با توجه به هندسه ترسیم شده فلر، کیفیت شبکه محاسباتی تأثیر چشم‌گیری بر نتایج شبیه‌سازی CFD دارد. از این رو برای دستیابی به نتایج صحیح و با کمترین خطای ممکن در مطالعه CFD شبیه‌سازی فرایند احتراق در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن تمام پدیده‌های انتقال (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش‌های شیمیایی) انجام پذیرفت. بر این اساس فضایی مکعب مستطیل شکل به ابعاد $3 \times 20 \times 20$ m که 16 متر بالای دودکش در آن قرار دارد به عنوان فضای شبیه‌سازی طراحی شد.

ایجاد شبکه محاسباتی مناسب موجب همگرایی بهتر در حل معادلات و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند 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، نازل‌های تزریق بخار، آب بند گازی⁷ و بخشهای داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند تا اطلاعات دقیقتری در این نواحی بدست آید. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه 6 وجهی (شبکه منظم) برای کاهش خطاهای عددی، همانند نفوذ کاذب استفاده شده است. در این تحقیق هدف شبیه سازی فلر پرفشار مدنظر است بنابراین عامل اختلاط فشار می باشد.

برای بررسی استقلال نتایج محاسباتی از شبکه، مش‌بندی طراحی شده با اندازه‌های مختلف در دامنه محاسباتی اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نرم افزار استفاده شده جهت شبیه سازی فلر، FLUENT و ورژن آن 19 می‌باشد. در این تحقیق نتایج چهار مش‌بندی با تعداد 219,324، 832,354، 1,739,231 و 2,974,412 سلول (حجم کنترلی) که در نهایت برای بررسی استقلال نتایج مدل‌سازی از مش‌بندی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه می‌شود. شکل 4 مقایسه سرعت پیش‌بینی شده توسط مش‌بندی‌های مختلف در امتداد محور تیپ فلر را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در ارتفاع بالاتر از 50 متر، مقدار سرعت ثابت بود، برای این‌که تغییرات سرعت با جزئیات بیشتری قابل مشاهده باشد، تغییرات سرعت فقط در این بازه نشان داده شده است. همچنین شکل 4 تغییرات دمای پیش‌بینی شده در راستای خط افقی عمود بر جهت وزش باد، در ارتفاع 8 متر و به فاصله 2 متر از فلر را نشان می‌دهد. از شکل 4 مشاهده می‌شود که تغییر تعداد حجم‌های کنترلی از تعداد 219,324 به 832,354 تاثیر نسبتاً قابل ملاحظه‌ای در سرعت‌های پیش‌بینی شده دارد، ریزتر کردن مش‌ها و رساندن تعداد سلول‌ها به 2,974,412 تاثیر قابل توجهی در سرعت‌های پیش‌بینی شده نداشته است. شکل 4 نشان می‌دهد که ریزتر کردن مش و افزایش تعداد سلول‌ها از 832,354 به 1,739,231 گرچه تاثیری در سرعت پیش‌بینی شده جریان گاز نداشته، اما سبب تغییر در دمای پیش‌بینی شده گردیده است. با این حال افزایش بیشتر تعداد سلول‌ها در سرعت و دمای پیش‌بینی شده تاثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. بنابراین شبکه هیبریدی طراحی شده با مجموع 1,739,231 سلول به‌عنوان شبکه بهینه و پاسخ‌های محاسباتی حاصل از آن به‌عنوان نتایج مستقل از شبکه‌بندی برای ادامه تحقیق بر روی فلر صنعتی HP مورد استفاده قرار گرفت.

