



بررسی تاثیر تغییر دبی بر روی چگونگی عملکرد فلر با استفاده از مدل سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

آرزو نوروزی یامچلو¹، عزت اله جودکی^{2*}، امیر حیدری نسب¹

¹ گروه مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

² دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، کدپستی 38156-8-8349، اراک، ایران

دریافت: 96/9/22 پذیرش: 97/5/3

چکیده

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزار عددی مناسبی برای حل معادلات پیچیده جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی مانند مساله فلر است. در این تحقیق تاثیر تغییر دبی بر روی چگونگی عملکرد فلر یکی از پالایشگاه های نفت ایران در محدوده دبی واقعی 4000 پوند در ساعت با استفاده از مدل سازی به کمک CFD با نرم افزار انسیس فلوئنت ورژن 16,0 مورد مطالعه قرار گرفته است و همچنین هندسه و مش بندی سیستم توسط نرم افزار گمبیت 2,4,6 انجام شده است تا اثر تغییرات دبی گازهای خروجی روی دمای شعله، طول شعله، پروفایل غلظت گونه های حاصل از احتراق و الگوی جریان آشفته در شعله مورد بررسی قرار گیرد. محاسبات به صورت دو بعدی با شرط تقارن محوری می باشد که از مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد، مدل احتراق Non-Premixed Combustion، الگوریتم SIMPLE بر پایه فشار و حالت پایا استفاده شده و همچنین از اثرات باد صرف نظر شده است. به کمک تحلیل استقلال از مش بندی، برای دبی 4000 پوند در ساعت تعداد سلول 68700 انتخاب شد. نتایج مطالعات شبیه سازی نشان می دهد که تغییر دبی در محدوده دبی 4000 پوند در ساعت دمای بیشینه شعله را چندان تغییر نمی دهد ولی ارتفاعی که این دما در آن اتفاق می افتد را تغییر می دهد. طول شعله در دبی 4000 پوند در ساعت 14/9 متر و بازای هر 10% تغییر دبی طول شعله 0/66 متر تغییر می کند. همچنین مقادیر نرخ انرژی جنبشی اغتشاش (k) و نرخ اتلاف انرژی اغتشاش (ϵ) با افزایش دبی افزایش می یابد و گستره توزیع غلظت های هیدروژن و متان، در محدوده رویت شعله معادل 1% مولی می باشد و با افزایش دبی توزیع هر دو گسترده تر می شود و گستره توزیع غلظت دی اکسید کربن و آب نیز به ترتیب 5 و 10 درصد مولی خواهد بود و با افزایش دبی توزیع غلظت هر دو وسیع تر می شود.

کلمات کلیدی: تغییر دبی، فلر، مدل سازی، دینامیک سیالات محاسباتی

* e.joudaki@yahoo.com

مقدمه

هدف اصلی یک پالایشگاه، تبدیل نفت خام به محصولات مفید، نظیر بنزین، دیزل، نفت سفید و غیره است. این مهم از طریق فرآیندهای جداسازی (تقطیر، جذب، تبلور و غیره) و فرآیندهای تبدیل شیمیایی انجام می‌شود. این فرآیندها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در شرایط مشخصی از دبی، دما، فشار و ترکیب انجام پذیر می‌باشند. انحراف از شرایط طراحی باعث ایجاد وضعیت نامناسب در فرآیند شده تا حدی که جریانات گازی فرآیندها (به دلیل عمل نمودن شیرهای اطمینان) به سیستم فلر¹ پالایشگاه تخلیه می‌شوند. فلر دودکش یا لوله عمودی امتداد یافته‌ای است که به عنوان یکی از قسمت‌های ضروری در چاه‌های نفت، پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و کارخانه مواد شیمیایی جهت سوختن گازها و مایعات زائد، قابل اشتعال و سمی تخلیه شده، به کار می‌رود و می‌تواند از بروز خطرات آتش‌سوزی‌ها، انفجار و صدمه دیدن کارکنان جلوگیری نماید. احتراق در انتهای بالایی دودکش فلر و در ارتفاع، جایی که آتشخان فلر² و جرقه‌زن‌ها³ قرار گرفته‌اند، انجام می‌گیرد. در واقع فلر مواد قابل اشتعال و سمی و بخارات خورنده را به ترکیبات کم ضررتر تبدیل می‌نماید [1].

دینامیک سیالات محاسباتی عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت، جرم و پدیده‌هایی نظیر واکنش‌های شیمیایی براساس شبیه‌سازی کامپیوتری و روش‌های ریاضیات عددی می‌باشد. CFD⁴ روش بسیار توانایی می‌باشد و طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی را شامل می‌شود. ساختار برنامه CFD روش‌های عددی است، به طوری که مسائل جریان سیال با استفاده از این روش‌ها قابل حل می‌باشد. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی به صورت یک ابزار پر قدرت و توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال و انتقال حرارت و جرم در سیستم‌هایی با هندسه پیچیده برای محققین و مهندسين درآمده است [2].

خواص سینتیک شیمیایی، تشعشعی، انتقالی و ترمودینامیکی، شرایط ورودی سوخت و هوا، سرعت، دما و ترکیبات، شرایط مرزی، دمای دیواره جنبه‌های مهم مسائل مدل کردن احتراق می‌باشد. درک ناکافی از مکانیزم‌های احتراق، آشکار نبودن روابط بین مکانیزم‌ها و ساختار اغتشاش و حل معادلات در روش‌های عددی را می‌توان به عنوان برخی از مشکلات مدل‌سازی احتراق، مانند مسئله فلرهای صنعتی برشمرد [3]. با توجه به اینکه راه حل تحلیلی معادلات حاکم برای احتراق فلرها امکان پذیر نیست. بدیهی است که برخی از روش‌های عددی باید در نظر گرفته شود، اما این روش‌ها به دلیل تعداد زیادی از معادلات و متغیرهای درگیر در فرآیند احتراق، درجه بالای غیرخطی بودن برخی از این معادلات و نیاز به ترکیب جریان آشفته، شیمی، تابش و غیره به شدت پیچیده هستند. در واقع CFD ابزار عددی مناسب برای حل معادلات پیچیده جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی مانند مسئله فلر می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی حل هم‌زمان مجموعه‌ای از معادلات انتقالی حاکم برای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها با استفاده از روش‌های

¹ Flare

² Flare Tip

³ Pilot Burner

⁴ Computational Fluid Dynamics



عددی است که منجر به به دست آمدن توزیع دما، سرعت، فشار، غلظت و بقیه پارامترهای ترمودینامیکی می شود و روش دیگری علاوه بر روش های تحلیلی و تجربی در دسترس را برای حل مسائل دینامیک سیالات ارائه می کند. این در حالی است که اگر جریان آشفته باشد معادله مدل آشفتگی گونه ها نیز باید حل شود [4].

