

# بررسی عملکرد فلر پر فشار پالایشگاه پنجم پارس جنوبی و عوامل مؤثر بر عملکرد آن با استفاده از شبیه‌سازی CFD

محمد ایرانی<sup>\*</sup>، یعقوب بهجت

استادیار، پژوهشکده گاز، پژوهشگاه صنعت نفت، کد پستی ۱۱۱۳۱۶۵۸۴۱، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: irananim@ripi.ir

مقاله‌ی علمی - پژوهشی

صفحه ۶۹ - ۸۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

## چکیده

در این تحقیق، شبیه‌سازی CFD فلر پر فشار (HP) پالایشگاه پنجم پارس جنوبی در ابعاد صنعتی به‌منظور ارزیابی اثرات پارامترهای هندسی تیپ فلر بر مشخصه‌های احتراقی فلر (شکل و موقعیت شعله) انجام شده است. مدل CFD با در نظر گرفتن تمام پدیده‌های انتقال (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم) توسعه یافت. به‌منظور جلوگیری از خطاهای عددی، شبکه بندی مناسب انجام گرفت. نتایج حاصل از مدل محاسباتی توسعه یافته شامل پروفایل دمایی و سرعت (شکل و ماهیت شعله)، پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر و همچنین پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق می باشد. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان میدهد در فلر HP در شرایط عملیاتی افزایش دمای بدنه تیپ فلر بر اثر برخورد شعله قابل اغماض (حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) است بنابراین عملکرد آن با مقدار گاز جاروبی فعلی مناسب است؛ بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی (۸۹۶ کیلوگرم بر ساعت) به فلر HP توجیه پذیر نمی‌باشد چراکه ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه به علت 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 صورتی که سرعت باد بیشتر از حد معمول باشد (تند بادهای موضعی) باید با مقدار گاز سوختی برگشت شعله به داخل تیپ فلر را کنترل کرد.

کلیدواژه‌ها: احتراق، شعله، فلر HP، شبیه‌سازی CFD<sup>۱</sup>

## ۱. مقدمه

فلرینگ به‌طور گسترده در صنایع پالایشگاهی، پتروشیمی و شیمیایی برای از بین بردن گازهای غیر مطلوب 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 همچون قطع جریان برق، تغییر در خوراک ورودی به واحدها، بهره‌برداری

1.High Pressure

2.Computational Fluid Dynamic





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؛ اما این فرآیند خود منشأ تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن است.

در صورتی که احتراق در فلر کامل یا به‌عبارت‌دیگر بازده فرآیند احتراق در فلر ۱۰۰٪ باشد، فقط بخار آب، دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد 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، 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. زاد اکبر 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 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 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. بازده احتراق برای فلری که به خوبی طراحی شده است، معمولاً بالای ۹۰٪ و گاهی بیش از ۹۸٪ است. از این رو، طراحی و بهره‌برداری از این تجهیز فرآیندی در جهت احتراق کامل ترکیبات ورودی امری ضروری است.

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 [۸]. بورگینگتون و همکاران روشی برای اندازه‌گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند [۹]. جانسون و همکاران با انجام آزمایشاتی درباره شعله‌های نفوذی در مسیر جریان سیال، نشان دادند که جریان باد و محتوای انرژی سوخت مستقیماً بر روی راندمان احتراق مؤثر است [۱۰]. نتایج تحقیقات کوستیوک و جانسون نشان داد که فلرها در هوای ساکن راندمان بالایی داشته و افزایش سرعت وزش باد باعث افت بازده می‌شود [۱۱]. کاستشیپرا و ادگار، با شبیه‌سازی CFD اثر تزریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرها در مقیاس آزمایشگاهی با شعله غیر پیش آمیخته بررسی کردند [۱۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نسبت‌های خیلی بالای بخار به سوخت و هوا به سوخت باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می‌گردد.

کاستشیپرا و ادگار<sup>۱</sup>، در تحقیقی دیگر 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 [۱۳].

اثر وزش باد بر بازده فلرهای صنعتی با استفاده از روش‌های CFD توسط کاستشیپرا و ادگار مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. 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. لوال<sup>۲</sup> و همکاران اثر وزش باد و سرعت جت خروجی از فلر را با استفاده از مدل‌سازی CFD مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی اعتبار سنجی گردید. لانگمن و ناتان، اثر نوسانات شدید ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط یک فلر پالایشگاهی را گزارش کردند [۱۶]. سینگ<sup>۳</sup> و همکاران، با استفاده از یک مدل CFD فلر صنعتی و آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کردند و مدل آن‌ها توانست بازده فلر را با خطای پنج درصد برای فلر صنعتی محاسبه کند [۱۷]. سینگ و همکاران، در مطالعه دیگری با هدف بررسی تأثیر نسبت سوخت به هوا و سوخت به بخار، با استفاده از

1. Castiñeira and Edgar

2. Lawal

3. Singh

## ۲. مدل سازی CFD احتراق در فلر و معادلات حاکم

در این تحقیق از نرم افزار ANSYS FLUENT 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].

### • معادله پیوستگی (بقای جرم)

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

معادله (۱) 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.

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

### • معادله بقای اندازه حرکت

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

که در آن  $v'$  نوسان ناشی از آشفتگی بردار سرعت،  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $P$  فشار می باشند. علامت بار روی عبارات این معادله به مقادیر متوسط اشاره می کند. تنش های رینولدز  $(\rho \overline{v'v'})$ ، عبارات های اضافه ای هستند که از تجزیه متغیرهای آشفتگی 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  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. مدل  $k-\epsilon$  یک مدل نسبتاً ساده کامل می باشد که برای تشریح آشفتگی بکار می رود و برای انتقال خواص آشفتگی توسط جریان متوسط و نفوذ و برای تولید و استهلاك آشفتگی مفید می باشد. در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی ( $k$ ) و دیگری برای نرخ استهلاك انرژی آشفتگی ( $\epsilon$ ) به صورت هم زمان حل می شوند. مدل استاندارد  $k-\epsilon$  شامل دو معادله زیر می باشد:

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 با وجود 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 انجام شد [۲۲]. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه سازی، هندسه فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند.