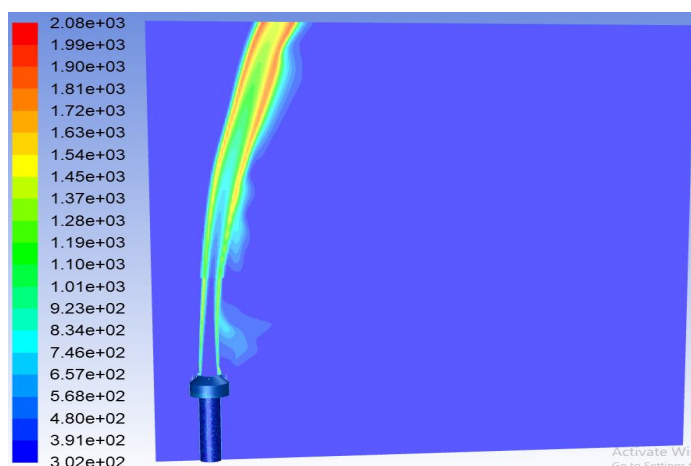
⁷ Gas Seal



شکل 4- سرعت پیش بینی شده جریان گاز در امتداد خط گذرنده از مرکز فلر MP تا ارتفاع 50 متر

3- نتایج شبیه سازی فلر MP

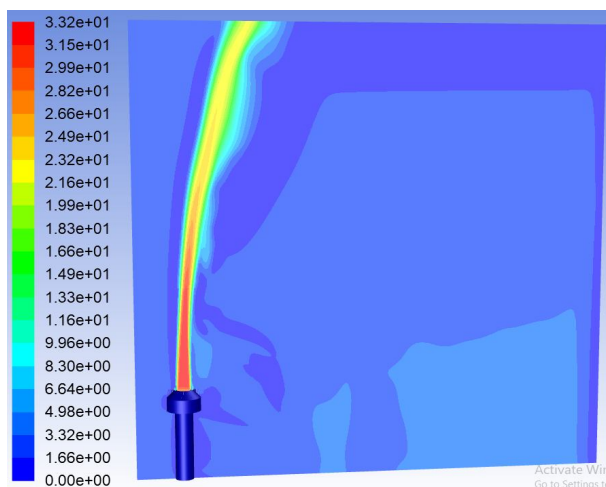
خوراک با مشخصات ارائه شده در جدول 3 گزارش، وارد تیپ فلر MP می شود و اکسیژن مورد نیاز از طریق هوای محیط با سرعت باد وارد ناحیه احتراق می گردد. پس از انجام واکنش، شعله تشکیل شده و محصولات حاصل از احتراق تولید می گردند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو حالت طراحی و عملیاتی ارائه می گردد. در شکل 5 پروفایل دمایی و شکل شعله تشکیل شده در فلر MP در شرایط طراحی آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است بعلت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل می شود. بطوریکه ارتفاع شعله تشکیل شده بالغ بر 25 متر می باشد و از دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده خارج گردیده است.



شکل 5- پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر MP (شرایط طراحی)

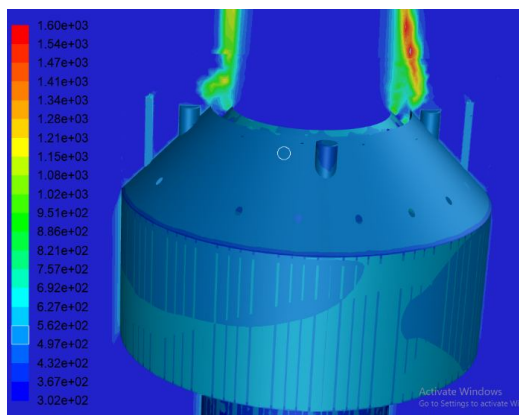
در شکل 6 پروفایل سرعت و شکل شعله تشکیل شده در فلر MP در شرایط طراحی آورده شده است. مطابق با شکل 6 به علت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل شده و در

مرکز شعله مقدار سرعت به حدود 33 m/s میرسد. بعد از انتشار محصولات حاصل از احتراق طبیعتاً سرعت شعله تشکیل شده کاهش پیدا می‌کند.



