



Analysis of Combustion Characteristics and Investigation of the Cause of Thermal Stress in the Gas Refinery Flare, using the CFD Technique

Yaghoub Behjat^{*1}, Mohammad Irani¹, Jafar Sadeghzadeh Ahari¹ and Mahdi Mirza Aghatabar²

1 Gas Division, Nanotechnology Research Center, Faculty of Research and Development in Downstream Petroleum Industry, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

2 Process Engineering Unit, South Petroleum Gas Company, Asaluyeh, Iran

Behjaty@ripi.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5114.3269

Received: May/02/2023

Accepted: June/18/2023

Introduction

Flaring is widely used in refinery, petrochemical and chemical industries to eliminate undesirable combustible gases by burning in an open flame environment. The purpose of making flares is to receive the unwanted gases sent by the industrial unit and burn these gases in order to prevent them from entering the environment. In the industry, there are factors such as power cuts, changes in the input to the units, utilization exceeding the design capacity. From production units, improper maintenance and repair, deviation from correct methods and operating instructions, human errors, etc. are among the factors that cause process changes and pressure increase in tanks, towers and other industrial equipment. Flaring of accompanying gases is one of the methods that is mostly done in technical dimensions in order to increase the safety of equipment and prevent potential risks such as explosions and other possible risks due to the increase in pressure and the flaming of high-pressure gases during crude oil extraction.

Many experimental and simulation studies have been conducted on flares. Huang et al investigated the stability and flame behavior of a propane combustion jet in a laboratory manner and presented relations for the movement path of combustion jets in a cross flow [1]. Bourguignon and colleagues presented a method to measure the combustion efficiency of the flame in the cross flow [2]. Johnson et al., by conducting about penetration flames in the path of fluid flow, showed

that wind flow and fuel energy content are directly effective on combustion efficiency [3]. The results of Kostiuk and Johnson's research showed that flares have a high efficiency in still air and increasing the wind speed causes a decrease in efficiency [4]. Castchiera and Edgar, by CFD simulation, investigated the effect of air and steam injection on the performance of flares in a laboratory scale with a non-premixed flame [5]. Their results showed that the use of very high ratios of steam to fuel and air to fuel causes a significant decrease in flare combustion efficiency and unburnt hydrocarbon production. According to the topics raised in many sources, it can be concluded that the research done on flares using CFD modeling is mostly limited to lab-scale flares and little research has been done on industrial flares, which can be Due to the wide time span and the size of the flares, the high turbulence of the flow, the complex kinetics and the significant effect of the turbulence on the kinetics of combustion reactions.

Materials and Methods

Modeling and Simulation

Conservation Equations

The mass conservation, momentum, energy and species, can be expressed as:

Mass: $\nabla \cdot (\vec{v} \rho) = 0$

Momentum:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] + \rho g + S$$

Energy:

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho H + P)) + \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^n h_i j_i \right) = -\nabla \cdot (q) + S_R$$

$$\text{Species: } \nabla \cdot (\vec{v} C_i - D_i \nabla C_i) = R_i$$

Where, ρ represents mixture density, $\vec{v}$ is velocity vector, H and h_i are total enthalpy and enthalpy of species, respectively. P is the static pressure and C_i stands for concentration of chemical species.

Results and Discussion

Fig. 1 shows the temperature profile (flame shape) resulting from combustion in the LP flare in operational conditions. As it is clear in the figure, due to the relatively high discharge, the height of the flame is more elongated and due to the effect of the wind speed, the flame is slightly inclined in the direction of the wind. Because the wind direction is from left to right, the flame is drawn to the right. As seen in Fig. 1, the presence of high temperature in the center of the flame has caused the speed to increase with the decrease in density. Also, due to the injection of steam from the nozzles designed in the center of the flare tip and its very high speed in comparison with the speed of the gases sent to the flare, it causes a vortex and the combustion products are thrown to the top of the flare tip at a very high speed.

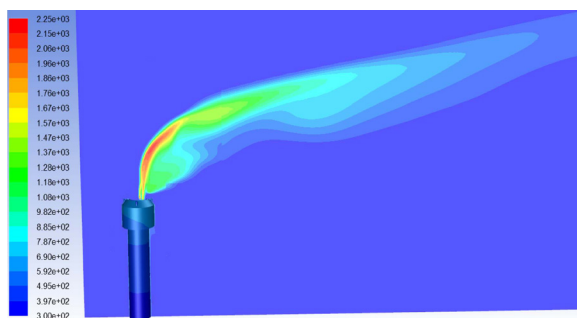


Fig. 1 Temperature profile and flame height formed in LP flare.

The temperature profile (flame shape) at the tip of the LP flare tip (the range of gas seal plates to the perforated plate of the tip flare tip) in operational conditions is shown in Fig. 2. As it is clear in Fig. 2, the formation of the vortex due to the high-speed difference between the injected steam and the gas sent to the flare creates a very complex hydrodynamics and leads to some of the outside air being drawn into the flare tip. This phenomenon has caused the flame to form in the range of gas-seal to the perforated plate. Therefore, the temperature of the body increases up to 800 K in some points of the perforated plate and gas-seal (Fig. 2). The results of the simulation regarding the return of the flame inside the flare tip are consistent with the experimental observations (Fig. 3) in the

industrial unit. so that the inner body of the LP flare tip undergoes thermal stress due to the flame being drawn into the flare tip.

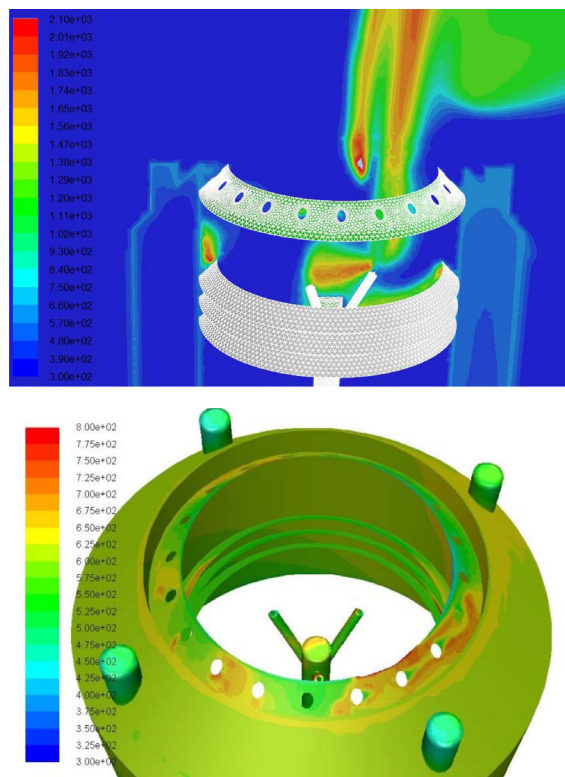


Fig. 2 Temperature profile in the gas seal wind shield area in LP flare.

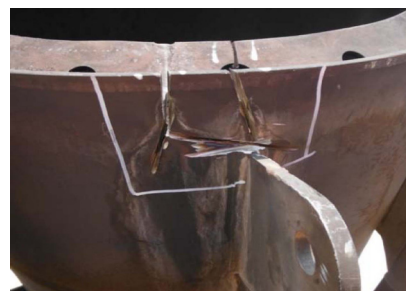


Fig. 3 Experimental observations of industrial LP flare tip.

Conclusions

In this research, CFD simulation of gas refinery LP flare was carried out on an industrial scale and in operational conditions. In the performed simulations, the effect of all related transfer phenomena including (momentum transfer, heat, mass, radiation, turbulence and chemical reactions) as well as environmental conditions including steam injection to the combustion area and wind speed have been considered. The results of the CFD simulation including the temperature profile (flame shape) and the velocity of the combustion gases in the LP flare in operational conditions show that due to the high temperature in the center of the flame and the decrease in the density of the combustion gases, also due to the injection steam is injected from the

nozzles designed in the center of the flare tip and at a very high speed of steam, the combustion products are directed to the top of the flare tip at a very high speed. The results of the developed computational model show that the formation of the vortex due to the difference in the high velocity of the injected steam with the gas sent to the flare creates a very complex hydrodynamics in the flare tip which leads to some of the outside air being drawn into the flare tip. This phenomenon causes a part of the flame to be formed in the range of the gas seal to the perforated plate, which ultimately leads to an increase in the temperature of the flare tip body (800 K). The results of the simulation regarding the return of the flame inside the flare tip are consistent with the experimental observations in the industrial unit, so that the internal body of the LP flare tip undergoes thermal stress due to the flame being drawn into the flare tip.

References

1. Huang, R. F., & Chang, J. M. (1994). The stability and visualized flame and flow structures of a combusting jet in cross flow, *Combustion and Flame*, 98(3), 267-278, doi.org/10.1016/0010-2180(94)90241-0.
2. Bourguignon, E., Johnson, M. R., & Kościuk, L. W. (1999). The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow, *Combustion and flame*, 119(3), 319-334, doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00068-1.
3. Johnson, M. R., Wilson, D. J., & Kościuk, L. W. (2001). A fuel stripping mechanism for wake-stabilized jet diffusion flames in crossflow, *Combustion Science and Technology*, 169(1), 155-174, doi.org/10.1080/00102200108907844.
4. Singh, K. D., Gangadharan, P., Chen, D. H., Lou, H. H., Li, X., & Richmond, P. (2014). Computational fluid dynamics modeling of laboratory flames and an industrial flare, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(11), 1328-1340, doi.org/10.1080/10962247.2014.948229.
5. Castineira, D., & Edgar, T. F. (2006). CFD for simulation of steam-assisted and air-assisted flare combustion systems, *Energy & fuels*, 20(3), 1044-1056.