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، آشفتگی زیاد جریان، سینتیک پیچیده و تأثیر قابل توجه آشفتگی بر سینتیک واکنش های احتراقی دانست.

با توجه به مطالعات کتابخانه ای انجام یافته و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار، در این پژوهش، شبیه سازی فلر HP 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.

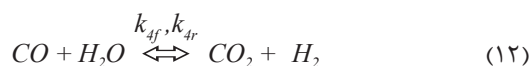
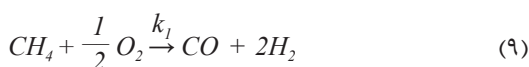


جدول ۱: شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی فلر PH

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

#### • بررسی مدل‌های سینتیکی بکار رفته

برای سینتیک متان مجموعه واکنش‌های پیشنهادی توسط اسمیت و همکاران، کیم و همکاران و وستبروک و درایر، به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی احتراق مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق با توجه بررسی‌های انجام گرفته پارامترهای سینتیکی بکار رفته به‌طور مختصر تشریح می‌شود. در سینتیک ارائه شده توسط اسمیت و همکاران معادلات استوکیومتری برای احتراق متان طبق رابطه‌های (۹) تا (۱۳) بیان می‌شوند. ثابت‌های سرعت واکنش برای سه واکنش اول (۹ تا ۱۱) با  $k_1, k_2, k_3$  نشان داده شده است. واکنش شیفت آب‌گاز<sup>۴</sup> (معادله ۱۲) 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 ۲) آورده شده است.



1. SIMPLE
2. First-order upwind
3. Second-order upwind
4. Water gas shift (WGS) reaction

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

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

در نتیجه حل معادلات (۴) و (۵) مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می‌شود که با استفاده از آن‌ها می‌توان ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش را به‌صورت 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 بود و  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$  باشد.

هم‌چنین برای توضیح کامل‌تر 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  $S_h$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

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

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

#### • روش شبیه‌سازی و شرایط مرزی مورد استفاده

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

جدول ۲: پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک اسمیت [۲۳] و همکاران و معادلات سرعت آن‌ها

| معادله سرعت                           | انرژی فعال‌سازی (J/kmol) | ضریب پیش‌نمایی آرنیوس | ثابت سرعت |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------|
| $[CH_4]^{0.5}[O_2]^{1.25}$            | $1/25 \times 10^4$       | $4/4 \times 10^{11}$  | $k_1$     |
| $[H_2]^{10.5}[O_2]^{2.25}[H_2O]^{-1}$ | $1/68 \times 10^4$       | $2/5 \times 10^{16}$  | $k_2$     |
| $[CO]^{1.5}[O_2]^{10.25}$             | $1/67 \times 10^4$       | $3/16 \times 10^{12}$ | $k_3$     |
| $[CO]^{0.5}[H_2O]^1$                  | $2/83 \times 10^4$       | $5/0 \times 10^{12}$  | $k_{4f}$  |
| $[CO_2][H_2]^{0.5}$                   | $2/39 \times 10^4$       | $9/5 \times 10^{10}$  | $k_{4r}$  |

با توجه به غلظت نسبتاً پایین مقادیر اتان، پروپان، بوتان و پنتان، هگزان، هپتان و اکتان در خوراک ورودی به فلر کم‌فشار (HP)، برای شبیه‌سازی احتراق این اجزا از معادله استوکیومتری تک واکنشی پیشنهاد شده توسط وستبروک و درایر، استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱۳) بیان می‌شود.

$$Fuel + n_2 O_2 \rightarrow n_2 CO_2 + n_3 H_2 O \quad (13)$$

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 ۳) آورده شده است.

جدول ۳: پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به وستبروک [۲۴] و درایر و معادله سرعت آن (واحدها بر حسب mol و m. s, j/kgmol, K)

| معادله سرعت                     | انرژی فعال‌سازی (J/kmol) | ضریب پیش‌نمایی آرنیوس  |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------|
| $[C_2H_6]^{0.2}[O_2]^{1.3}$     | $2/027 \times 10^4$      | $2/119 \times 10^{11}$ |
| $[C_3H_8]^{10.1}[O_2]^{1.65}$   | $1/256 \times 10^4$      | $5/96 \times 10^9$     |
| $[C_4H_{10}]^{0.15}[O_2]^{1.6}$ | $1/256 \times 10^4$      | $4/161 \times 10^9$    |
| $[C_5H_{12}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$ | $1/256 \times 10^4$      | $3/599 \times 10^9$    |
| $[C_6H_{14}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$ | $1/256 \times 10^4$      | $3/205 \times 10^9$    |
| $[C_7H_{16}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$ | $1/256 \times 10^4$      | $2/868 \times 10^9$    |
| $[C_8H_{18}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$ | $1/256 \times 10^4$      | $2/587 \times 10^9$    |

#### • 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 [۱۲].

✓ در مدل P1 معادله انتقال تشعشعی یک معادله پخشی است، که حل معادله را ساده می‌کند.

✓ این مدل اثرات پراکنش را در نظر می‌گیرد.