در سال های اخیر مطالعاتی در زمینه فلر و مدل سازی آن با استفاده از CFD انجام شده است که برخی از آنها عبارتند از کانوار و همکاران در سال 2014 از سه مدل مختلف برای معتبر ساختن مدل CFD تحت شرایط القاء با بخار _ هوا و در حضور باد مخالف استفاده کرده اند. تمرکز مطالعه پیش رو مدل سازی فلرهای صنعتی و شعله های آزمایشگاهی گونه های سوختی و مقایسه بازده احتراق گونه ها با داده های تجربی است که مدل احتراق (EDC)¹ با یک هندسه جدید و آسان باعث بهبودی دقت محاسباتی بازدهی احتراق شد [5]. جاتاله و همکاران در سال 2012 با استفاده از مدل LES نتایج شبیه سازی CFD را با بازدهی تجربی اندازه گیری شده فلر آزمایشگاهی به قطر 4 اینچ در تونل باد اعتبار سنجی کردند [6]. در سال 2012 کانوار و همکاران از مدل سازی CFD به عنوان ابزاری برای پیش بینی عملکرد فلر استفاده کرده اند. در این کار از مکانیسم واکنش کاهش یافته استفاده شده است، مکانیسم واکنش بوسیله ترکیب دو مکانیسم احتراق² GRI 3.0²⁵ و USC²⁶ بوجود آمده است و به 50 گونه کاهش یافته است که این مکانیسم تطابق خوبی را با داده های تجربی استاندارد دارا می باشد [7]. کاستینریا و ادگار در سال 2008 برای پیش بینی تاثیر باد مخالف بر روی مومنتوم بالا و احتراق آشفته فلر از شبیه سازی سه بعدی بر روی اینکه چگونه بازدهی احتراق می تواند تحت تاثیر باد مخالف در جریان سرعت بالا قرار گیرد استفاده کرده اند. در حل اولیه از مدل EDC برای تصحیح نتایج استفاده شده است و همچنین برای حل از الگوریتم ISAT⁴ که پذیرفته شده در سیستم معادلات حالت گذرا می باشد استفاده شده است. نتایج نشان می دهد در سرعت های پایین باد مخالف شعله عملکرد بهتری برای تبدیل سوخت به CO₂ دارد یعنی راندمان احتراق بالاست [8]. در سال 2008 کاستینریا و ادگار مطالعات دیگری بر روی سوزاندن شعله در حجم ثابت در تونل باد انجام دادند. رویکرد اول شامل مطالعات تجربی مقیاس کاهش یافته و نفوذ آشفته شعله ای که در تونل باد واقع شده است می باشد. رویکرد دوم شامل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای درک رفتار فلرهای صنعتی می باشد. نتایج نشان می دهد که سرعت بالای باد مخالف بازدهی احتراق را تحت تاثیر قرار می دهد در نهایت تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه سازی مشاهده شد استفاده از CFD در مطالعه بازدهی فلر به صرفه تر از آزمایش تونل باد پرهزینه می باشد زیرا به ما این اجازه را می دهد که پروفایل غلظت گونه ها و الگوی آشفته جریان در شعله را مورد تحلیل قرار دهیم که این کار در حالت تجربی غیرممکن است [9]. در سال 1394 صباغ و رهبر مطالعاتی را به منظور آگاهی از نحوه توزیع دمای جدار فلر، مدل سازی عددی بر روی هندسه تیپ فلر برای احتراق گازهای خروجی از آن انجام داده اند. به این منظور برای سه شکل هندسی دهانه فلر

¹ Eddy Dissipation Concept

² Gas Research Institute

³ University of Southern California

⁴ Isat Algorithm

که شامل شکل‌های استوانه‌ای، مخروط باز و مخروط بسته می‌باشند، توزیع دمای جدار آن تعیین گردیده است. نتایج شبیه‌سازی در شرایط مختلف وزش باد نشان می‌دهند که هندسه مخروطی با دهانه باز نازل هوا شرایط بهتری برای احتراق فراهم می‌نماید [4]. کستیوک و همکاران در سال 2004 نشان دادند که فلرها در هوای ساکن به خوبی می‌سوزند و افزایش وزش باد باعث افت بازده می‌شود. بر اساس این مطالعه، راندمان احتراق با کاهش ارزش حرارتی گاز و کاهش قطر ستون مرتفع حامل گاز نیز کاهش می‌یابد به عبارتی فلرهای با قطر بیشتر به دلیل اثرات سرعت بالاتر بر پایداری شعله، حتی در برابر باد احتراق بهتری دارند [10].

بررسی تاثیر تغییر دبی بر روی عواملی مانند طول شعله، دمای شعله و... در عمل بسیار هزینه‌بر و دشوار خواهد بود، درحالی که می‌توان به کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی که بسیار به صرفه‌تر از روش‌های تجربی می‌باشد عملکرد فلر را مورد بررسی قرار داد. همچنین CFD به ما این امکان را می‌دهد که پروفایل غلظت گونه‌ها و الگوی جریان آشفته در شعله را مورد تحلیل قرار دهیم که این کار در حالت تجربی غیر ممکن می‌باشد. در این تحقیق تاثیر تغییر دبی بر روی چگونگی عملکرد فلر یکی از پالایشگاه‌های ایران با استفاده از مدل‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با نرم‌افزار انسیس فلوئنت ورژن 16,0 مورد ارزیابی قرار گرفته است و همچنین هندسه و مش‌بندی سیستم توسط نرم‌افزار گمبیت 2,4,6 انجام شده است تا اثر تغییرات دبی گازهای خروجی روی دمای شعله، طول شعله، پروفایل غلظت گونه‌های حاصل از احتراق و الگوی جریان آشفته در شعله مورد بررسی قرار گیرد.