آنالیز مشخصه‌های احتراق و بررسی علت ایجاد تنش حرارتی در فلر پالایشگاه گاز با استفاده از تحلیل CFD

یعقوب بهجت^{۱*}، محمد ایرانی^۱، جعفر صادق زاده اهری^۱ و مهدی میرزا آقائبار^۲

۱- پژوهشکده گاز، پردیس پژوهش و توسعه صنایع پایین دستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- واحد مهندسی فرآیند، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

چکیده

در این پژوهش، شبیه‌سازی CFD فلر کم فشار (LP) یکی از پالایشگاه‌های گازی کشور در ابعاد صنعتی به منظور ارزیابی اثرات پارامترهای هندسی تیپ فلر و اثر تزریق بخار بر مشخصه‌های احتراقی فلر (شکل و موقعیت شعله)، همچنین عدم پس کشیده شدن شعله به داخل تیپ فلر انجام پذیرفته است. مدل محاسباتی با در نظر گرفتن پدیده‌های انتقال مرتبط (انتقال مومنوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش‌های شیمیایی) توسعه یافت. به منظور ایجاد شبکه محاسباتی مناسب، در اطراف نازل‌های تزریق بخار و بخش‌های داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند و در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه محاسباتی منظم برای کاهش خطاهای عددی استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل محاسباتی توسعه یافته شامل پروفایل دمایی و سرعت (شکل و ماهیت شعله)، پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر، ردیابی مسیر بخار آب تزریق شده و همچنین پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که به علت تزریق بخار آب از نازل‌ها در مرکز تیپ فلر و سرعت بسیار بالای آن هیدوردینامیک بسیار پیچیده‌ای در دهانه تیپ فلر ایجاد می‌گردد که منجر به تشکیل گردابه می‌شود. به علت تشکیل گردابه در دهانه تیپ فلر، مقداری از هوای اطراف به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود که منجر به تشکیل شعله در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر می‌گردد. به همین دلیل دمای بدنه تیپ فلر در برخی از نقاط صفحه سوراخ‌دار و صفحات صفحات گازبند افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در خصوص برگشت شعله به داخل تیپ فلر و افزایش دما تا ۲۲۰۰ K در داخل تیپ فلر منطبق با مشاهدات تجربی در واحد صنعتی می‌باشد. به طوری که بدنه داخلی تیپ فلر LP در واحد صنعتی با توجه به کشیده شدن شعله به داخل تیپ فلر دچار تنش‌های حرارتی و در نتیجه موجب تخریب سریع آن می‌گردد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، CFD، مشخصه‌های احتراق، فلر LP، تیپ فلر

مقدمه

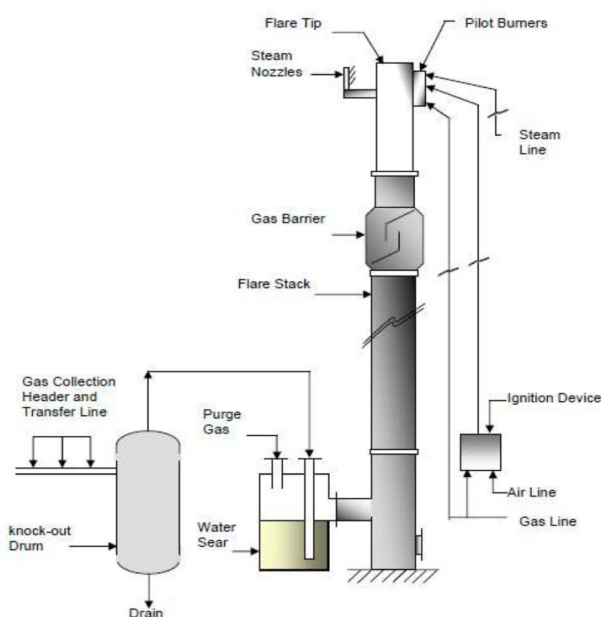
فلرها دودکش‌هایی هستند که در تأسیسات و چاه‌های نفتی، پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها جهت سوزاندن گازها استفاده می‌شوند. این تجهیزات حجم بسیار زیادی از گاز را در مدت کوتاهی به سوی اتمسفر رها می‌کنند. به عبارت دیگر، فرآیند فلر یک اکسیداسیون درجه بالا جهت سوزاندن ترکیبات قابل احتراق و تبدیل آن‌ها به ترکیبات کم خطر است. در صورتی که احتراق در فلر کامل یا به عبارت دیگر، بازده فرآیند احتراق در فلر ۱۰۰٪ باشد، فقط بخار آب، کربن دی اکسید و گوگرد دی اکسید به عنوان محصولات احتراق تولید می‌شوند. اما در عمل به علت تغییر شرایط عملکردی و انحراف از شرایط طراحی، بازده کاهش می‌یابد. در فلرهای صنعتی از یک عامل بیرونی برای ایجاد اختلاط کامل گاز ارسالی به فلر و هوا جهت احتراق کامل در نوک فلر استفاده می‌شود. براین اساس چهار نوع فلر با عامل اختلاط‌کننده بخار، هوا، فشار و فلر بدون عامل اختلاط وجود دارد [۱-۳].

- فلر با عامل اختلاط‌کننده بخار: این نوع

فلر دارای تیپ^۱ بوده و گازهای قابل اشتعال در آن به صورت شعله پیش رو می‌سوزد. فلر با عامل اختلاط بخار از فراوانی بیشتری نسبت به سایر فلرها برخوردار بوده و در اکثر پالایشگاه‌ها و صنایع شیمیایی از این نوع فلر استفاده می‌شود. در شکل ۱ شماتیکی از این نوع فلرها نشان داده شده است [۴ و ۵].

- فلر با عامل اختلاط‌کننده هوا: در این نوع فلر از جریان هوا برای تأمین هوای مورد نیاز و نیز عامل اختلاط استفاده می‌شود. تیپ این فلر به شکل تار عنکبوت با روزنه‌های کوچک است که در قسمت داخلی و بالای یک لوله فولادی قرار می‌گیرد.

- فلر با عامل اختلاط‌کننده فشار: در این نوع فلر از فشار جریان گازهای سوختنی به عنوان عامل اختلاط‌کننده در نوک تیپ استفاده می‌شود. معمولاً تیپ این نوع فلر در نزدیکی سطح زمین بوده و بایستی در منطقه‌ای دور از تأسیسات درجایی که فضای زیادی در دسترس است، نصب شود.



شکل ۱ شماتیک دودکش فلر با عامل اختلاط‌کننده بخار [۴ و ۵]

- **فلر بدون عامل اختلاط:** همچنان که از نام این فلر پیدا است، از هیچ عامل اختلاطی در این نوع فلر استفاده نمی‌شود. این نوع فلر برای گازهایی مناسب است که آنتالپی کمی دارند و نسبت کربن به هیدروژن آن‌ها کوچک است. این گازها به آسانی بدون تولید دود می‌سوزند و برای احتراق کامل نیاز به هوای کمی دارند. عدم طراحی مناسب تیپ فلر و همچنین عدم تنظیم مناسب گاز جاروبی^۱ و گاز پرج^۲ می‌تواند سبب پس‌زدن و کشیده‌شدن شعله فلر و به‌دنبال آن مخاطرات ایمنی و زیست محیطی گردد. همچنین احتراق ناقص در فلر، می‌تواند با ورود گازهای نسوخته به محیط زیست خسارات زیست محیطی زیادی را در بر داشته باشد. فراهم نمودن یک مدل معتبر که توانایی شبیه‌سازی واکنش احتراق و اثر متقابل احتراق-هیدرودینامیک سیال را داشته باشد، می‌تواند در شناخت بهتر پدیده‌های حاکم بر احتراق در فلر، تأثیر پارامترهای عملیاتی و طراحی و در نتیجه بهبود عملکرد و کاهش مخاطرات ایمنی و زیست محیطی آن داشته باشد [۷-۵]. مطالعات تجربی متعددی در گذشته درباره فلرها انجام شده است. این مطالعات نشان داده است که در صورت طراحی و راه‌اندازی مناسب یک فلر، درصد زیادی از خوراک هیدروکربنی به دی اکسید کربن و آب تبدیل می‌شود. با این حال، در برخی از شرایط به ویژه برای زمانی که خروج مایعات سوختی، گازهای با ارزش حرارتی پایین و یا وزش بادهای تند وجود داشته باشد، این بازده به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. هوآنگ و چانگ [۸]، پایداری و رفتار شعله جت احتراقی پروپان را که در جهت عمود بر جریان باد است به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و روابطی را برای مسیر حرکت جت‌های سرد و احتراقی در یک جریان متقاطع ارائه کردند. بورگوایگنون و همکاران [۹]، روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند. آنها با استفاده از این روش اثر سرعت

باد و دبی گازهای احتراق را بر راندمان این نوع شعله‌ها بررسی کردند. جانسون و همکاران [۱۰]، با انجام آزمایش‌هایدرباره شعله‌های نفوذی در مسیر جریان سیال، نشان دادند که جریان باد و محتوای انرژی سوخت، مستقیماً بر روی راندمان احتراق مؤثر است. کوستیوک و جانسون [۱۱] نشان دادند که فلرها در هوای ساکن راندمان بالایی داشته و افزایش سرعت وزش باد باعث افت بازده می‌شود. براساس این مطالعه، راندمان احتراق با کاهش ارزش حرارتی گاز و کاهش قطر ستون مرتفع حامل گاز نیز کاهش می‌یابد. به‌عبارتی، فلرهای با قطر بیشتر به‌دلیل اثرات سرعت بر پایداری شعله حتی در برابر باد با سرعت زیاد، احتراق بهتری دارند.