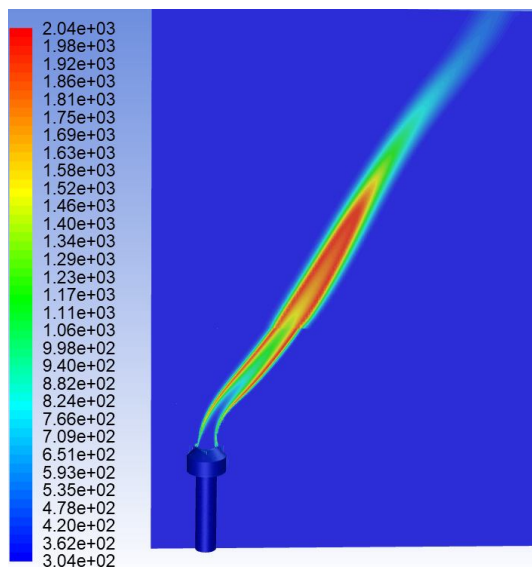
شکل 6- پروفایل سرعت و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر MP (شرایط طراحی)

همچنین کانتور دما در ناحیه سپر باد و دهانه نوک فلر در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، هیچ نوع برگشت جریانی به داخل شبکه فلر وجود ندارد و دمای سپر باد و دمای دهانه نوک فلر بالا نرفته و امکان برگشت شعله به داخل شبکه فلر منتفی می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد فلر MP در شرایط طراحی مناسب می‌باشد و نیازی به باز طراحی آن در شرایط کارکردی طراحی وجود ندارد.

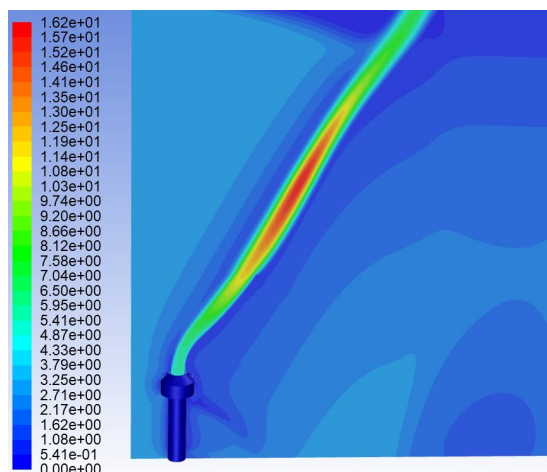


شکل 7- پروفایل دما در ناحیه سپر باد و دهانه نوک فلر MP در شرایط طراحی

در شکل 8 و شکل 9 پروفایل دمایی (شکل شعله) و سرعت گازهای حاصل از احتراق در فلر MP در شرایط عملیاتی آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است به علت دبی نسبتاً زیاد، ارتفاع شعله کشیده‌تر بوده و در اثر سرعت باد، شعله در جهت باد بصورت ملایم متمایل شده است. چون جهت وزش باد از سمت چپ به راست می‌باشد، شعله به سمت راست کشیده شده است. همچنین وجود دمای بالا در مرکز شعله سبب شده است تا با کاهش دانسیته، سرعت مقدار بیشتری داشته باشد.



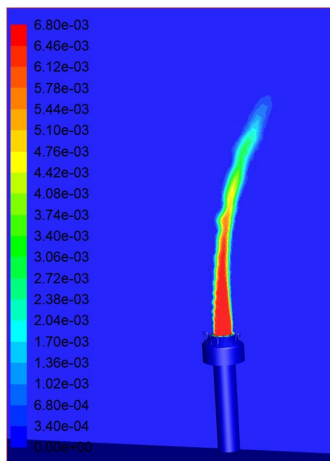
شکل 8- پروفایل دمای شعله فلر MP (شرایط عملیاتی)



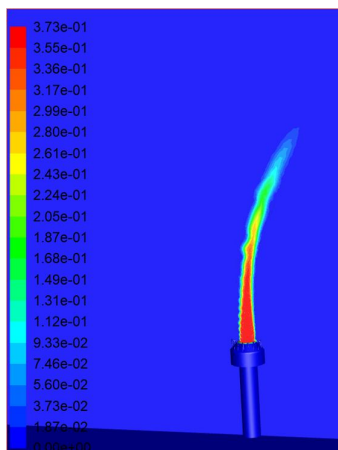
شکل 9- پروفایل سرعت (m/s) و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر MP (شرایط عملیاتی)