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

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



اعتبارسنجی مدل از اطلاعات تجربی مقالات معتبر استفاده گردید [۲۵] در (شکل ۱)، ستون (۱) و (۲) به ترتیب مربوط به نتایج شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از سینتیک کلی اسمیت و کیم و ستون (۳) مربوط به فلر آزمایشی جانسون و کاستیاک می‌باشند. کانتورهای دما در سطح میانی تونل باد در ستون (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند که سرعت باد از بالا به پایین از ۱/۳۳ متر بر ثانیه به ۸/۲۷ متر بر ثانیه افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از سینتیک کلی باوجود ساده‌سازی انجام یافته برای واکنش‌ها و اجزاء از لحاظ شکل شعله تطابق خوبی با تصاویر آزمایشگاهی (ستون ۳) دارد.

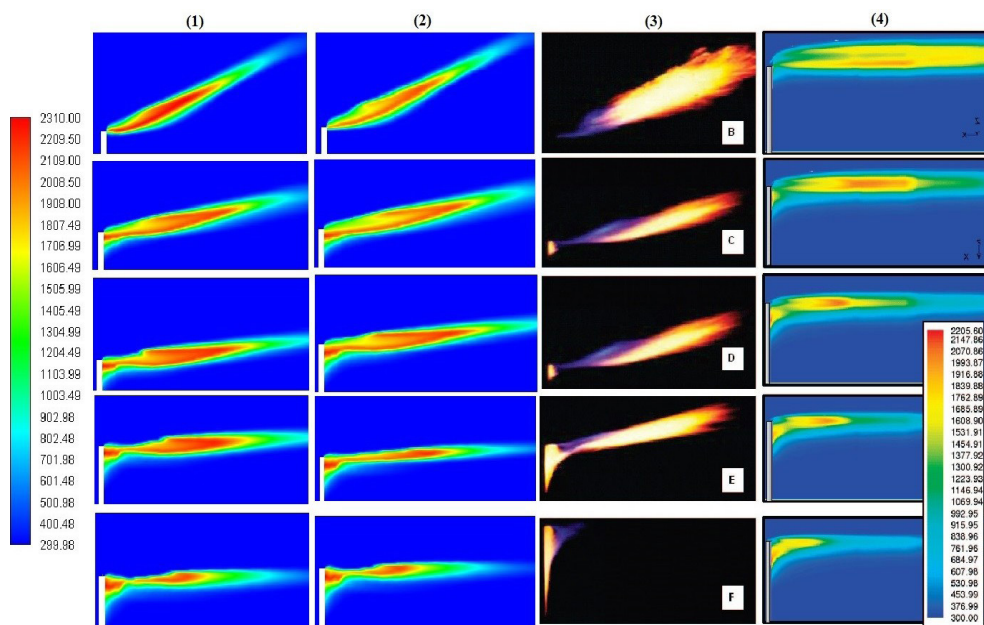
$$q_r = -F \nabla G \quad (16)$$

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

با ترکیب معادلات ۱۵ تا ۱۷ معادله (۱۸) به دست می‌آید. مقدار  $-\nabla q_r$  می‌تواند به‌طور مستقیم در معادله انرژی جای‌گذاری شود و با استفاده از آن مقدار چشمه ناشی از تشعشع را محاسبه کرد.

#### • اعتبارسنجی مدل

با توجه به نبود داده تجربی در مقیاس صنعتی برای



شکل ۱. کانتورهای دما در سرعت‌های مختلف باد در محدوده ۱/۳۳ تا ۸/۲۷ متر بر ثانیه (از بالا به پایین)، ستون (۱) مربوط به نتایج مدل‌سازی انجام شده توسط سینتیک اسمیت، ستون (۲) مربوط به نتایج مدل‌سازی انجام شده توسط سینتیک کیم، ستون (۳) تصویر فلر آزمایشی

HP می‌شود که در شرایط سرعت صوت<sup>۵</sup> کار می‌کند. در شکل (۲) شماتیک تیپ فلر HP طبق نقشه‌های طراحی و عکس گرفته شده در حین تعمیرات اساسی پالایشگاه نشان داده شده است. ارتفاع تیپ فلر یعنی چهار متر با قطر ۹۱/۴۴ سانتی‌متر برای انجام محاسبات در نظر گرفته شد. همان‌طور که در (شکل ۳ و ۲) به‌وضوح مشخص است تیپ فلر شامل استوانه‌هایی با قطر کم و زاویه‌دار جهت ایجاد جت و تثبیت‌کننده شعله می‌باشد.

#### ۳. تشریح شبکه فلر HP، ترسیم هندسه و ایجاد شبکه محاسباتی فلر صنعتی

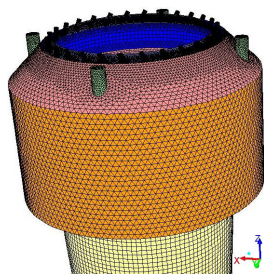
خط فلر پرفشار (HP) پالایشگاه پنجم پارس جنوبی برای سوزاندن گازهای پرفشار مرطوب<sup>۱</sup> و گازهای پرفشار خشک و سرد<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً گازهای پرفشار خروجی از شیرهای اطمینان<sup>۳</sup> و شیرهای تخلیه اضطراری<sup>۴</sup> (که در فشارهای بالاتر از ۲۸ barg عمل می‌نمایند) وارد خط فلر