کاستشیپرا و ادگار [۱۲]، اثر تزریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرهای آزمایشگاهی با شعله غیر پیش آمیخته را شبیه‌سازی CFD (دینامیک محاسباتی سیال) کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نسبت‌های خیلی بالای بخار به سوخت و هوا باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می‌شود. کاستشیپرا و ادگار [۱۳]، در مطالعه دیگری عملکرد یک فلر با سرعت‌های مختلف باد را بررسی کردند. در این مطالعه از یک مکانیسم شامل پنج واکنش استفاده کردند و رفتار فلر صنعتی و انتشار گاز از آن بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان می‌دهد. تأثیر وزش باد بر بازده فلرهای صنعتی با استفاده از CFD توسط کاستشیپرا و ادگار در مطالعه دیگری 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.

1. Sweep

2. Purge

شده و باعث آسیب بدنه فلر می‌شود. شبیه‌سازی یک سیستم فلر با ترکیب جدید توسط مارا و کانتینیلو انجام شد [۲۲]. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه‌سازی، هندسه فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند. با توجه به مباحث مطرح شده در منابع متعدد می‌توان چنین نتیجه گرفت که تحقیقات انجام یافته در خصوص فلرها با استفاده از مدل‌سازی CFD، بیشتر محدود به فلرهایی در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تحقیقات اندکی بر روی فلرهای صنعتی انجام پذیرفته است که این امر را می‌توان به دلیل گستردگی بازه زمانی و اندازه فلرها، آشفتگی زیاد جریان، سینتیک پیچیده و تأثیر قابل توجه آشفتگی بر سینتیک واکنش‌های احتراقی دانست. در این پژوهش، شبیه‌سازی فلر کم فشار (LP) یک پالایشگاه گازی در ابعاد واقعی به منظور ارزیابی شکل تیپ فلر، همچنین بررسی اثر تزریق بخار بر مشخصه‌های احتراقی فلر بر شکل و موقعیت شعله و توزیع دمای حاصل در بدنه فلر با استفاده از تکنیک CFD شبیه‌سازی شده است که با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای دارای نوآوری می‌باشد. همچنین میزان آلاینده‌های خروجی از فلر و همچنین تأثیر مؤلفه‌های ذکر شده بر پایداری شعله و عدم پس کشیدن شعله به داخل تیپ فلر با استفاده از تحلیل CFD در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌سازی CFD احتراق در فلر و روابط حاکم

نقطه شروع مدل‌سازی هر جریان دارای واکنش، تنظیم روابط انتقال جرم، اندازه حرکت و انرژی حاکم بر آن سیستم است. متأسفانه حل مستقیم این روابط در سیستم فلر صنعتی بسیار مشکل است. از جمله این مشکلات می‌توان به جریان کاملاً آشفته فلرها اشاره کرد که به علت گستره وسیع مقیاس زمانی و مکانی، شبیه‌سازی عددی مستقیم آن‌ها امکان‌پذیر نیست.

تأثیر وزش باد و سرعت جت خروجی از فلر توسط لاوال و همکاران، با استفاده از مدل‌سازی CFD مورد مطالعه گرفت [۱۵]. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و مدل ذرات اوپلری^۱ احتراق در این مطالعه استفاده شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. لانگمن و ناتان [۱۶]، اثر نوسانات شدید ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط یک فلر پالایشگاهی در مقیاس واقعی را گزارش کردند. سینگ و همکاران [۱۷]، با استفاده از یک مدل CFD فلر صنعتی و آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کردند و به نتایج خوبی رسیدند. مدل آن‌ها توانست بازده فلر را با خطای پنج درصد برای فلر صنعتی محاسبه کند. سینگ و همکاران [۱۸]، 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 شبیه‌سازی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده برای بازده حذف و راندمان احتراق انحراف زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد. تأثیر وزش باد بر شکل شعله به صورت عددی توسط جوادی و همکاران انجام شد [۱۹]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های بالاتر از پنج متر بر ثانیه به علت پخش شعله بر روی بدنه، دمای بدنه بالا می‌رود. صباغ و رهبر [۲۰] تأثیر شکل هندسی تیپ فلر بر بیشینه دمای جداره نوک فلر را مطالعه کردند. این محققین با رسم کانتورهای دما به عنوان نماینده شکل شعله برای هندسه‌های مختلف نشان دادند که در هندسه استوانه‌ای با وجود وزش باد طول شعله بلندتر از هندسه‌های 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 شبیه‌سازی CFD مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد وقتی سرعت باد افزایش می‌یابد حداکثر دمای شعله کاهش می‌یابد. تغییر در حداکثر دمای دیواره فلر و همچنین تغییر در محل شعله باعث ایجاد استرس‌های قابل توجهی بر دیواره فلر

مدل نسبتاً ساده کامل می‌باشد که برای تشریح آشفستگی به کار می‌رود و برای انتقال خواص آشفستگی توسط جریان متوسط و نفوذ و برای تولید و استهلاک آشفستگی مفید می‌باشد. در این مدل دو رابطه انتقال، یکی برای انرژی جنبشی (k) و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی آشفته (ε) به صورت همزمان حل می‌شوند. با وجود اینکه این مدل نسبت به مدل شبیه‌سازی ادی بزرگ و مدل تنش جبری از دقت کمتری برخوردار است ولی مدت زمان لازم برای حل مسئله با استفاده از این مدل، بسیار کمتر از این مدل‌ها می‌باشد. همچنین این مدل عملکرد مناسبی در اغلب جریان‌های مربوط به صنعت دارد و بیشترین وسعت و کارایی را در میان مدل‌های آشفته دارا می‌باشد. مدل استاندارد شامل دو رابطه زیر است:

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

$$\rho_f \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_\varepsilon + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

در نتیجه حل روابط ۴ و ۵ مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش را به صورت زیر محاسبه کرد:

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

رابطه بقای انرژی

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

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

که K_{eff} ضریب انتقال حرارت هدایت مؤثر بوده و

می‌باشد. همچنین برای توضیح کامل‌تر لازم به

ذکر است که $\nabla \cdot \sum_j h_j \vec{J}_j$ ترم انتقال حرارت ناشی

بنابراین برخی از مدل‌های آشفستگی باید برای حل به کار گرفته شوند. همچنین مکانیزم‌های شیمیایی واقعی برای احتراق هیدروکربن‌ها را نمی‌توان توسط یک رابطه واکنش بیان کرد. چنین مدلی می‌تواند از ده‌ها جزء و صدها واکنش که کاملاً شناخته شده باشند، تشکیل گردد. علاوه بر این لازم است اثرات متقابل آشفستگی و شیمی فرآیند در نظر گرفته شود زیرا واکنش‌های شیمیایی نسبت به تغییرات موضعی بسیار حساس هستند. روابط حالت پایدار متوسط رینولدز ناویر-استوکس در ادامه بیان می‌شوند [۸، ۱۲، ۱۸، ۱۷، ۱۴، ۱۳].

رابطه پیوستگی (بقای جرم)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

رابطه ۱ شکل کلی رابطه قانون پیوستگی است که در صورت وجود واکنش در سیستم مقدار سمت راست رابطه 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:

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

که مقدار Y_i برابر کسر جرمی هر جزء است و R_i نرخ تولید این جزء در اثر واکنش‌های شیمیایی است.