مدل‌سازی احتراق فلر

نقطه شروع برای مدل کردن هر گونه جریان واکنش از جمله احتراق فلرهای صنعتی ترتیب دادن مجموعه‌ای از معادلات انتقال حاکم برای جرم، گونه‌ها، مومنتوم و انرژی است. متأسفانه، حل مستقیم معادلات حاکم برای فلرهای صنعتی بسیار دشوار است. اولاً جریان صنعتی به وضوح آشفته و شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان آشفته امکان پذیر نیست به دلیل طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های زمانی و طول. بنابراین برخی از انواع مدل آشفته باید اعمال شود. در مرحله دوم، مکانیسم شیمیایی واقع بینانه برای احتراق هیدروکربن را نمی‌توان توسط یک معادله واکنش تنها توصیف کرد. این مدل‌ها ممکن است شامل ده‌ها گونه و صدها نوع از واکنش برای تعداد محدودی از سوخت‌ها می‌باشند. از این رو برخی ساده سازی‌های شیمیایی باید ساخته شود [11].

معادلات حاکم بر مسئله احتراق فلر

دینامیک سیالات محاسباتی همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد حل مجموعه از معادلات انتقال با استفاده از روش‌های عددی است. معادلات انتقال برای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌های شیمیایی حل می‌شود. از آنجایی که معادلات حاکم وابسته به زمان هستند حل دقیق برای فلرهای صنعتی عملی نمی‌باشد. معادله نویر استوکس مورد قبول برای فلرهای صنعتی می‌باشد ولی از نظر محاسباتی پرهزینه است. استفاده از این



مدل در بسیاری از مسائل احتراق به دلیل سادگی توصیف رفتار جریان قابل قبول می باشد. بنابراین در این مطالعه از معادله RANS¹ که برای مدل کردن آشفتگی متداول تر می باشد استفاده خواهد شد که این عمل موجب کاهش زمان محاسباتی نیز می گردد. معادلات اساسی برای حل مدل احتراق RANS شامل جرم، انرژی، مومنتوم و گونه های شیمیایی است [5].

معادله پیوستگی

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

که در آن ρ چگالی جریان و $\bar{v}$ سرعت متوسط برداری می باشد [11].

معادله بقای مومنتوم

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \bar{v}) + (\nabla \bar{v})^T) - \rho \bar{v}' \bar{v}' \quad (2)$$

جایی که $\bar{v}'$ نوسانی بردار سرعت توبولانس (آشفته)، μ نشان دهنده ویسکوزیته مولکولی دینامیکی سیال بوده و پارامتر p فشار می باشد. خط های روی ترم ها نشان دهنده مقادیر میانگین هستند. در ارتباط با تنش های رینولدز، $\rho \bar{v}' \bar{v}'$ گزاره های اضافه ای هستند که از طریق روش تجزیه متغیرهای آشفتگی به اجزای میانگین و در حال نوسان به دست می آیند، این گزاره ها باید به گونه ای مدل سازی شوند که به معادله فوق الذکر نزدیک گردند. در یک رویکرد رایج از فرضیه بوزینیسک برای مرتبط ساختن مقادیر تنش های رینولدز با مقادیر گرادیان سرعت متوسط استفاده می کنند:

$$-\bar{v}' \bar{v}' = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\nu_t (\nabla \cdot \bar{v}) + k) \delta_{ij} \quad (3)$$

در جایی که نماد جمع انیشتین که به شکل δ_{ij} یا دلتا کرونکر است، استفاده می شود، ν_t ویسکوزیته سینماتیک گردابی است و k انرژی جنبشی آشفتگی است که با رابطه زیر تعریف شده است:

$$k = \frac{1}{2} \bar{v}'_i \bar{v}'_i \quad (4)$$

در اینجا بر اساس فرضیه بوزینیسک از مدل معروف $\epsilon - k$ استفاده شده که در این روش مدل آشفتگی نیز اعمال شده است. مزیت این رویکرد هزینه محاسباتی نسبتاً پایین در مقایسه با محاسبه با ویسکوزیته گردابی است. برای مدل $\epsilon - k$ ویسکوزیته گردابی از رابطه پرنتل کولموگروف به دست آمده است:

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

¹ Reynolds-averaged Navier-Stokes

به طوری که در معادله فوق الذکر ε میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی میباشد [11].

معادله بقای انرژی

زمانی که انتقال حرارت در بخش‌های سیال یا جامد در یک مسئله مورد توجه قرار می‌گیرد، این ضرورت به وجود می‌آید که معادله انرژی حل گردد. همچنین با توجه به انتقال حرارت در مسئله احتراق معادله انرژی باید در نظر گرفته شود که این معادله در یک شکل رایج و کلی خود به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_i \vec{j}_i + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (6)$$

در معادله فوق k_{eff} نشانگر میزان هدایت موثر است، T دما، S_h ترم چشمه انرژی، $\vec{j}_i$ شار پخش گونه‌های i بوده و h نشان دهنده ی آنتالپی است [11].

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد

در میان مدل‌های مختلف آشفتگی که می‌توانند در چارچوب فرمول RANS اعمال گردند، ساده‌ترین مدل‌های کامل مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن نتیجه حل دو معادله انتقال متفاوت از هم باعث می‌شود که مقیاس اندازه و سرعت آشفتگی به صورت مستقل تعیین گردند. در مدل استاندارد $k-\varepsilon$ انرژی جنبشی آشفتگی با علامت k و میزان اتلاف آن با ε نشان داده می‌شوند که از طریق معادله انتقال زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تغییرات متوسط سرعت و G_b نشانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری بوده و $G_{1\varepsilon}$ نشان دهنده میزان سهم اتساع نوسانی در آشفتگی تراکم پذیر نسبت به میزان کل اتلاف میباشد [12].