1. Wet Gas
2. Dry & Cold Gas
3. Pressure Safety Valve (PSV)
4. Blowdown Valve (BDV)
5. Sonic Condition

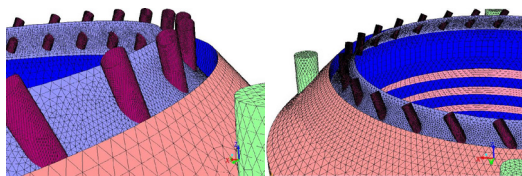
جدول ۵: میزان گاز ارسالی به فلر HP بر اساس شرایط عملیاتی

| نوع جریان                             | مقدار طراحی | مقدار عملیاتی |
|---------------------------------------|-------------|---------------|
| میزان گاز ارسالی به فلر (Kg/hr)       | ۱۱۸۱۷۲۴     | ۸۹۶           |
| میزان بخار (Kg/hr)                    | ۰           | ۰             |
| میزان Assišt Gas (Kg/hr)              | ۰           | ۰             |
| میزان Purge Gas (NM <sup>3</sup> /hr) | ۳۹,۲۳       | ۵۲,۶          |
| میزان Pilot Gas (NM <sup>3</sup> /hr) | ۵,۷         | ۵,۷           |

اولین گام جهت شبیه‌سازی CFD ایجاد هندسه در نرم‌افزار مناسب و مطابق با نقشه‌های طراحی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی طراحی تیپ فلر و تأثیر 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 ۴) نشان داده است، ترسیم هندسه تیپ فلر با جزئیات مربوطه انجام شده است. همان‌طور که در (شکل ۴) 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. به‌طوری‌که هندسه ترسیم شده فاقد هرگونه ساده‌سازی بوده و تمام جزئیات تیپ فلر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.



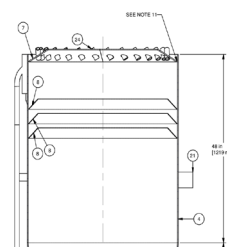
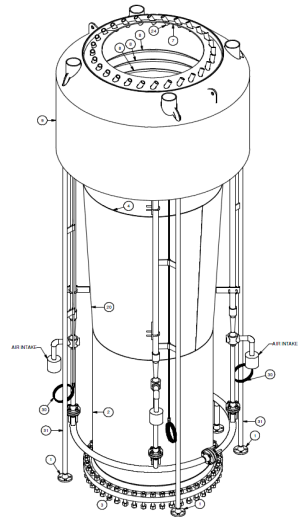
نمای کلی از تیپ فلر



نمایی از Gas Seal نمایی از تثبیت کننده شعله

شکل ۴: 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



شکل ۲. شماتیک طراحی تیپ فلر



شکل ۳. تصویر واقعی از تیپ فلر HP

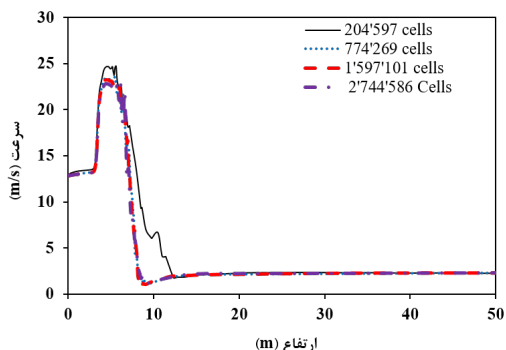
در (جدول ۴) ترکیب درصد گازهای ارسالی به فلر HP بر اساس شرایط طراحی و عملیاتی آورده شده است.

جدول ۴: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر HP

| اجزای ارسالی به فلر           | ترکیب درصد (%mol) | اجزای ارسالی به فلر            | ترکیب درصد (%mol) |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| H <sub>2</sub> O              | ۰,۱۳۶             | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | ۰,۹۵۶۵            |
| N <sub>2</sub>                | ۳,۲۸۷۵            | C <sub>3</sub> H <sub>12</sub> | ۰,۲۶۵۳            |
| CO <sub>2</sub>               | ۱,۸۱۳۸            | C <sub>6</sub>                 | ۰,۰۸۵۵            |
| CH <sub>4</sub>               | ۷۸,۰۱۵۳           | C <sub>7</sub>                 | ۰,۰۴۵۲            |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | ۱۲,۳۲۷۷           | C <sub>8</sub>                 | ۰,۰۲۹۳            |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | ۲,۸۷۴۸            | H <sub>2</sub> S               | ۰,۱۴۴۷            |

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

۱،۵۹۷،۱۰۱ سلول به عنوان شبکه بهینه و پاسخ‌های محاسباتی حاصل از آن به عنوان نتایج مستقل از شبکه‌بندی برای ادامه تحقیق بر روی فلر صنعتی HP مورد استفاده قرار گرفت.

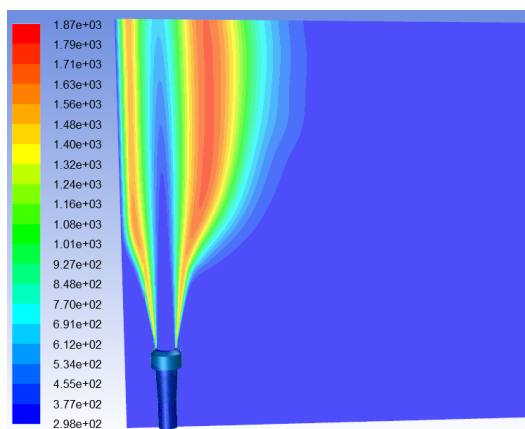


شکل ۵. سرعت پیش‌بینی شده جریان گاز در امتداد خط گذرنده از مرکز فلر MP تا ارتفاع ۵۰ متر

#### ۴. تشریح شبکه فلر HP

خوراک با مشخصات ارائه شده در (جدول ۳) گزارش، وارد تیپ فلر HP می‌شود و اکسیژن مورد نیاز از طریق هوای محیط با سرعت باد وارد ناحیه احتراق می‌گردد. پس از انجام واکنش، شعله تشکیل شده و محصولات حاصل از احتراق تولید می‌گردند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو حالت طراحی و عملیاتی ارائه می‌گردد.