رابطه بقای اندازه حرکت

شکل کلی روابط بقای اندازه حرکت به صورت زیر است:

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

علامت بار روی عبارات این رابطه به مقادیر متوسط اشاره می‌کند. تنش‌های رینولدز، $\rho(\vec{v}' \vec{v}')$ ، عبارت‌های اضافه‌ای هستند که از تجزیه متغیرهای آشفته به مقادیر متوسط و نوسانی به وجود می‌آیند. این عبارات برای کامل شدن رابطه ۳ باید مدل شوند. برای این منظور از مدل آشفستگی استفاده می‌گردد. در این پژوهش از مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. مدل $k-\varepsilon$ یک

فرآیند آبخاری از کل به مقیاس مولکولی می‌باشد. این فرآیند آبخاری، واکنش‌های شیمیایی همپای اختلاط را کنترل می‌کند تا آن‌جا که واکنش یک فرآیند قابل اندازه‌گیری می‌شود. به عبارت دیگر، در این مدل اندازه‌گیری فرآیند اختلاط به‌جای واکنش شیمیایی مطرح می‌باشد. این مدل کمترین مقدار سه نرخ کسر جرمی متوسط سوخت (رابطه ۱۰)، کسر جرمی متوسط اکسیدکننده (رابطه ۱۱) و کسر جرمی متوسط محصول (رابطه ۱۲) را مبنا قرار می‌دهد. بنابراین، مدل شکست گردابه تاثیر سینتیک شیمیایی را نادیده گرفته و یک واکنش شیمیایی سریع و محدود را ارائه می‌دهد:

$$\bar{w}_F = \bar{\rho} A \bar{Y}_F \frac{\varepsilon}{k} \quad (10)$$

$$\bar{w}_{O_2} = \bar{\rho} A \frac{Y_{O_2}}{v} \frac{\varepsilon}{k} \quad (11)$$

$$\bar{w}_P = \bar{\rho} \frac{A.B}{(1+v)} \bar{Y}_P \frac{\varepsilon}{k} \quad (12)$$

بررسی مدل‌های سینتیکی به‌کار 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 به‌کار رفته به‌طور مختصر تشریح می‌شود [۱۴-۱۶]. در سینتیک ارائه شده توسط اسمیت و همکاران روابط استوکیومتری برای احتراق متان طبق رابطه‌های ۱۳ تا ۱۶ بیان می‌شوند. ثابت‌های سرعت واکنش برای سه واکنش اول (۱۳ تا ۱۵) با k_1 ، k_2 و k_3 نشان داده شده است. واکنش جابه‌جایی آب گاز (رابطه ۱۶) 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.

از اثرات انتقال جرم است و برای یک سیستم همراه با واکنش شیمیایی مقدار S_h به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

مدل‌های تقابل آشفته‌گی و واکنش

علاوه‌بر مدل‌سازی آشفته‌گی و واکنش‌های شیمیایی باید اثر متقابل بین دینامیک سیال آشفته و سینتیک شیمیایی در سیستم‌های فلر در نظر گرفته شود. در حقیقت برهم‌کنش متقابل آشفته‌گی و شیمی فرآیند می‌تواند اثرات مهمی بر پایداری شعله و تشکیل آلاینده‌ها داشته باشد. مدل‌های احتراقی متعددی در طی دهه‌های اخیر برای مدل‌سازی اثرات متقابل آشفته‌گی و شیمی فرآیند ارائه شده است. مدل تابع احتمال جرم مخصوص^۱، مدل شعله آرام^۲، مدل اضمحلال گردابه^۳ و مدل مفهوم اضمحلال گردابه^۴ از مطرح‌ترین مدل‌های احتراق می‌باشند. با توجه به ماهیت احتراق گازهای ارسالی به فلر و شرایط هیدرولیکی تشکیل شعله در تیپ فلر از مدل ترکیبی مدل شعله آرام و مدل اضمحلال گردابه در این شبیه‌سازی استفاده شده است که در ادامه به اختصار مبانی این دو مدل تشریح شده است.

الف- مدل شعله آرام

این مدل، روش کلاسیک دیگری برای احتراق آشفته است. در این مدل فرض می‌شود که شعله آشفته از مجموع تعدادی شعله آرام و پایدار تشکیل شده است. این مدل برای پیش‌بینی سیستم‌هایی که چندان تعادلی نیستند، مناسب به‌نظر می‌رسد. برای مدل‌سازی شعله‌های آرام، می‌توان واکنش شیمیایی با جزئیات دقیق را در نظر گرفت. مدل شعله آرام زمانی استفاده می‌شود که واکنش‌های تقریباً سریع در فرآیند وجود داشته باشد.

ب- مدل اضمحلال گردابه

در این مدل، روابط آرنیوس و حرکت اغتشاشی به‌نحوی کوپل شده است که اثرات نوسانات ناشی از اغتشاش در ترم شدت واکنش وارد شود. در این مدل فرآیند اختلاط آشفته به‌صورت یک

1. Probability Density Function
2. Laminar Flamelet Model
3. Eddy Dissipation Model
4. Eddy Dissipation Concept

جدول ۱ پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک اسمیت و همکاران و روابط سرعت آن‌ها [۱۴-۱۶]

ثابت سرعت	ضریب پیش‌نمایی آرنیوس	انرژی فعال‌سازی (J/kgmol)	رابطه سرعت
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}	$9/5 \times 10^{10}$	$2/39 \times 10^8$	$[CO_2][H_2]^{0.5}$

است به‌خوبی پاسخ‌گو است.

• مدل P1 می‌تواند به آسانی برای هندسه‌های

پیچیده با مختصات خمیده خطی به‌کار رود.

همان‌طور که ذکر شد مدل تشعشی P1 ساده‌ترین حالت مدل کلی P-N است که بر پایه بسط شدت تشعشی (I) شکل گرفته است. چنان‌چه تنها چهار ترم در این سری به‌کار رود، رابطه ۲۱ برای شار تشعشی به‌دست می‌آید.

$$q_r = -1/3(a + \sigma_s) - C\sigma_s \nabla G \quad (17)$$

با تعریف Γ به‌صورت رابطه ۱۸ رابطه بالا، به فرم رابطه ۱۹ ساده شده و در نهایت رابطه انتقال به‌صورت رابطه ۲۰ در می‌آید.

$$\Gamma = 1/(3(a + \sigma_s) - C\sigma_s) \quad (18)$$

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (19)$$

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (20)$$

با ترکیب روابط ۱۸ تا ۲۰ رابطه ۲۱ به‌دست می‌آید.

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (21)$$

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

تشریح شبکه فلر LP، ترسیم هندسه و ایجاد شبکه محاسباتی فلر صنعتی

خط فلر LP پالایشگاه گازی مورد نظر برای سوزاندن گازهای کم فشار مرطوب و خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً گازهای کم فشار خروجی از تجهیزات فرآیندی و شیرهای اطمینان وارد خط فلر LP می‌شود.



با توجه به غلظت نسبتاً پایین مقادیر اتان، پروپان، بوتان و پنتان، هگزان، هپتان و اکتان در خوراک ورودی به فلر کم فشار (LP)، برای شبیه‌سازی احتراق این اجزا از رابطه استوکیومتری تک واکنشی پیشنهاد شده توسط وستبروک و درایر، استفاده می‌شود. پارامترهای سینتیک آرنیوس مورد استفاده در مدل‌سازی احتراق مربوط به این واکنش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

مدل‌سازی تشعشع

برای محاسبه شار تشعشی باید ابتدا رابطه انتقال حرارت تشعشی حل شده و سپس شدت تابش در موقعیت‌های مختلف محاسبه گردد. مدل تشعشی 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 به‌دلیل سادگی و کارآمد بودن به یکی از محبوب‌ترین روش‌های حل روابط انتقال حرارت تشعشی تبدیل شده است. از مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

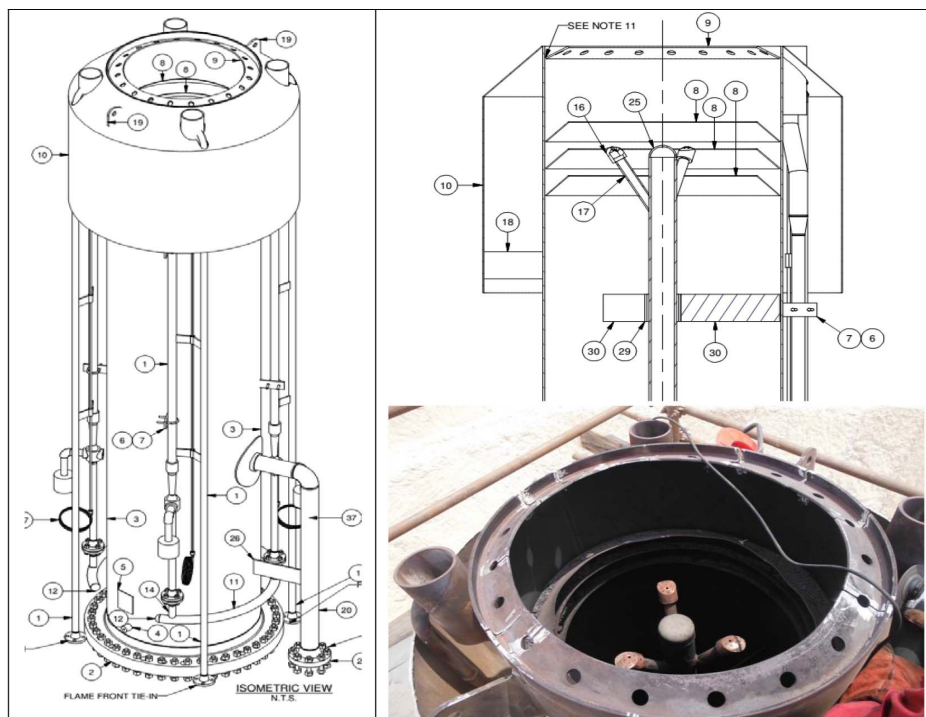
- در مدل P1 رابطه انتقال تشعشی یک رابطه پخشی است، که حل رابطه را ساده می‌کند.
- این مدل اثرات پراکنش را در نظر می‌گیرد.
- برای کاربردهای احتراق که ضخامت نوری بزرگ

جدول ۲ پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک وستبروک و درایر و رابطه سرعت آن [۱۴-۱۶]