مدل احتراق Non-Premixed Combustion

مبنای رویکرد مدل‌سازی غیرپیش‌آمیخته این است که تحت یک سری فرضیات ساده شده مشخص، وضعیت حرارتی آنی یک سیال مربوط به یک کمیت عددی اسکالر می‌باشد که با نام کسر مخلوط و به شکل f شناخته می‌شود. برای شعله‌های غیرپیش‌آمیخته ساده که می‌تواند به عنوان یک جریان مشترک



سوخت و اکسید کننده قلمداد گردد، جزء مخلوط برای عنصر i برای یک نقطه مشخص می‌تواند بر مبنای کسر جرمی عنصر Z_i در همان نقطه به صورت زیر تعریف شود:

$$[f]_i = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (9)$$

که در آن اندیس ox نشان دهنده‌ی مقدار جریان ورودی اکسیدکننده و اندیس $fuel$ نشان دهنده مقدار ورودی جریان سوخت است.

در زمان استفاده از مدل احتراق غیر پیش آمیخته، فلوئنت بایستی دو معادله پایدار برای هر دو کسر مخلوط میانگین یعنی $\bar{f}$ و واریانس کسر مخلوط $\bar{f}^2$ حل کند. معادله پایدار کسر مخلوط متوسط (متوسط زمانی) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (10)$$

گزاره S_m در معادله فوق تنها به دلیل انتقال جرم به فاز گازی از قطرات سوخت مایع یا ذرات در حال واکنش است و گزاره S_{user} یک گزاره‌ای است که توسط کاربر تعریف می‌شود. معادله پایدار برای واریانس کسر مخلوط متوسط به صورت زیر ارائه می‌شود که در آن $\bar{f}^2$ از طریق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}^2) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}^2) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\epsilon}{K} \bar{f}^2 + S_{user} \quad (11)$$

زمانی که $f' = f - \bar{f}$ ، مقادیر ثابت C_g و C_d به ترتیب برابر با 0/85، 86/2 و 2 هستند [12].

متودولوژی شبیه‌سازی CFD احتراق فلر

هندسه فلر

فرآیند محاسبات دو بعدی با تقارن محوری در نظر گرفته شده است. دبی طراحی فلر مربوطه 100000 پوند در ساعت می‌باشد. با توجه به اینکه دبی واقعی کارکرد پالایشگاه مورد نظر 4000 پوند در ساعت است (11، 1 پوند در ثانیه)، ابعاد سیستم از آنجایی که باید پاسخگوی این مقدار دبی باشد 22 در 30 متر در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت مساله، محاسبات حالت پایا در نظر گرفته شده است از اثرات باد نیز صرف نظر شده است و همچنین از انتقال حرارت تشعشی نیز صرف نظر شده است. در این تحقیق، تمامی محاسبات در شرایط پایا انجام شده و مقادیر باقیمانده محاسبات برای تمامی معادلات پیوستگی، ممنتوم، انرژی، جنبشی اغتشاش، نرخ اتلاف انرژی و ترکیب درصد اجزا مقدار 0/001 در نظر گرفته شده است. شکل 1 نشان دهنده هندسه سیستم می‌باشد.



شکل 1. هندسه سیستم با توجه به دبی 4000 پوند در ساعت

شرایط مرزی

مشخصات کلی ورودی و خروجی جریان و نحوه در نظر گرفتن شرایط مرزی با توجه به شکل 1 می باشد. محور X محور تقارن می باشد. ورودی جریان گاز و هوا از محور Y وارد می شود. روبروی محور X دیواره تعریف شده و از اثر باد صرف نظر شده است. روبروی محور Y نیز خروجی جریان تعریف شده است. اطلاعات نوع شرایط مرزی در ایجاد شبکه به شرح جدول 1 می باشد؛

جدول 1. اطلاعات شرایط مرزی هندسه ایجاد شده

عنوان	نوع
ورودی گاز احتراق	جریان ثابت ورودی (mass flow in let) (دما، سرعت و ترکیبات جریان ورودی ثابت)
ورودی جریان هوا	سرعت ثابت ورودی (velocity in let)
مابقی جریان ورودی	سرعت ثابت صفر ورودی
جداره کناری	تقارن آینه ای (symmetry)
محور تقارن	تقارن محوری (axis)
خروجی سیستم	فشار آزاد خروجی (pressure outlet) (مشخصات جریان مورد محاسبه خواهد بود)

مش بندی

در این محاسبات برای هندسه مورد نظر مش با ابعاد 100 در 100 میلی متر یعنی تعداد سل 68700 دقت بیشتری داشت در نتیجه می توان ادعا نمود که با درشت تر یا ریزتر کردن تعداد مش، دقت محاسبات نسبت به این حالت بهبود نیافت. در نتیجه این مش به عنوان مش بهینه انتخاب شد و کلیه محاسبات شبیه سازی نیز در محدوده دبی 4000 پوند در ساعت به کمک همین تعداد مش انجام شده است.



مدل جریان

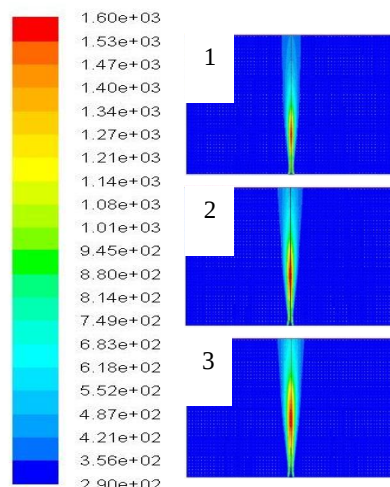
انتخاب مدل جریان آرام یا مغشوش و انتخاب دیدگاه مدل سازی اغتشاش امری بسیار مهم در شبیه سازی CFD محسوب می شود. با توجه به سرعت جریان ورودی (که برای دبی 4000 پوند در ساعت معادل 0/5 متر در ساعت) خواهد بود و ابعاد مساله (قطر 48 اینچ معادل 1/21 متر) و محدوده دانسیته متوسط گازهای ورودی (0/877 کیلوگرم در مترمکعب) و ویسکوزیته (0/000014 متر در مجذور ثانیه)، رینولدز در حدود 38000 می باشد که در محدوده کاملاً مغشوش خواهد بود. بنابراین جریان مغشوش می باشد در نتیجه باید از مدل آشفتگی مناسب برای پدیده احتراق استفاده نمود. در این تحقیق از مدل $k-\epsilon$ استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل احتراق

در این تحقیق از مدل احتراق Non-Premixed Combustion استفاده شده است که معمولاً از این مدل برای به کارگیری در شرایطی مانند احتراق فلر که سوخت و هوا قبل از احتراق با هم ترکیب نمی شوند به کار گرفته می شود. همچنین مبنای محاسبات در این مدل بر اساس محاسبات مجموعه دیتای احتراق pdf می باشد که در هر مرحله از شبیه سازی مورد محاسبه قرار می گیرد. مقادیر و تنظیمات مورد نیاز برای مدل احتراق نیز بر اساس نتایج اخذ شده از پالایشگاه مربوطه تنظیم و به نرم افزار وارد شده است. مشخصات درصد ترکیبات گازهای ورودی به فلر به شرح جدول 2 در نظر گرفته شده است.