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط نرمال که در شکل 7 گزارش شده است به علت دبی پایین گازهای ارسالی به فلر و در اثر سرعت باد، شعله به میزان کمی به سمت سپر باد منحرف می‌گردد. بنابراین دمای سپر باد به علت برخورد و تماس با شعله افزایش کمی دارد. از طرف دیگر با توجه به میزان فلرینگ فلر MP (مطابق با بازدید میدانی از واحد صنعتی و اطلاعات اخذ شده) متوسط گازهای ارسالی به فلر در حالت عملیاتی برابر با 5611 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد که نسبت به حالت طراحی، دبی بسیار کمی می‌باشد. بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی به فلر MP توجیه پذیر نمی‌باشد چرا که ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه بعلا ارتفاع بسیار کم شعله تشکیل شده و سرعت باد محیطی، دمای سطح تیپ فلر و سپر باد افزایش یابد که در دراز مدت سبب تخریب سطح تیپ فلر و تعویض کلی آن گردد. در شکل 7 این مساله بخوبی نشان داده شده است که در اثر سرعت باد محیطی تا اندازه‌ای شعله تشکیل شده با بدنه تیپ فلر و سپر باد تماس مستقیم پیدا نموده است. در شکل‌های 10 الی 12 پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر MP شامل ($\text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها

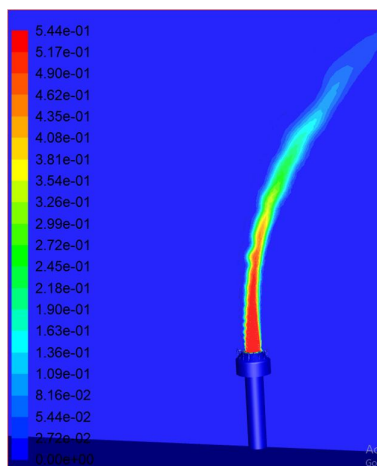
ملاحظه می‌شود، اجزاء خوراک گازی وقتی در بالای تیپ فلر به شعله (جبهه واکنش) می‌رسند در واکنش احتراق شرکت کرده و به محصولات تبدیل می‌شوند. پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق (SO_2 , CO , H_2) در شکل‌های 13 الی 15 نشان داده شده است.