در (شکل ۶) پروفایل دمایی و شکل شعله تشکیل شده در فلر HP در شرایط طراحی آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل می‌شود. به طوری که ارتفاع شعله تشکیل شده بالغ بر ۲۰ متر می‌باشد و از دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده خارج گردیده است.



شکل ۶. پروفایل دما (K) و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر HP (شرایط طراحی)

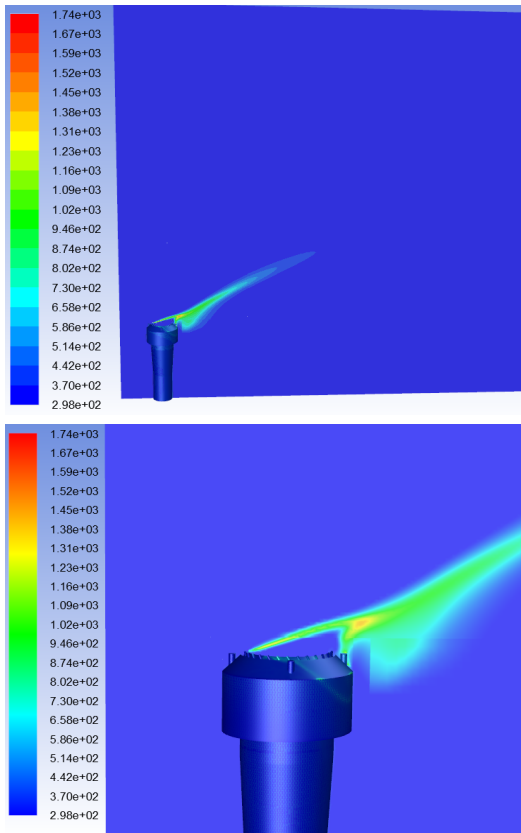
نظر گرفتن تمام پدیده‌های انتقال (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم) انجام پذیرفت. بر این اساس فضایی مکعب مستطیل شکل به ابعاد  $3 \times 2 \times 2$  m که ۱۶ متر بالای دودکش در آن قرار دارد به عنوان فضای شبیه‌سازی طراحی شد.

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 اطراف تثبیت کننده شعله،  $1^{\circ}$  Gas Seal و بخش‌های داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند تا اطلاعات دقیق‌تری 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 شبیه‌سازی فلر پر فشار مدنظر است بنابراین عامل اختلاط فشار می‌باشد.

برای بررسی استقلال نتایج محاسباتی از شبکه، مش‌بندی طراحی شده با اندازه‌های مختلف در دامنه محاسباتی اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در این گزارش نتایج چهار مش‌بندی با تعداد ۲۰۴،۵۹۷، ۷۷۴،۲۶۹، ۱،۵۹۷،۱۰۱ و ۲،۷۴۴،۵۸۶ سلول (حجم کنترلی) که در نهایت برای بررسی استقلال نتایج مدل‌سازی از مش‌بندی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه می‌شود. (شکل ۵) مقایسه سرعت پیش‌بینی شده توسط مش‌بندی‌های مختلف در امتداد محور تیپ فلر را نشان می‌دهد. با توجه به این که در ارتفاع بالاتر از ۵۰ متر، مقدار سرعت ثابت بود، برای این که تغییرات سرعت با جزئیات بیشتری قابل مشاهده باشد، تغییرات سرعت فقط در این بازه نشان داده شده است. همچنین (شکل ۵) تغییرات دمای پیش‌بینی شده در راستای خط افقی عمود بر جهت وزش باد، در ارتفاع ۸ متر و به فاصله ۲ متر از فلر را نشان می‌دهد. از (شکل ۵) مشاهده می‌شود که تغییر تعداد حجم‌های کنترلی از تعداد ۲۰۴،۵۹۷ به ۷۷۴،۲۶۹ تأثیر نسبتاً قابل ملاحظه‌ای در سرعت‌های پیش‌بینی شده دارد، ریزتر کردن مش‌ها و رساندن تعداد سلول‌ها به ۲،۷۴۴،۵۸۶ تأثیر قابل توجهی در سرعت‌های پیش‌بینی شده نداشته است. (شکل ۵) نشان می‌دهد که ریزتر کردن مش و افزایش تعداد سلول‌ها از ۷۷۴،۲۶۹ به ۱،۵۹۷،۱۰۱ گرچه تأثیری 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 تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته است؛ بنابراین شبکه هیبریدی طراحی شده با مجموع



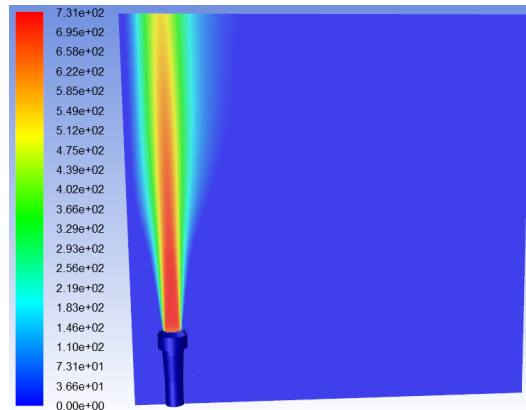
طراحی، ارتفاع شعله کم بوده و به خاطر اثر سرعت باد، شعله در جهت باد متمایل شده است.