جدول 2، ترکیب درصد گازهای ورودی به فلر

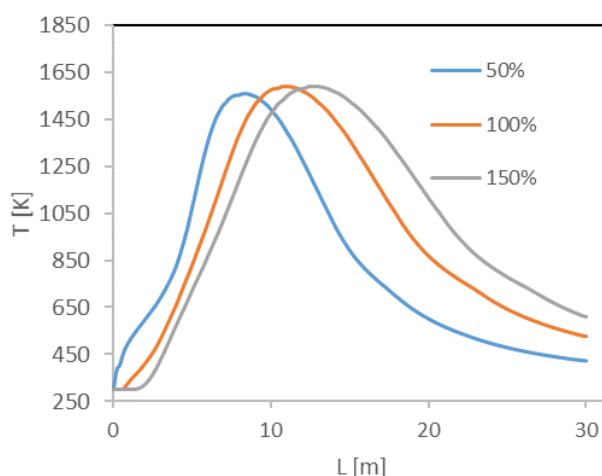
درصد مولی گاز ورودی در دبی 4000 پوند در ساعت	ترکیبات	درصد مولی گاز ورودی در دبی 4000 پوند در ساعت	ترکیبات
6/2	n-C ₄ H ₁₀	0/7	O ₂
2/0	i-C ₅ H ₁₂	2/6	N ₂
1/2	n-C ₅ H ₁₂	32/5	H ₂
0/7	C ₆ +	14/0	CH ₄
5/5	H ₂ S	11/3	C ₂ H ₆
0/3	CO ₂	18/6	C ₃ H ₈
		4/3	i-C ₄ H ₁₀



شکل 2. کانتور دما در 50 % (1)، 100% (2) و 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

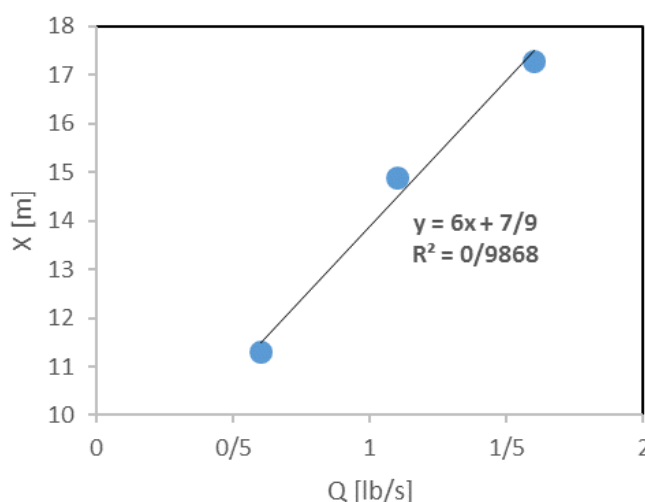
همان گونه که از شکل 2 پیداست، با افزایش دبی، نقطه پیدایش شعله از محل خروج گاز فاصله بیشتری خواهد داشت. به عبارت دیگر با افزایش دبی گاز، احتراق در فاصله بیشتری نسبت به محل خروج گاز انجام خواهد پذیرفت. این امر در عمل نیز توجیه پذیر است؛ چرا که بیشتر بودن دبی، باعث تاخیر در احتراق شده است.

در شکل 3 تغییرات دما بر اساس طول محور شعله نمایش داده شده است دمای بیشینه برای دبی های 50%، 100% و 150% به ترتیب 1556، 1589 و 1591 کلوین محاسبه شده است. بنابراین تغییر دبی بر دمای شعله و بیشینه دمای مرکز شعله تاثیر چندانی ندارد.



شکل 3: تغییرات دمای محور شعله در دبی های مختلف 50%، 100% و 150% از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

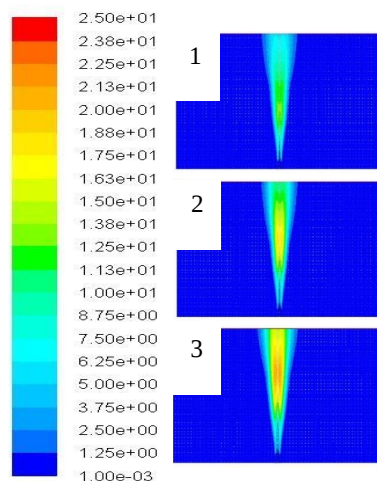
در نمودار 4 تغییرات طول شعله برحسب دبی‌های مختلف نشان داده شده است. (برای ارزیابی ابعاد شعله (طول شعله) در نتایج شبیه‌سازی، مرز دمایی 1100 درجه سانتیگراد (1373 درجه کلوین) گزارش شده است. در واقع دمای 1100 درجه سانتیگراد به عنوان معیار تعیین مرز طول شعله قابل رویت فلر مد نظر قرار گرفته است). لازم به اشاره است که با توجه به شکل 3 و مرز دمایی رویت شعله طول شعله برای دبی‌های 50%، 100% و 150% از دبی واقعی به ترتیب $11/2$ ، $14/9$ و $17/3$ متر محاسبه شده است. بدین ترتیب با توجه به شکل 4 می‌توان گفت برای هر 10% تغییر دبی نسبت به دبی واقعی، طول شعله حدود 0/66 متر تغییر خواهد کرد.