رابطه سرعت	انرژی فعال‌سازی J/kgmol	ضریب پیش‌نمایی آرنیوس
$[C_2H_6]^{0.2}[O_2]^{1.3}$	$2/0.27 \times 10^8$	$2/119 \times 10^{11}$
$[C_3H_8]^{0.1}[O_2]^{1.65}$	$1/256 \times 10^8$	$5/96 \times 10^9$
$[C_4H_{10}]^{0.15}[O_2]^{1.6}$	$1/256 \times 10^8$	$4/161 \times 10^9$
$[C_5H_{12}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$3/599 \times 10^9$
$[C_6H_{14}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$3/205 \times 10^9$
$[C_7H_{16}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$2/868 \times 10^9$
$[C_8H_{18}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	$1/256 \times 10^8$	$2/587 \times 10^9$

می‌باشد. اولین گام جهت شبیه‌سازی CFD ایجاد هندسه در نرم‌افزار مناسب و مطابق با نقشه‌های طراحی است. 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 براساس نقشه‌های طراحی در ترسیم هندسه رعایت شود. در این شبیه‌سازی همان‌طور که در **شکل ۳** نشان داده است، ترسیم هندسه (با استفاده از نرم‌افزار Gam-bit) تیپ فلر با جزئیات مربوطه انجام شده است. همان‌طور که در **شکل ۳** ملاحظه می‌شود، هندسه ترسیم شده منطبق با شماتیک فلر LP نشان داده شده براساس نقشه‌های طراحی و عکس‌های اخذ شده از تیپ فلر به هنگام تعمیرات اساسی است. به‌طوری‌که هندسه ترسیم شده فاقد هر گونه ساده‌سازی بوده و تمام جزئیات تیپ فلر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. با توجه به هندسه ترسیم شده فلر، کیفیت شبکه محاسباتی تأییر چشم‌گیری بر نتایج شبیه‌سازی CFD دارد. از این‌رو برای دستیابی به نتایج صحیح و با کمترین خطای ممکن در مطالعه CFD شبیه‌سازی فرآیند احتراق در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن تمام پدیده‌های انتقال (انتقال مومنتوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش‌های شیمیایی) انجام پذیرفت.

در **شکل ۲** شماتیک تیپ فلر LP طبق نقشه‌های طراحی و عکس گرفته شده در حین تعمیرات اساسی پالایشگاه نشان داده شده است. همان‌طور که در **شکل ۲** به وضوح مشخص است تیپ فلر شامل صفحه سوراخ دار (مورد شماره ۹) جهت ایجاد جت و تثبیت‌کننده شعله، نازل‌های تزریق بخار (آیتم شماره ۱۶) و صفحات گازبند^۱ (مورد شماره ۸) می‌باشد. وجود صفحات گازبند در قسمت بالایی تیپ فلر به جهت ممانعت از نفوذ هوای محیط به‌داخل تیپ فلر در مواقعی که دبی گازهای ارسالی به فلر کم باشد اهمیت پیدا می‌کند. در صورتی‌که این صفحات گازبند نصب نشده باشند درحالی‌که دبی گازهای ارسالی به فلر کم باشد مقداری از هوای محیط به‌داخل تیپ فلر و نهایتاً شبکه فلر پالایشگاه کشیده می‌شود که احتمال انفجار و آتش‌سوزی در شبکه فلر پالایشگاه را ایجاد می‌کند که از لحاظ ایمنی بسیار خطرناک می‌باشد. بنابراین طراحی و نصب صحیح صفحات گازبند در تیپ فلر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در **جدول ۳** ترکیب درصد گازهای ارسالی به فلر LP براساس شرایط عملیاتی آورده شده است. همچنین در **جدول ۴** میزان گاز ارسالی به فلر LP براساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه گاز گزارش شده است. لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده در **جدول ۳ و ۴** برابر با میانگین داده‌های اخذ شده از پالایشگاه



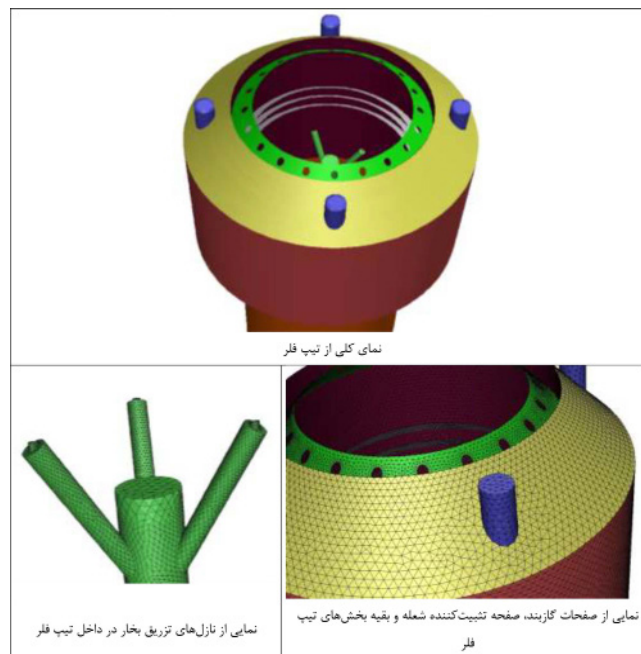
شکل ۲ شماتیک طراحی تیپ فلر LP

جدول ۳ ترکیب درصد گازهای ارسال شده به به فلر LP

اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد مولی	اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد مولی
H ₂ O	۳۸/۱۶	C ₄ H ₁₀	۰/۹۶
N ₂	۱/۶۵	C ₅ H ₁₂	۰/۴۳
CO ₂	۰/۹۲	C ₆	۷/۰۲
CH ₄	۴۱/۰۷	C ₇	۲/۳۲
C ₂ H ₆	۳/۰۸	C ₈	۲/۹
C ₃ H ₈	۱/۴۹		

جدول ۴ میزان گاز ارسالی به فلر LP براساس شرایط عملیاتی

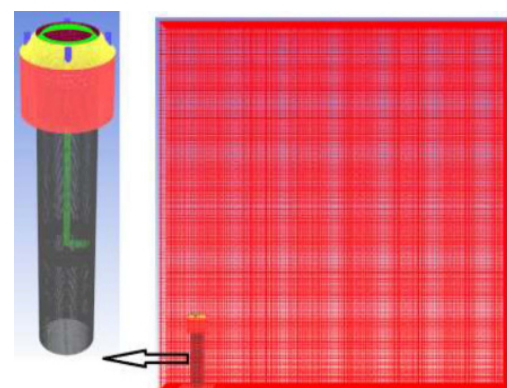
مقدار عملیاتی	نوع جریان ارسالی به فلر LP
۲۷۶	میزان گاز ارسالی به فلر (kg/h)
۲۹۰	میزان بخار (kg/h)
۲۷۸۸	میزان Assist Gas (NM ³ /h)
۲۶/۳	میزان Purge Gas (NM ³ /h)
۵/۷	میزان Pilot Gas (NM ³ /h)
۸۵	دما (°C)



شکل ۳ نمایی از هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده

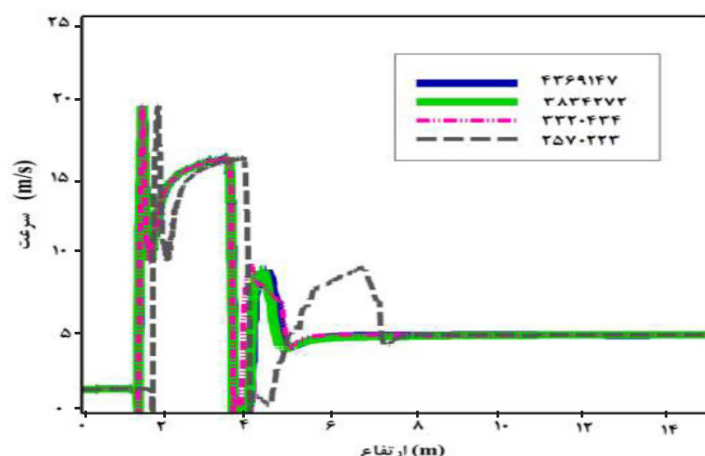
شبکه مناسب، از مستقل بودن نتایج حل روابط از شبکه استفاده شده، اطمینان حاصل گردیده است. در اطراف نازل‌های تزریق بخار، صفحات گازبند و بخش‌های داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند تا اطلاعات دقیق‌تری در این نواحی به دست آید. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه ۶ وجهی (شبکه منظم) برای کاهش خطاهای عددی، همانند نفوذ کاذب استفاده شده است. شبکه ایجاد شده و دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده در این تحقیق در **شکل ۴** نشان داده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای حل روابط Ansys Fluent می‌باشد و از الگوریتم SIMPLE برای کوپلینگ روابط با بهره‌گیری از ضرایب فوق تخفیف مناسب استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی روابط از روش UPWIND درجه یک و دو بهره گرفته شده است. **شکل ۵** مقایسه سرعت جریان پیش‌بینی شده توسط شبکه‌بندی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، سرعت‌های جریان گاز پیش‌بینی شده با استفاده از چهار شبکه‌بندی مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند.