شکل ۹. پروفایل دما (K) و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر HP (شرایط طراحی)

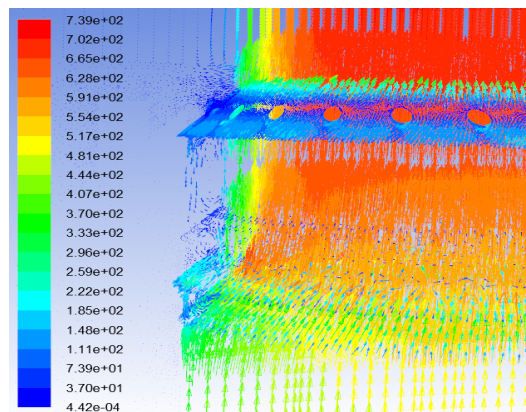
با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در (شکل ۹) گزارش شده است به علت دبی پایین گازهای ارسالی به فلر و در اثر سرعت باد، شعله به میزان کمی به سمت سپر باد منحرف می‌گردد. بنابراین دمای سپر باد به علت برخورد و تماس با شعله افزایش دارد. از طرف دیگر با توجه به میزان فلرینگ فلر HP (مطابق با بازدید میدانی از واحد صنعتی و اطلاعات اخذ شده) متوسط گازهای ارسالی به فلر در حالت عملیاتی برابر با ۸۹۶ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد که نسبت به حالت طراحی، دبی بسیار کمی می‌باشد؛ بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی به فلر HP توجیه‌پذیر نمی‌باشد چراکه ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه به علت 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 ۱۰) این مسئله به خوبی 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 (شکل ۷) پروفایل سرعت و شکل شعله تشکیل شده در فلر HP در شرایط طراحی آورده شده است. مطابق با (شکل ۵) به علت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل می‌شود. به طوری که سرعت گازهای خروجی از تیپ فلر، بالای سرعت صوت می‌باشد که منطبق با ماهیت طراحی فلر HP (فراصوت) می‌باشد.



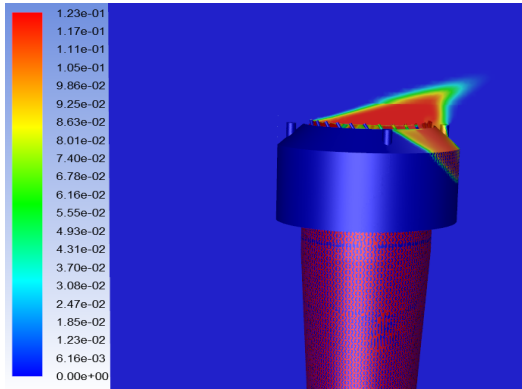
شکل ۷. پروفایل سرعت (m/s) و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر HP (شرایط طراحی)

بردارهای سرعت گازهای احتراقی در تیپ فلر در ناحیه بررسی بردارهای سرعت مشخص است که هیچ نوع برگشت جریانی به داخل شبکه فلر وجود ندارد و امکان برگشت شعله به داخل شبکه فلر منتفی می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد Gas Seal ها مناسب می‌باشد و نیازی به باز طراحی آن‌ها وجود ندارد.

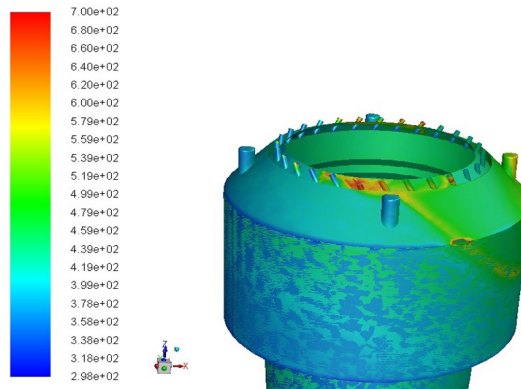


شکل ۸. پروفایل سرعت (m/s) و تأیید عملکرد مناسب HP

در (شکل ۹) پروفایل دمایی و شکل شعله تشکیل شده در فلر HP در شرایط عملیاتی آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت دبی پایین نسبت به شرایط

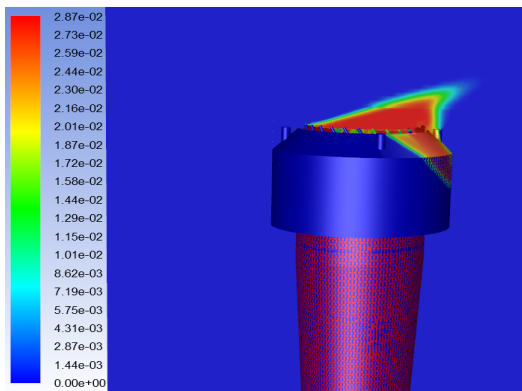


شکل ۱۳. پروفایل کسر مولی C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> فلر HP

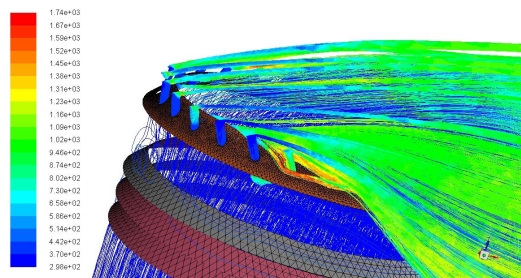


شکل ۱۰. پروفایل دمای (K) سپر باد تیپ فلر HP (شرایط طراحی)

همچنین در (شکل ۱۱) اثر غالب سرعت باد بر حرکت گازهای حاصل از احتراق خروجی از نازل‌های نصب شده در سر تیپ فلر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد به علت سرعت کم گازهای خروجی از نازل‌ها، مسیر آن‌ها تحت تأثیر جهت باد قرار گرفته است.