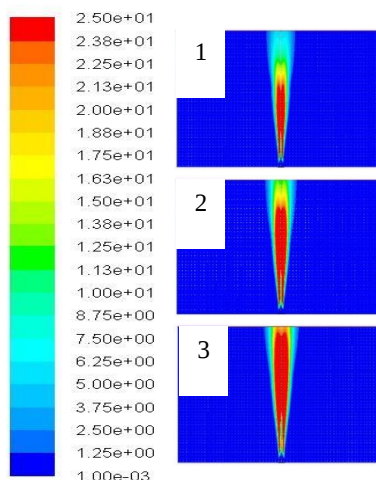
شکل 4. تغییرات طول شعله بر اساس تغییر دبی ورودی در محدوده دبی 4000 پوند در ساعت

در شکل 5 کانتور انرژی جنبشی اغتشاش نشان داده شده است. مقادیر k می‌تواند نشان دهنده میزان انرژی جنبشی ناشی از جریان مغشوش تحت تاثیر اختلاط باشد. مشاهده می‌شود که انرژی جنبشی ناشی از اغتشاش در میزان دبی‌های بالای گاز به شدت افزایش یافته است. این امر نشان دهنده بیشتر بودن توربولانسی اغتشاش سیستم و کاهش گرادیان‌های بالای فلاکچودیشن‌های سرعت می‌باشد که نشان دهنده نرخ اتلاف انرژی بالای ناشی از اغتشاش است؛ به عبارت دیگر، با افزایش دبی، میزان انرژی جنبشی اغتشاش جریان افزایش یافته است.

در شکل 6 کانتور نرخ اتلاف انرژی نشان داده شده که موید میزان تبدیل اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش به سایر انرژی‌هاست. مشابه آنچه برای انرژی جنبشی اختلاط رخ داده، اینجا نیز با افزایش میزان دبی گاز، گستره میزان نرخ اتلاف انرژی در محدوده هندسه مورد مطالعه به شدت افزایش یافته است. این امر ناشی از تغییرات مومنوم زیاد و همچنین تغییرات ناشی از مصرف و تولید ترکیبات مختلف در واکنش‌های احتراق است. بنابراین با افزایش دبی، میزان اتلاف انرژی‌های اغتشاش نیز به مراتب افزایش می‌یابد.

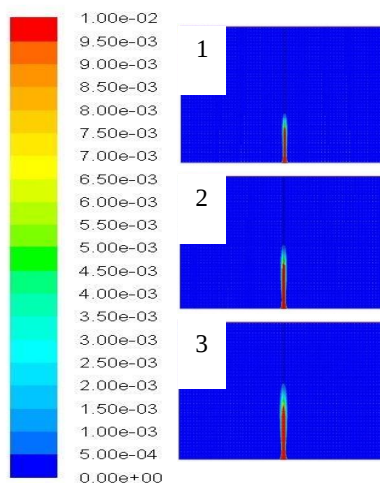


شکل 5. کانتور انرژی جنبشی اغتشاش برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)



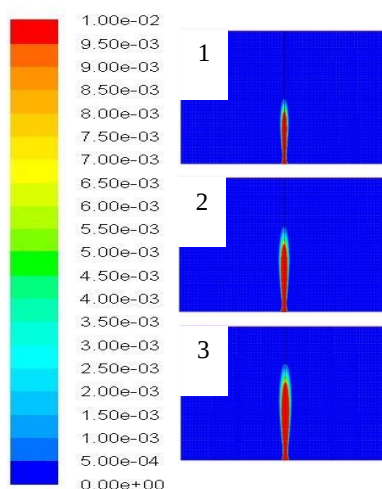
شکل 6. کانتور نرخ اتلاف انرژی (E) برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

در شکل 7 کانتورهای غلظت برای گاز متان نشان داده شده که به علت غلظت بالا در جریان گاز ورودی می‌تواند معیاری از گستره واکنش‌های احتراق باشد. در این شکل همان‌گونه که انتظار می‌رفت مشاهده می‌شود که توزیع غلظت گاز متان با افزایش دبی افزایش یافته و در گستره وسیعتری پخش شده است. این امر بدین معنی است که همزمان با بیشتر شدن حجم شعله با افزایش دبی، توزیع غلظت متان نیز متناسب با آن گسترده تر شده است. البته میزان حضور گاز متان از 1% مولی تجاوز نکرده است.



شکل 7. کانتور تغییرات غلظت متان برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

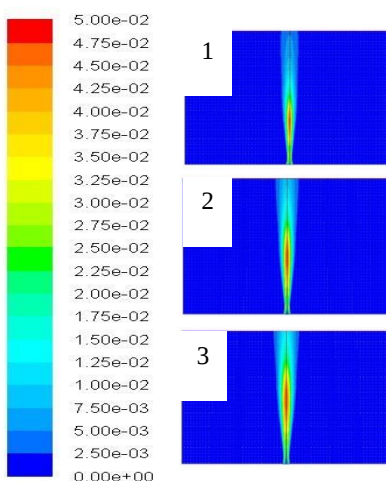
در شکل 8 کانتورهای غلظت برای گاز هیدروژن نشان داده شده است. مشابه کانتورهای گاز متان، همان گونه انتظار می رفت با افزایش دبی، توزیع گستره غلظت هیدروژن نیز افزایش یافته است؛ همچنین لازم به اشاره است که با افزایش دبی، میزان افزایش حضور هیدروژن در مقایسه با متان بیشتر است و این امر می تواند موید این باشد که گاز هیدروژن نسبت به متان قدرت نفوذ بیشتری دارد و تا فاصله های بیشتری از جریان ورودی حضور دارد و دیرتر از متان می سوزد. بهر حال میزان حضور هیدروژن در نزدیکی های مرکز شعله بیشتر از 1% نمی باشد.