بر این اساس با در نظر گرفتن این نکته که پایه مش‌ها در زمین قرار دارد عملاً تأثیری در فرآیند احتراق و تشکیل شعله و نیز الگوی انتشار محصولات احتراق نخواهد داشت، فضایی مکعب مستطیل شکل به ابعاد $3 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ که 16 m بالای دودکش در آن قرار دارد به‌عنوان فضای شبیه‌سازی طراحی شد (**شکل ۴**).



شکل ۴ نمایی از دامنه محاسباتی و محل قرارگیری فلر

ایجاد شبکه محاسباتی مناسب موجب هم‌گرایی بهتر در حل روابط و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند موجب ایجاد ناپایداری یا عدم هم‌گرایی در محاسبات گردد. در این پروژه علاوه‌بر انتخاب



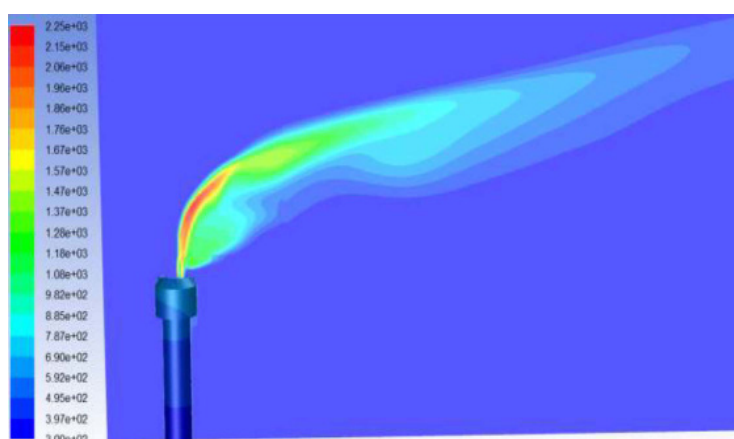
شکل ۵ سرعت پیش‌بینی شده جریان گاز در امتداد خط افقی فلر

ملایم متمایل شده است. چون جهت وزش باد از سمت چپ به راست است، شعله به سمت راست کشیده شده است. همان‌طور که در **شکل‌های ۶ و ۷** ملاحظه می‌گردد وجود دمای بالا در مرکز شعله سبب شده است تا با کاهش دانسیته، سرعت مقدار بیشتری داشته باشد. همچنین به علت تزریق بخار آب از نازل‌های طراحی شده در مرکز تیپ فلر و سرعت بسیار بالای آن در مقایسه با سرعت گازهای ارسالی به فلر، باعث ایجاد گردابه شده و محصولات حاصل از احتراق با سرعت بسیار زیادی به بالای تیپ فلر پرتاب می‌شوند. پروفایل دمایی (شکل شعله) در نوک تیپ فلر LP (محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر) در شرایط عملیاتی در **شکل ۸** نشان داده شده است. همان‌طور که در **شکل ۸-الف و ب** مشخص است تشکیل گردابه به علت اختلاف سرعت بالای بخار آب تزریق شده با گاز ارسالی به فلر، هیدرودینامیک بسیار پیچیده‌ای ایجاد کرده و منجر به کشیده شدن مقداری از هوای بیرون به داخل تیپ فلر می‌شود. این پدیده سبب شده است تا شعله در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر تشکیل گردد. همچنین تشکیل شعله در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر، منجر به افزایش دمای تیپ فلر می‌شود.

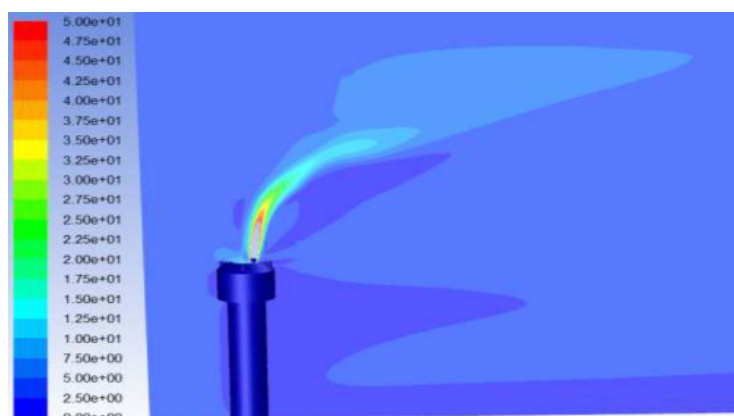
با توجه به نمودارهای سرعت ترسیم شده در **شکل ۵** می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد حجم‌های کنترلی به بیش از ۴/۳۶۹/۱۴۷ تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج پیش‌بینی شده ندارد. بنابراین شبکه‌بندی با تعداد ۳/۸۳۴/۲۷۲ سلول به عنوان شبکه‌بندی بهینه برای انجام محاسبات انتخاب گردید. وجود تفاوت جزئی در پاسخ‌های به دست آمده از دو شبکه‌بندی با تعداد ۳/۸۳۴/۲۷۲ و ۴/۳۶۹/۱۴۷ سلول منطقی بوده و می‌تواند ناشی از تغییرات تناوبی اندک پاسخ در طی محاسبات سعی و خطا باشد.

نتایج و بحث

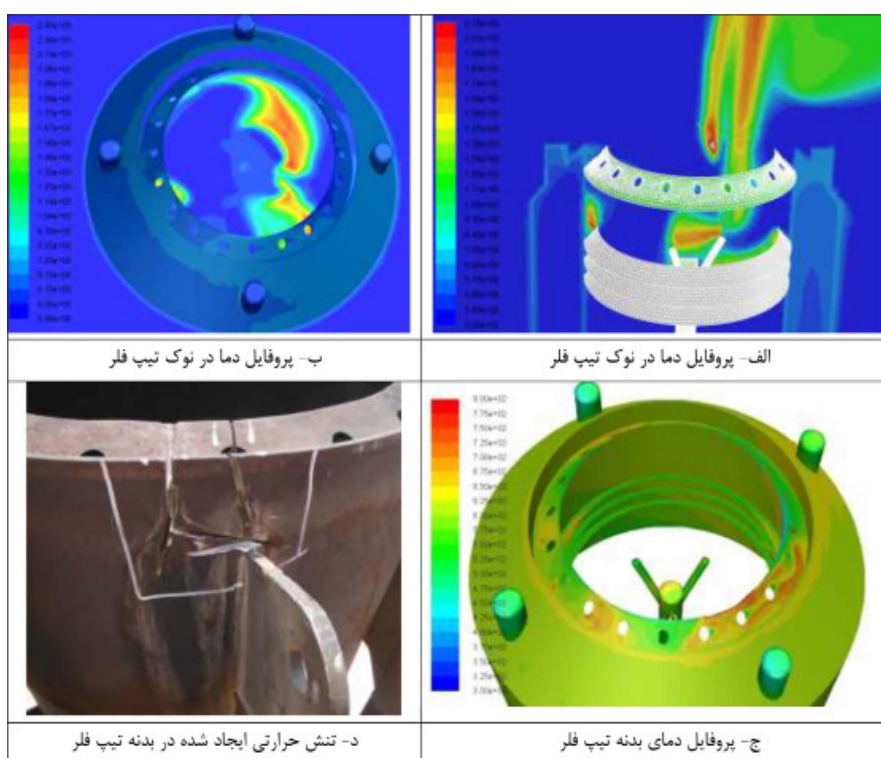
شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال فلر کم فشار پالایشگاه گازی مورد نظر در شرایط عملیاتی ذکر شده در قسمت قبل انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اثر تمام پدیده‌های محیطی شامل تزریق بخار به ناحیه احتراقی و سرعت باد (5 m/s) در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل پرداخته می‌شود. در **شکل ۶ و ۷** پروفایل دمایی (شکل شعله) و سرعت گازهای حاصل از احتراق در فلر LP در شرایط عملیاتی آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت دبی نسبتاً زیاد، ارتفاع شعله کشیده‌تر است و به علت اثر سرعت باد، شعله در جهت باد به صورت



شکل ۶ پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LP

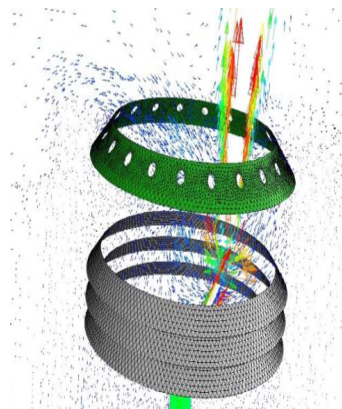


شکل ۷ پروفایل سرعت و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LP



شکل ۸ پروفایل دما و برگشت شعله در نوک تیپ فلر LP

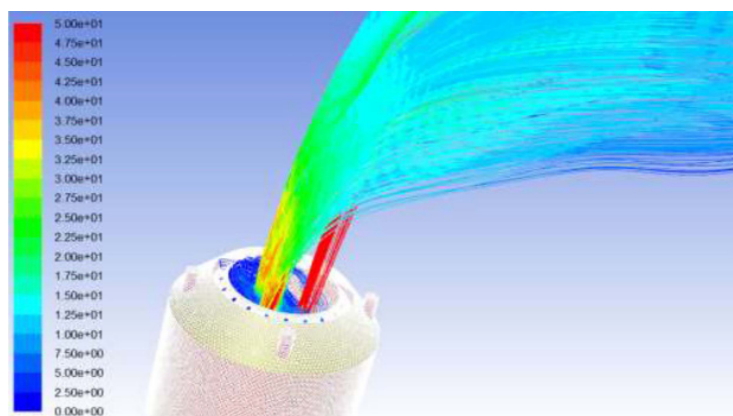
به‌طوری‌که دمای بدنه در برخی از نقاط صفحه سوخت دار و صفحات گازبند تا 800 K افزایش پیدا می‌کند (شکل ۸ ج). نتایج حاصل از شبیه‌سازی درخصوص برگشت شعله به‌داخل تیپ فلر منطبق با مشاهدات تجربی در واحد صنعتی می‌باشد. به‌طوری‌که بدنه داخلی تیپ فلر LP با توجه به کشیده شدن شعله به‌داخل تیپ فلر دچار تنش‌های حرارتی می‌شود که در شکل ۸ د نشان داده شده است. با توجه به توضیحات فوق، بردارهای سرعت در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوخت‌دار نوک تیپ فلر جهت تبیین و مشخص شدن مشخص‌های هیدرودینامیک پیچیده تشکیل شده در شکل ۹ نشان داده شده است.