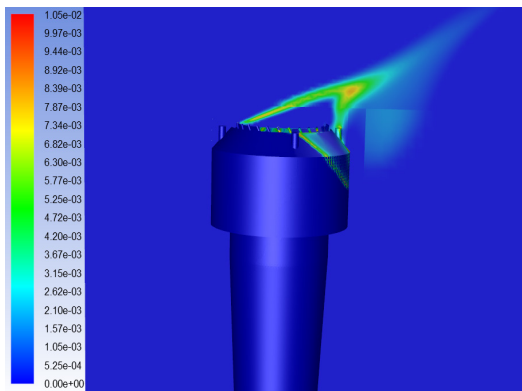


شکل ۱۴. پروفایل کسر مولی C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> فلر HP

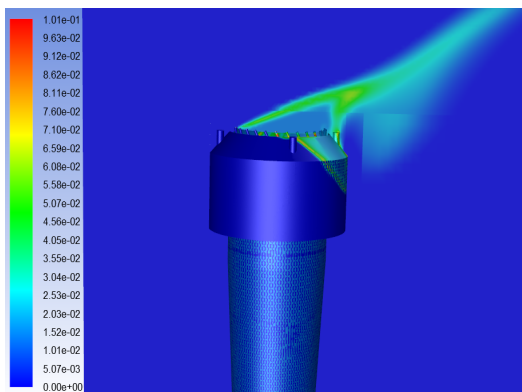


شکل ۱۱. مسیر گازهای خروجی از نازل‌ها، متأثر از جهت باد برای تیپ فلر HP (شرایط عملیاتی)

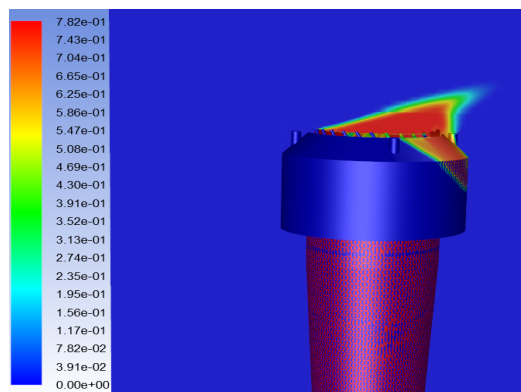
در (شکل‌های ۱۲ الی ۱۴) پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر HP شامل (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، اجزاء خوراک گازی وقتی در بالای تیپ فلر به شعله (جبهه واکنش) می‌رسند در واکنش احتراق شرکت کرده و به محصولات تبدیل می‌شوند. پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) در (شکل‌های ۱۵ الی ۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۵. پروفایل کسر مولی CO فلر HP



شکل ۱۶. پروفایل کسر مولی CO<sub>2</sub> فلر HP



شکل ۱۲. پروفایل کسر مولی CH<sub>4</sub> فلر HP

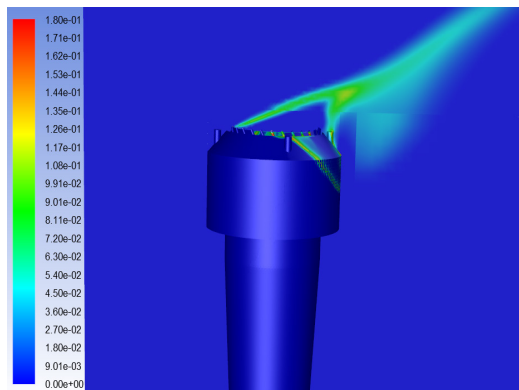
#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه سازی CFD فلر HP پالایشگاه در مقیاس صنعتی و در شرایط عملیاتی و کارکردی انجام پذیرفت. در شبیه سازی های انجام شده، اثر تمام پدیده های انتقال مرتبط شامل (انتقال مومنوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش های شیمیایی) همچنین شرایط محیطی شامل سرعت باد در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی تیپ فلر و تأثیر هر کدام از جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده احتراق در تیپ فلر، تمام جزئیات هندسی تیپ فلر بر اساس نقشه های طراحی در نظر گرفته شده است. به طوری که هندسه ترسیم شده فاقد هرگونه ساده سازی می باشد. با ایجاد شبکه محاسباتی مناسب همگرایی بهتر در حل معادلات حاصل شد. به طوری که در اطراف تثبیت کننده شعله، گاز بند و بخش های داخلی تیپ فلر مش ها ریزتر انتخاب شدند. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه بندی منظم برای کاهش خطاهای عددی استفاده شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی CFD شامل پروفایل دمایی (شکل شعله) و سرعت گازهای حاصل از احتراق در فلر HP در شرایط عملیاتی نشان می دهد که افزایش دمای بدنه تیپ فلر بر اثر برخورد شعله کم است. در فلر HP در شرایط عملیاتی، افزایش دمای بدنه تیپ فلر بر اثر برخورد شعله قابل اغماض (حدود ۳۰۰ درجه سانتی گراد) است بنابراین عملکرد آن با مقدار گاز جارویی فعلی مناسب است؛ بنابراین کاهش بیشتر گاز ارسالی (۸۹۶ کیلوگرم بر ساعت) به فلر HP توجیه پذیر نمی باشد چراکه ممکن است شعله به داخل شبکه فلر کشیده شود و یا اینکه به علت 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 صورتی که سرعت باد بیشتر از حد معمول باشد (تند بادهای موضعی) باید با مقدار گاز سوختی برگشت شعله به داخل تیپ فلر را کنترل کرد.