شکل 8. کانتور تغییرات غلظت گاز هیدروژن برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

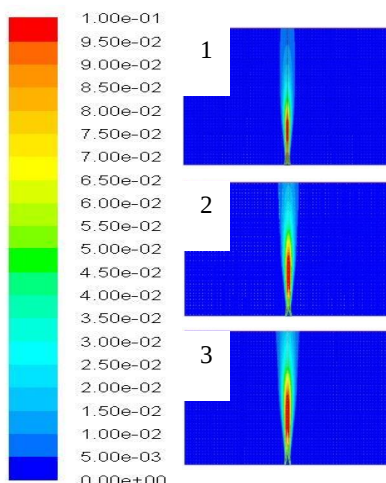
در شکل 9 کانتور غلظت مولی دی اکسید کربن که محصول اصلی احتراق است نشان داده شده است. همان گونه که از شکل پیداست افزایش دبی گاز ورودی تاثیر قابل ملاحظه ای بر گستره حضور گاز

دی اکسیدکربن دارد؛ همچنین بیشترین غلظت های کربن دی اکسید در نزدیکی های مرکز شعله مشاهده می شود و در دبی های بالاتر، حالت کشیده تری دارد. بنابراین بیشترین مقادیر احتراق نیز در این نواحی رخ می دهد و غلظت دی اکسیدکربن در میانه شعله تا نزدیکی های 5% مولی می رسد.



شکل 9. کانتور تغییرات غلظت گاز دی اکسیدکربن برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

شکل 10 کانتور غلظت بخار آب می باشد که مشابه گاز دی اکسیدکربن، یکی از اصلی ترین محصولات فرآیند احتراق است در شکل زیر نشان داده شده است. با افزایش دبی ورودی، میزان حضور آب نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است؛ به هر حال در مقایسه با گاز دی اکسیدکربن، مقدار بخار آب در میانه شعله از 10% مولی نیز فراتر رفته است؛ همچنین با توجه به دامنه نشان داده شده در این کانتور در مقایسه با کانتور دی اکسیدکربن، میزان حضور بخار آب بیش از دو برابر میزان حضور دی اکسیدکربن در فرایند احتراق خواهد بود.

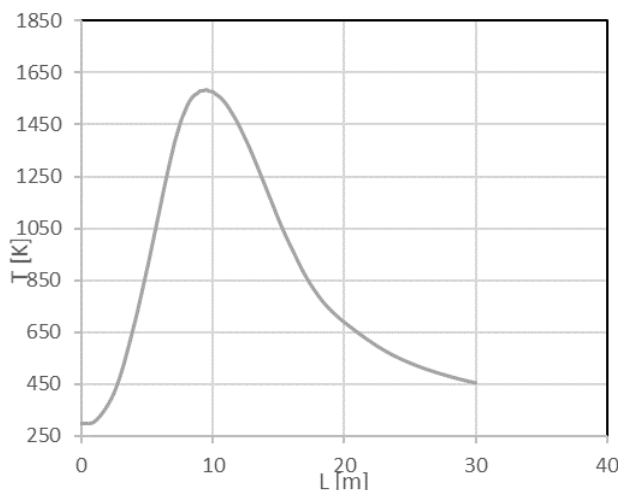


شکل 10: کانتور تغییرات غلظت آب برای میزان دبی گاز 50% (1)، 100% (2)، 150% (3) از دبی 4000 پوند در ساعت (0,6، 1,1 و 1,6 پوند در ثانیه)

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

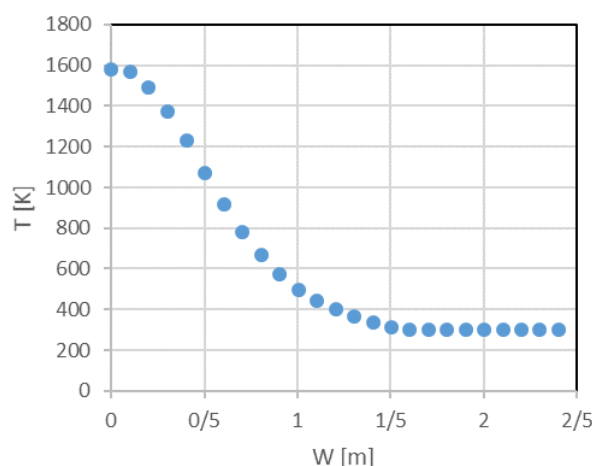
برای ارزیابی میزان اعتبار و قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی، مقایسه نتایج با داده‌های تجربی ضروری است. با توجه به ماهیت این مطالعه، برای اعتبارسنجی نتایج از ارزیابی طول شعله، دمای مرکز شعله و دمای اطراف شعله شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی بهره گرفته شده است. بر اساس گزارش اخذ شده از پالایشگاه مربوطه، برای دبی واقعی 4000 پوند در ساعت با تزریق 60 درصد بخار، با حضور باد (که می‌تواند حداکثر تا یک چهارم از ارتفاع شعله کم کند)، طول شعله 8 متر و دمای اطراف نزدیک فلر 293 درجه سانتیگراد (566 درجه کلوین) ثبت شده است.

با توجه به این امر که مطالعه ما بدون در نظر گرفتن بخار آب می‌باشد ولی با توجه به اطلاعات دریافتی از پالایشگاه مطابق شکل 11 تغییرات دمای محور شعله در شرایط مشابه (دبی 4000 پوند در ساعت و تزریق بخار 60%) را مبنای اعتبار سنجی خود قرار داده‌ایم زیرا حضور بخار همان‌طور که انتظار می‌رود موجب کمتر شدن ارتفاع شعله می‌شود که کاملاً مشهود می‌باشد زیرا ارتفاع در حضور بخار آب 12/7 متر و بدون بخار آب 14/9 متر محاسبه شده است. طول شعله در این شرایط با توجه به دمای قابل رویت فلر در این نمودار 12/7 متر برآورد می‌شود؛ با در نظر گرفتن حضور باد که حدود 25% ارتفاع را کاهش دهد، به مقدار 9/525 متر خواهیم رسید که تا حدی نزدیک به مقادیر گزارش شده واقعی (8 متر) می‌باشد؛ با توجه به ماهیت دشواری اندازه‌گیری ارتفاع شعله و ماهیت پدیده احتراق، خطای 19% را قابل قبول و نتایج شبیه‌سازی را می‌توان قابل اعتماد دانست. یکی دیگر از پارامترهایی که می‌توان برای اعتبار سنجی مورد بحث قرار داد دمای مرکز شعله می‌باشد که در مشاهدات تجربی، همواره بالاتر از 1100 درجه سانتیگراد (1373 کلوین) گزارش شده است. در تمامی مقادیر شبیه‌سازی، به عبارت دیگر در دبی‌های مختلف، این امر میسر شده و مقادیر دمای میانی شعله از 1373 کلوین فراتر محاسبه شده است که هم شکل 11 و هم دماهای مرکز شعله به دست آمده در این مطالعه کاملاً گواه همین امر می‌باشد.