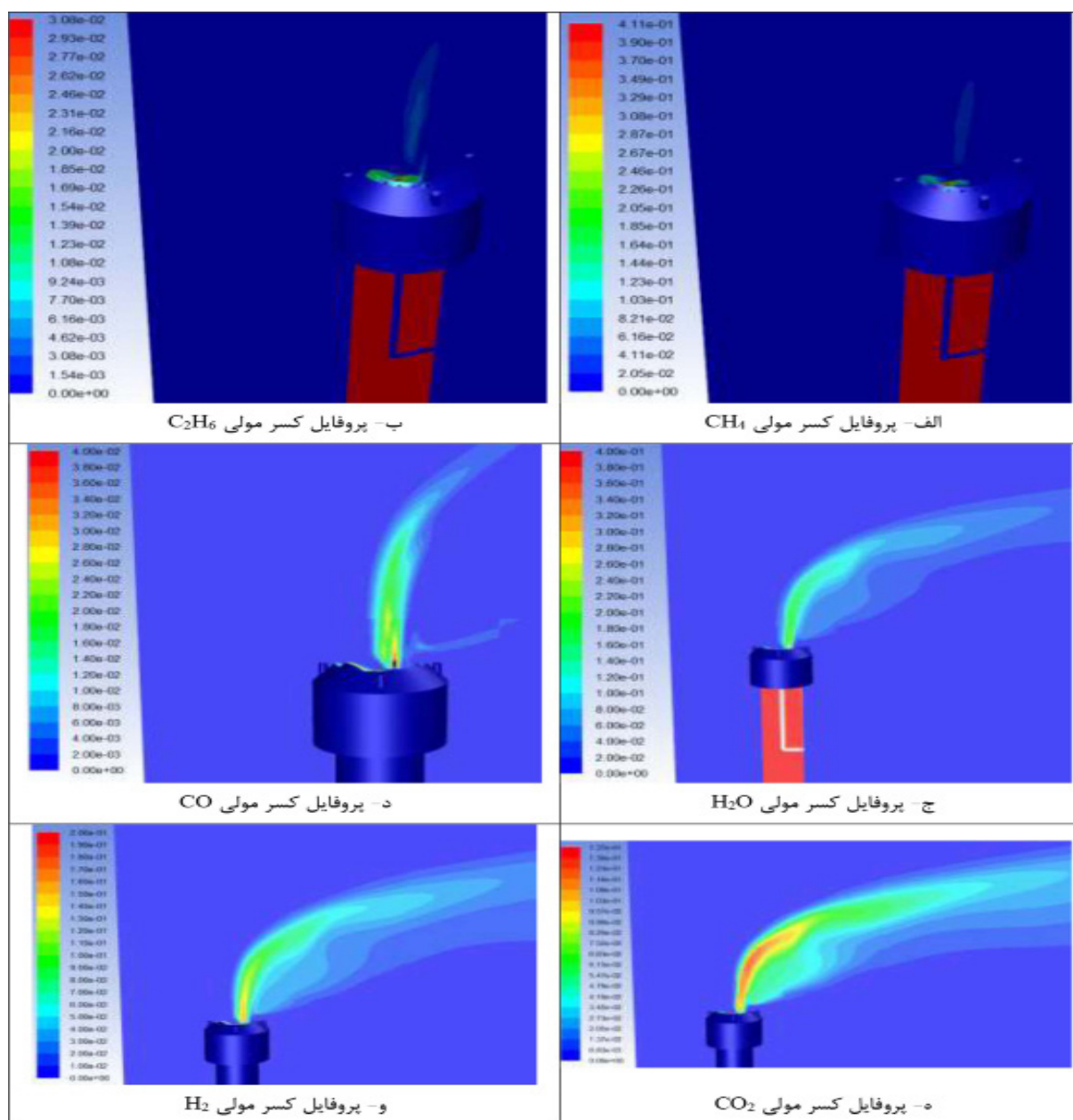
شکل ۹ بردارهای سرعت در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوخت‌دار نوک تیپ فلر

همان‌طور که در شکل مشخص است مقداری از هوای محیط به‌داخل تیپ فلر کشیده شده و با گازهای ارسالی مخلوط شده و شعله تشکیل می‌گردد. مسیر حرکت بخار آب تزریقی به‌همراه گازهای ارسالی به فلر LP و گازهای حاصل از احتراق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است تفاوت سرعت بخار آب و گازهای ارسالی به فلر و در محدوده تزریق بخار آب در تیپ فلر مشهود است. همچنین در شکل ترسیم شده، مشخص است که بخار آب تزریق شده به‌صورت جت و با سرعت

بسیار زیاد و اختلاط نامناسب از تیپ فلر خارج می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD فلر صنعتی حاضر به‌صورت کیفی در انطباق با نتایج کاستشیرا و ادگار [۱۴-۱۲] می‌باشد. لازم به ذکر است که به‌علت تفاوت فاحش در هندسه تیپ فلر و پارامترهای هندسی مربوطه، مقایسه کمی نتایج مقدور نمی‌باشد. بدیهی است که برای اختلاط بهتر می‌توان از نازل‌های بیشتری برای تزریق بخار آب استفاده گردد. تزریق بخار سبب افزایش آشفته‌گی برای اختلاط بهتر و وارد کردن هوا به شعله می‌شود. در حقیقت، بخار دمای ناحیه احتراق را به‌واسطه رقیق کردن و ایجاد آشفته‌گی پایین می‌آورد. در واقع بخار آب با ذرات کربن داغ واکنش می‌دهد تا CO ، CO_2 و H_2 را تشکیل دهد. بخار آب ذرات کربن را قبل از آنکه خنک شده و تشکیل دوده دهند، حذف می‌کند. از طرف دیگر اضافه شدن بخار با دمای بالا، رادیکال‌های H_2 و OH را تولید می‌کند که در تبدیل کربن به رادیکال‌های CH_2 و CHO نقش مؤثری دارد. پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر LP شامل اتان و متان و نیز بخار آب تزریق شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، اجزاء خوراک گازی وقتی در بالای تیپ فلر به‌شعله (جبهه واکنش) می‌رسند در واکنش احتراق شرکت کرده و به محصولات تبدیل می‌شوند. همچنین پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق (CO ، CO_2) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج ترسیم شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است بخش عمده‌ای از واکنش‌های احتراقی در دهانه تیپ فلر به‌دلیل تشکیل شعله در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوخت‌دار نوک تیپ فلر انجام می‌پذیرد که منجر به کاهش سریع غلظت گازهای ارسالی به فلر در دهانه تیپ فلر می‌گردد (شکل ۱۱ الف و ب).



شکل ۱۰ مسیر حرکت بخار آب تزریقی به همراه گازهای ارسالی به فلر LP



شکل ۱۱ پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی و محصولات حاصل از احتراق در فلر LP