#### مراجع:

- [۱]. آشنایی با فلر، مدیریت بهداشت و ایمنی محیط زیست شرکت ملی پالایش و پخش، ۱۳۹۱.
- [2]. 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



شکل ۱۷. پروفایل کسر مولی H<sub>2</sub>O فلر HP

#### ۶. فهرست علائم اختصاری

|             |  |
|-------------|--|
| $P$         | فشار bar                                       |
| $g$         | شتاب جاذبه $m.s^{-2}$                          |
| $v$         | سرعت $m.s^{-1}$                                |
| $H$         | آنتالپی کلی $kJ.kg^{-1}.s^{-1}$                |
| $h$         | آنتالپی اجزا $kJ.kg^{-1}.s^{-1}$               |
| $j$         | فلاکس جرمی $kg.m^{-2}.s^{-1}$                  |
| $q$         | فلاکس حرارتی $kJ.m^{-2}.s^{-1}$                |
| $S$         | جمله مربوط به منبع مومنوم $kg.m^{-2}.s^{-2}$   |
| $D_{ij}$    | ضریب نفوذ $m^2.s^{-1}$                         |
| $D_{i,eff}$ | Effective diffusivity coefficient $m^2.s^{-1}$ |
| $Y_i$       | جزء جرمی اجزاء گاز $kmol.m^3$                  |
| $Ri$        | منبع مربوط به واکنش $kg.m^{-3}.s^{-1}$         |
| $T$         | دما K  |
| $Sm$        | جمله مربوط به منبع پیوستگی                     |
| $ki$        | ثابت واکنش $mol.s^{-1}.gr^{-1}.bar^{-1}$       |
| $k$         | انرژی جنبشی نوسانات آشفته $m^2.s^{-2}$         |
| $E_i$       | Activation Energy $kJ.kmol^{-1}$               |
| $v'$        | نوسانات سرعت $m.s^{-1}$                        |
| $G$         | تشعشع تابیده $W/m^2$                           |
| $R$         | ثابت جهانی گازها $kJ.kmol^{-1}.K^{-1}$         |
| $M_i$       | جرم موکولی $kg.kmol^{-1}$                      |
| $V$         | Volume, $m^3$                                  |
| $D$         | ضریب نفوذ کلی $m^2.s^{-1}$                     |
| $km$        | ضریب هدایت گرمایی $kJ.m^{-1}.K^{-1}$           |

#### Greek Letters

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| $\rho$        | دانسیته $kg.m^{-3}$               |
| $\mu$         | ویسکوزیت $kg.m^{-1}.s^{-1}$       |
| $\nu$         | ویسکوزیته سینماتیک                |
| $\varepsilon$ | اضمحلال انرژی جنبشی نوسانات آشفته |

#### Subscript

|     |                     |
|-----|---------------------|
| $i$ | عدد اجزاء           |
| $j$ | عدد شمارنده جزء دوم |
| $m$ | مخلوط               |

- [11]. L. Kościuk, M. Johnson, and 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 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.
- [15]. 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.
- [16]. 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.
- [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  
Manag. Assoc., vol. 42, no. 3, pp. 333–340, 1992.
- [3]. D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, and R. Corporation, FLARES. 1995.
- [4]. A. Bahadori, "Blow-Down and Flare Systems", *Natural Gas Processing*, Elsevier, 2014, pp. 275–312.
- [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/STEAM ASSISTED AND HIGH PRESSURE FLARING", *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020, Vol. 4, Issue 12.
- [8]. 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.
- [9]. [9] E. Bourguignon, M. R. Johnson, and L. W. Kościuk, "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, 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.



of laboratory flames and an industrial flare,”  
J. Air Waste Manag. Assoc., vol. 64, no. 11,  
pp. 1328–1340, 2014.

[۱۹]. 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.

[۲۰]. ر. صباغ، ن. رهبر، «بررسی تأثیر شکل هندسی بر  
بیشینه دمای جداره‌ی نوک فلر و توزیع آلاینده‌های  
خروجی آن»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، جلد ۴،  
شماره ۴، ۱۳۹۴.

[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 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.

[23]. J. P. Kim, U. Schnell, and G. Scheffknecht,  
“Comparison of Different Global Reaction  
Mechanisms for MILD Combustion of  
Natural Gas,” Combust. Sci. Technol., vol.  
180, no. 4, pp. 565–592, Feb. 2008.

[24]. K. WESTBROOK and F. L. DRYER,  
“Simplified Reaction Mechanisms for  
the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in  
Flames,” Combust. Sci. Technol., vol. 27,  
no. 1–2, pp. 31–43, Dec. 1981.

[25]. M.R Johnson , L.W Kościuk,” Efficiencies  
of low-momentum jet diffusion flames in  
crosswinds”, Combustion and Flame, 2000.



# Investigating the Performance of the High-Pressure Flare of South Pars Fifth Refinery and the Factors Affecting its Performance Using CFD Simulation

Mohammad Irani\*, Yaghoub Behjat

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

\*Corresponding Author, E-Mail Address: iranin@ripi.ir

## Abstract

*In this research, the CFD simulation of the high-pressure flare (HP) of the 5th South Pars Refinery was carried out in industrial dimensions in order to evaluate the effects of the geometrical parameters of the flare type on the combustion characteristics of the flare (flame shape and position). The CFD model was developed considering all transport phenomena (momentum, heat, mass transfer, radiation, turbulence and chemical reactions). In order to avoid numerical errors, proper meshing was done. The results of the developed calculation model include the temperature and velocity profile (shape and nature of the flame), the concentration profile of the gas species sent to the furnace, as well as the species profile of the combustion products. The results of CFD simulation show that in the HP Flare, in the operational status, the increase in the temperature of the Flare tip due to the impact of the flame is negligible, so its performance is suitable with the current amount of sweep gas. Therefore, the further reduction of the gas sent to the HP flare is not justified because the flame may be drawn into the flare network, or due to the very low height of the flame and the ambient wind speed, the surface temperature of the flare tip and wind shield may increase, which in the long run time will cause the destruction of the surface of the flare tip and its total replacement. If the wind speed is higher than usual (strong local winds), the return of the flame inside the flare tip should be controlled with the amount of fuel gas.*

**Keywords:** Combustion, Flame, HP flare, CFD simulation