شکل 11. تغییرات دمای محور شعله با تزریق 60% بخار

شکل 12 تغییرات دمای اطراف شعله در حوالی نقطه بیشینه دمایی (ارتفاع 9 متر) در نزدیکی فلر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه شعاع فلر معادل 24 اینچ (0/61 متر) می‌باشد، دمای فاصله‌ی یک متری مرکز فلر به عنوان دمای حوالی نزدیک فلر که مشابه شرایط اندازه‌گیری باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق نتایج شبیه‌سازی، دما در آن ناحیه 499 درجه محاسبه شده که نزدیک به مقادیر واقعی (566 درجه کلون، لازم به اشاره است که این مقدار ماکزیمم دمای ثبت شده است) می‌باشد؛ خطای 11/8 % در این محاسبات نیز قابل قبول و نتایج شبیه‌سازی قابل اعتماد می‌باشد.



شکل 12، تغییرات دمایی حوالی مرکز شعله در نقطه بیشینه دمایی (ارتفاع 9 متری) در تزریق 60% بخار

نتیجه‌گیری

در این مطالعه محاسبات به صورت دو بعدی با شرط تقارن محوری می‌باشد که از مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد، مدل احتراق Non-Premixed Combustion، الگوریتم SIMPLE بر پایه فشار و حالت پایا استفاده شد. به کمک تحلیل استقلال از مش‌بندی، در دبی 4000 پوند در ساعت تعداد سلول 68700 انتخاب شد.

در مطالعه انجام شده تاثیر تغییر دبی بر دمای بیشینه شعله، طول شعله، پروفایل غلظت گازهای خروجی حاصل از احتراق و الگوی جریان آشفته در شعله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش دبی ورودی، میزان محدوده احتراق، حجم شعله و دمای شعله افزایش پیدا کرده است و همچنین نقطه پیداش شعله از محل خروج گاز فاصله بیشتری خواهد داشت. به عبارت دیگر با افزایش دبی گاز، احتراق در فاصله بیشتری نسبت به محل خروج گاز انجام خواهد پذیرفت. این امر در عمل نیز توجیه‌پذیر است؛ چرا که بیشتر بودن دبی، باعث تاخیر در احتراق شده است و همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بیشینه دمای شعله برای دبی‌های مختلف 50%، 100% و 150% از دبی واقعی به ترتیب 1556، 1589 و 1591 درجه کلون می‌باشد که می‌توان گفت تغییر دبی در محدوده دبی 4000 پوند در



ساعت دمای بیشینه شعله را چندان تغییر نمی‌دهد ولی نتایج نمودارها حاکی از آن بود ارتفاعی که این دما در آن اتفاق می‌افتد را تغییر می‌دهد. طول شعله در دبی‌های 50%، 100% و 150% از دبی واقعی به ترتیب 11/2، 14/9 و 17/3 متر محاسبه شد در واقع می‌توان گفت بازای هر 10% تغییر از دبی واقعی طول شعله 0/66 متر تغییر می‌کند. همچنین مقادیر نرخ انرژی جنبشی اغتشاش (k) و نرخ اتلاف انرژی اغتشاش (ε) با افزایش دبی افزایش می‌یابد و گستره توزیع غلظت‌های هیدروژن و متان، در محدوده رویت شعله معادل 1% مولی می‌باشد و با افزایش دبی توزیع هر دو گسترده‌تر می‌شود و گستره توزیع غلظت دی‌اکسیدکربن و آب نیز به ترتیب 5 و 10 درصد مولی خواهد بود و با افزایش دبی توزیع غلظت هردو وسیع‌تر می‌شود.

منابع

- [1] Raj Alphones, Kader Rasel, Vijaya Damodara, Daniel Chen, Helen Lou, & Peyton Richmond, "Better Plant Start up via Simulation", Presentation in the Alche National meeting, San Fransisco, CA, November 12-17, 2006.
- [2] Anderson, John David, and J. Wendt. Computational fluid dynamics. Vol. 206. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [4] Baukal C.E., J.R., Gershtein V.Y. and Li Xianming, "Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion", CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2001.
- [4] صباغ، رضا، رهبر، نادر، «بررسی تاثیر شکل هندسی بر بیشینه دمای جداره ی نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال سیزدهم، شماره 40، بهار 1394.
- [5] Singh, Kanwar Devesh, Preeti Gangadharan, Daniel H. Chen, Helen H. Lou, Xianchang Li, Peyton Richmond, "Computational fluid dynamics modeling of laboratory flames and an industrial flare", Journal of the Air & Waste Management Association 64, no. 11, 2014, pp: 1328-1340.
- [6] Jatale, A., P. Smith, J. Thornock, and S. Smith, "A validation of flare combustion efficiency simulations". American Flame Research Committee, Salt Lake City, UT. 2012.
- [7] Kanwar Devesh Singh, Tanaji Dabade, Hitesh Vaid, Preeti Gangadharan, Daniel Chen, Helen H. Lou, Xianchang Li, Kuyen Li, and Christopher B. Martin, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Industrial Flares Operated in Stand-By Mode", Industrial & Engineering Chemistry Research, October 2012.
- [8] David. Castineira, and Thomas F. Edgar, "CFD for Simulation of Crosswind on the Efficiency of High Momentum Jet Turbulent Combustion Flames", Journal of Enviromental Engineering © ASCE, July 2008, pp: 561.
- [9] Johnson, M. R., and Kostiuk, L. W. "Efficiencies of lowmomentum jet diffusion flames in crosswinds Combust, "Flame, 2000, Vol. 123, pp: 189–200.
- [10] Kostiuk, Larry, Matthew Johnson, and Glen Thomas. "University of Alberta Flare Research Project: final report November 1996-September 2004. 2.", 2004.
- [11] David Castiñeira, Thomas F. Edgar, Computational Fluid Dynamics for Simulation of Wind-Tunnel Experiments on Flare Combustion Systems, Energy Fuels, 2008, 22 (3), pp 1698–1706
- [12] David. Castineira, "Computational Fluid Dynamics for Simulation Model for Flare Analysis and Control" The University of Texas at Austin, 2006.