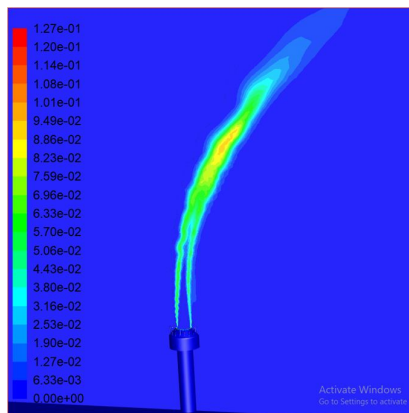
شکل 10- پروفایل کسر مولی CH_4 فلر MP



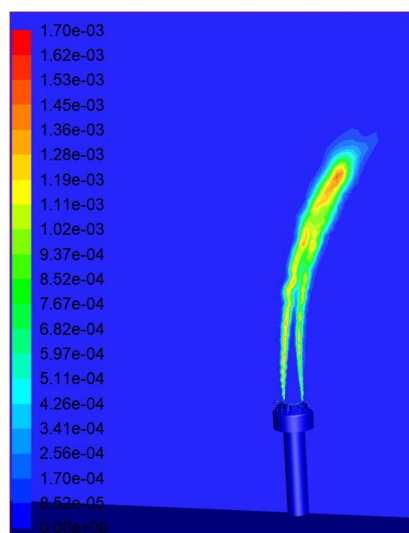
شکل 11- پروفایل کسر مولی H_2S فلر MP



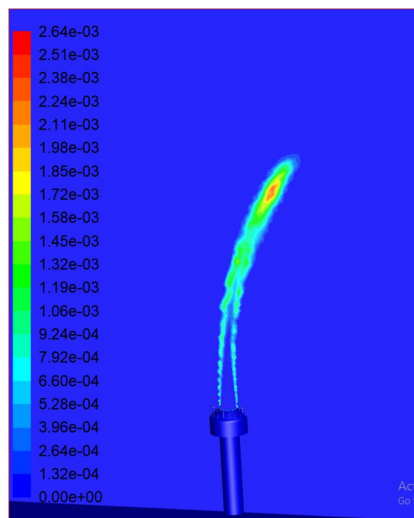
شکل 12 - پروفایل کسر مولی CO_2 فلر MP



شکل 13- پروفایل کسر مولی SO_2 فلر MP



شکل 14- پروفایل کسر مولی CO فلر MP



شکل 15- پروفایل کسر مولی H_2 فلر MP

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی CFD فلر MP پالایشگاه در مقیاس صنعتی و در شرایط عملیاتی و کارکردی انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اثر تمام پدیده‌های انتقال مرتبط شامل (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش‌های شیمیایی) همچنین شرایط محیطی شامل سرعت باد در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی تیپ فلر و تاثیر هر کدام از جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده احتراق در تیپ فلر، تمام جزئیات هندسی تیپ فلر بر اساس نقشه‌های طراحی در نظر گرفته شده است. بطوریکه هندسه ترسیم شده فاقد هر گونه ساده‌سازی می‌باشد. با ایجاد شبکه محاسباتی مناسب همگرایی بهتر در حل معادلات حاصل شد. بطوریکه در اطراف تثبیت کننده شعله، نازل‌های تزریق بخار، Gas Seal و بخش‌های داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه‌بندی منظم برای کاهش خطاهای عددی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD شامل پروفایل دمایی (شکل شعله) و سرعت گازهای حاصل از احتراق در فلر MP در شرایط عملیاتی نشان می‌دهد که افزایش دمای بدنه تیپ فلر بر اثر برخورد شعله کم است بنابراین عملکرد آن با مقدار گاز جاروبی فعلی مناسب است. بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی به فلر MP توجیه پذیر نمی‌باشد چرا که ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه بعلا ارتفاع بسیار کم شعله تشکیل شده و سرعت باد محیطی، دمای سطح تیپ فلر و سپر باد افزایش یابد که در دراز مدت سبب تخریب سطح تیپ فلر و تعویض کلی آن گردد. در صورتیکه سرعت باد بیشتر از حد معمول باشد (تند بادهای موضعی) باید با مقدار گاز سوختی برگشت شعله به داخل تیپ فلر را کنترل کرد.

5- منابع

- [1] آشنایی با فلر، مدیریت بهداشت و ایمنی محیط زیست شرکت ملی پالایش و پخش، 1391.
- [2] D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, L. B. Evans, 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.
- [3] D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, R. Corporation, *FLARES*, 1995.
- [4] A. Bahadori, "Blow-Down and Flare Systems", *Natural Gas Processing*, Elsevier, pp. 275–312, 2014.
- [5] B. Karthikeyan, "Manage Change to Flare Systems", <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2020/January>.
- [6] Y. AKTAŞ, Ö. ÖZARIK, "Dynamics of operation for flare systems", *Digital Refining, Combustion Systems and Engineering*, Apr 2014.
- [7] A. Kumar, S. Phadatare, P. Deore, "A guide on smokeless flaring: air/system assisted and high pressure flaring", *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, Vol. 4, Issue 12, 2020.
- [8] R. F. Huang, 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.
- [9] E. Bourguignon, M. R. Johnson, L. 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.
- [10] M. R. Johnson, D. J. Wilson, 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.

- [11] L. Kostiuk, M. Johnson, G. Thomas, "University of Alberta Flare Research Project Final Report", November 1996–September 2004", 2004.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] D. Castiñeira, 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.
- [15] M. S. Lawal, M. Fairweather, D. B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, 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.
- [16] A. S. Langman, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 28، شماره دو، 1393.
- [20] ر. صباغ، ن. رهبر، "بررسی تاثیر شکل هندسی بر بیشینه دمای جداره ی نوک فلر و توزیع آلاینده های خروجی آن"، مجله مدل سازی در مهندسی، جلد 4، شماره 4، 1394.
- [21] 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.
- [22] F. S. Marra, G. Continillo, "Dynamic Numerical Simulation of an Enclosed Flare", in *Combustion Colloquia, XXXII Event of The Italian Section of The Combustion*, pp. 1–6., 2009.