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است غلظت گازهای ارسالی (کسر مولی) به فلر شامل متان و اتان به‌ترتیب از مقدار ۰/۴۱ و ۰/۳۱ در دهانه تیپ فلر به‌علت واکنش‌های احتراقی در نقاط دورتر از آن روند کاهشی داشته و به‌دلیل احتراق کامل در اثر اختلاط مناسب با هوا به صفر می‌رسد. از طرف دیگر، غلظت (کسر مولی) محصولات حاصل از احتراق (CO , CO_2 , H_2) در مرکز جبهه واکنش دارای بیشینه مقادیر می‌باشند اما به‌علت پخش گازهای حاصل از احتراق (در نتیجه وزش باد) در محیط اطراف در نقاط دورتر از دهانه تیپ فلر غلظت این گازها کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج پروفایل دمای گزارش شده در شکل ۸ با توجه به تأثیر پذیرفتن پروفایل غلظت اجزاء از دما و کشیده شدن آنها به‌سمت راست تیپ فلر انسجام نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌گردد. همچنین با توجه به پروفایل غلظت مولی CO در شکل ۱۱ د مشخص است که به‌علت احتراق ناقص کسر مولی CO در ابتدای تیپ فلر (ناحیه ابتدایی و مرکزی شعله) بیشینه مقدار را دارد و در قسمت بالایی و به دور از نواحی تیپ فلر مقدار غلظت CO بسیار کم می‌شود. اما به‌علت اختلاط مناسب هوا با اجزای واکنش‌دهنده در ناحیه بالایی تیپ فلر، CO تولید شده با اکسیژن واکنش داده و کل CO می‌سوزد که در نتیجه CO_2 تولید شده و در قسمت‌های بالایی تیپ فلر مقدار غلظت مولی CO_2 (شکل ۱۱ ه) افزایش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی CFD فلر LP پالایشگاه گاز در مقیاس صنعتی و در شرایط عملیاتی و کارکردی انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اثر تمام پدیده‌های انتقال مرتبط شامل (انتقال مومنوم، حرارت، جرم، تابش، آشفتگی و واکنش‌های شیمیایی) همچنین شرایط محیطی شامل تزریق بخار به ناحیه احتراقی و 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 براساس 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 روابط حاصل شد. به‌طوری‌که در اطراف نازل‌های تزریق بخار، صفحات گازبند 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 LP در شرایط عملیاتی نشان می‌دهد که به‌علت وجود دمای بالا در مرکز شعله و کاهش دانسیته گازهای حاصل از احتراق، همچنین به‌علت تزریق بخار آب از نازل‌های طراحی شده در مرکز تیپ فلر و سرعت بسیار بالای بخار تزریق شده، محصولات حاصل از احتراق با سرعت بسیار زیادی به بالای تیپ فلر هدایت می‌شوند. نتایج مدل محاسباتی توسعه یافته نشان می‌دهد که تشکیل گردابه به‌علت اختلاف سرعت بالای بخار آب تزریق شده با گاز ارسالی به فلر، هیدرودینامیک بسیار پیچیده‌ای در تیپ فلر (محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار) ایجاد می‌شود که منجر به کشیده شدن مقداری از هوای بیرون به‌داخل تیپ فلر می‌شود. این پدیده سبب می‌شود که بخشی از شعله در محدوده صفحات گازبند تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر تشکیل گردد که نهایتاً منجر به افزایش دمای بدنه تیپ فلر (۸۰۰ K) می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی درخصوص برگشت شعله به‌داخل تیپ فلر منطبق با مشاهدات تجربی در واحد صنعتی می‌باشد. به‌طوری‌که بدنه داخلی تیپ فلر LP با توجه به کشیده شدن شعله به‌داخل تیپ فلر دچار تنش‌های حرارتی می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

ν : نوسانات سرعت (m.s^{-1})	P : فشار (bar)
G : تشعشع تابیده (W/m^2)	g : شتاب جاذبه (m.s^{-2})
R : ثابت جهانی گازها ($\text{kJ.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	ν : سرعت (m.s^{-1})
M_i : جرم ملکولی (kg.kgmol^{-1})	H : انتالپی کلی ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
V : حجم (m^3)	h : آنتالپی اجزا ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
D : ضریب نفوذ کلی ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)	j : فلاکس جرمی ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
k_m : ضریب هدایت گرمایی, ($\text{kJ.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	q : فلاکس حرارتی ($\text{kJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
	S : ترم منبع مومنتوم ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$)
	D_{ij} : ضریب نفوذ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
	$D_{i,eff}$: ضریب نفوذ موثر ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
	Y_i : جزء جرمی اجزاء گاز (kgmol.m^3)
	R_i : ترم منبع مربوط به واکنش ($\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$)
	T : دما (K)
	S_m : ترم منبع پیوستگی

Greek Letters

ρ : دانسیته (kg.m^{-3})
μ : ویسکوزیته ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
ν : ویسکوزیته سینماتیک ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
ε : اضمحلال انرژی جنبشی نوسانات آشفته

Subscript Letters

i : عدد اجزاء
j : عدد شمارنده جزء دوم
m : مخلوط

k_i : ثابت واکنش ($\text{mol.s}^{-1}.\text{gr}^{-1}.\text{bar}^{-1}$)
k : انرژی جنبشی نوسانات آشفته ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$)
E_i : انرژی فعال سازی (kJ.kgmol^{-1})

مراجع

- [۱]. مدیریت بهداشت و ایمنی محیط زیست شرکت ملی پالایش و پخش، (۱۳۹۱)، آشنایی با فلر.
- [2]. Stone, D. K., Lynch, S. K., Pandullo, R. F., Evans, L. B., & Vatauvuk, W. M. (1992). Flares. Part I: Flaring technologies for controlling VOC-containing waste streams, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 42(3), 333-340, doi.org/10.1080/10473289.1992.10466996.
- [3]. Stone, D. K., Lynch, S. K., Pandullo, R. F., Evans, L. B., & Vatauvuk, W. M. (1992). Flares. Part II. Capital and annual costs, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 42(4), 488-493, doi.org/10.1080/10473289.1992.10467008.
- [4]. Bahadori, A. (2014). Chapter 6-Blow-Down and Flare Systems. *Natural Gas Processing*. Boston: Gulf Professional Publishing, 275-312.
- [5]. Karthikeyan, B. (2020). Manage Change to Flare Systems. *Chemical Engineering Progress*, 116(1), 36-39.
- [6]. AKTAS, Y., & ÖZARIK, Ö. (2014). Dynamics of operation for flare systems. *Petroleum technology quarterly*, 19(2), ISSN 1362-363X.
- [7]. Kumar, A., Phadatare, S., & Deore, P. (2020). A guide on smokeless flaring: air/steam assisted and high pressure flaring, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4, 12, ISSN No. 2455-2143.
- [8]. Huang R.F., Chang J.M., (1994), The stability and visualized flame and flow structures of a combusting jet in cross flow, *Combust. Flame*, 98(3), 267-278, doi.org/10.1016/0010-2180(94)90241-0.
- [9]. Bourguignon, E., Johnson, M. R., & Kościuk, L. W. (1999). The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow, *Combustion and flame*, 119(3), 319-334, doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00068-1.
- [10]. Johnson, M. R., Wilson, D. J., & Kościuk, L. W. (2001). A fuel stripping mechanism for wake-stabilized jet diffusion flames in crossflow, *Combustion Science and Technology*, 169(1), 155-174, doi.org/10.1080/00102200108907844.
- [11]. Kościuk, L., Johnson, M., & Thomas, G. (2004). University Of Alberta Flare Research Project: final report November 1996-September, 2.

- [12]. Castineira, D., & Edgar, T. F. (2006). CFD for simulation of steam-assisted and air-assisted flare combustion systems, *Energy & fuels*, 20(3), 1044-1056, doi.org/10.1021/ef050332v.
- [13]. Castineira, D., & Edgar, T. F. (2008). Computational fluid dynamics for simulation of wind-tunnel experiments on flare combustion systems, *Energy & fuels*, 22(3), 1698-1706, doi.org/10.1021/ef700545j.
- [14]. Castineira, D., & Edgar, T. F. (2008). CFD for simulation of crosswind on the efficiency of high momentum jet turbulent combustion flames, *Journal of Environmental Engineering*, 134(7), 561-571, doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:7(561).
- [15]. Lawal, M. S., Fairweather, M., Ingham, D. B., Ma, L., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2010, January). Computational Study of a Lifted Turbulent Jet Flame in a Cross-flow: Flame Length and Emissions, In *Proceedings of the 2nd Annual Gas Processing Symposium*, 237-245, Elsevier, doi.org/10.1016/S1876-0147(10)02026-4.
- [16]. Langman, A. S., & Nathan, G. J. (2011). Influence of a combustion-driven oscillation on global mixing in the flame from a refinery flare, *Experimental thermal and fluid science*, 35(1), 199-210, doi.org/10.1016/j.exptthermfluidsci.2010.09.002.
- [17]. Singh, K. D., Dabade, T., Vaid, H., Gangadharan, P., Chen, D., Lou, H. H., & Martin, C. B. (2012). Computational fluid dynamics modeling of industrial flares operated in stand-by mode, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(39), 12611-12620, doi.org/10.1021/ie300639f.
- [18]. Singh, K. D., Gangadharan, P., Chen, D. H., Lou, H. H., Li, X., & Richmond, P. (2014). Computational fluid dynamics modeling of laboratory flames and an industrial flare, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(11), 1328-1340, doi.org/10.1080/10962247.2014.948229.
- [۱۹]. جوادى س.، عنبرسوز م.، قبادى ع. و كهرم م.، (۱۳۹۳)، بررسى عددى اثر باد بر شكل شعله در مشعل بلند پالایشگاه سرخون و قشم، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، جلد ۲۸، (۲)، ۱۶.
- [۲۰]. صباغ ر. و رهبر ن.، (۱۳۹۴)، بررسى تأثیر شكل هندسى بر بیشینه دمای جداره نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن، مجله مدل‌سازی در مهندسی، جلد ۴، ۴.
- [21]. Javadi, M., Anbarsooz, M., Ghobadi, A., & Kahrom, M. (2017). Numerical Investigation of Wind Effects on the Flame Shape of Sarkhoon and Qeshm's Refinery Flares, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 28(2).
- [22]. Irani, M., & Bahjat, Y. (2023). Investigating the Medium Pressure Flare Performance of South Pars Gas Refinery in Design and Operational Conditions Using CFD Simulation, *Journal of Farayandno*, 18(82), 5-23..