

بررسی تاثیر شکل هندسی بر بیشینه دمای جداره‌ی نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن

رضا صباغ^{۱*}، نادر رهبر^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: نوک فلر، احتراق، آلاینده خروجی، تاثیر هندسه، تاثیر باد، شبیه سازی عددی</p>	<p>کاهش دمای جدار تیپ فلر در سیستم‌های برج سوزا (فلر) می‌تواند سبب کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن گردد. لذا مشخص شدن توزیع دما در حالت‌های مختلف می‌تواند گزینه مناسب برای طراحی تیپ فلر را مشخص نماید. در این پژوهش به منظور آگاهی از نحوه توزیع دمای جدار فلر، مدل‌سازی عددی بر روی هندسه تیپ فلر برای احتراق گازهای خروجی از آن انجام شده است. به این منظور برای سه شکل هندسی دهانه فلر که شامل شکل‌های استوانه‌ای، مخروط باز و مخروط بسته می‌باشند، توزیع دمای جدار آن تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در شرایط مختلف وزش باد نشان می‌دهند که هندسه مخروطی با دهانه‌ی باز نازل هوا شرایط بهتری برای احتراق فراهم می‌نماید.</p>

۱- مقدمه

نماید. نوک-تیپ- فلر سازه‌ای در بالاترین نقطه فلر است که نقش احتراق بهینه و کنترل میزان جریان‌هایی که باعث احتراق بهتر می‌شوند را بر عهده دارد.

نوع گازهای ارسالی و بازدهی احتراق، تعیین‌کننده نوع و میزان گازهای انتشار یافته از فلر به محیط‌زیست است. اهمیت این موضوع وقتی افزایش می‌یابد که ارزش اقتصادی گازهای ارسالی به فلر و تأثیرات زیست محیطی محصولات احتراق آنها مورد توجه قرار گیرد. توجه به این دو موضوع موجب انجام تحقیقات بسیاری در زمینه فلر در دنیا شده است [۱].

علاوه بر این سرعت باد نیز با تاثیراتی مانند کشیدن شعله در مسیر باد، پایین آوردن مرکز شعله و تغییر سطح تحت تابش، حمل هیدروکربن‌های نسوخته در مسیر باد و افزایش احتمال خاموش شدن شعله، در عملکرد فلرها تأثیرگذار است؛ بنابراین، داشتن برآورد درست از اثر باد در شرایط جوی متغیر بادی، در طراحی فلر بسیار مهم است.

یکی از مهم‌ترین منابع صنعتی انتشار ترکیبات آلی از واحدهای شیمیایی و پتروشیمی، سیستم‌های فلر می‌باشند. فلرهای صنعتی واحدهای طراحی شده برای امحای مناسب گازهای هیدروکربن و گازهای اضافی از مواد شیمیایی مربوط به واحدهای پتروشیمی و پالایشگاه‌ها هستند. فلر (Flare) (مشعل سوزا، برج سوزا) دودکش یا لوله عمود امتداد یافته‌ای است که به عنوان یکی از قسمت‌های ضروری در چاه‌های نفت، پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی و کارخانه‌های مواد شیمیایی جهت سوختن گازها و مایعات زائد، قابل اشتعال و سمی تخلیه شده به کار رفته و می‌تواند از بروز خطرات آتش‌سوزی، انفجار و صدمه دیدن کارکنان جلوگیری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sabbagh@iausr.ac.ir

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرری، گروه مکانیک، تهران، ایران
۲. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، گروه مکانیک، سمنان، ایران

۱- مطالعات فلر در دنیا

مطالعات تجربی متعددی در طول سال‌های گذشته درباره فلرها و بازده آن‌ها انجام شده است. این مطالعات نشان داده است که همواره طراحی و راه‌اندازی مناسب یک فلر، بیش از ۹۸٪ خوراک هیدروکربنی را به دی اکسید کربن و آب تبدیل می‌کند. با این حال، در برخی از شرایط به ویژه برای زمانی که خروج مایعات سوختی، گازهای باارزش حرارتی پایین و یا وزش بادهای تند وجود داشته باشد، این بازده به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، تحقیقات نشان داده است که در شرایط عدم وجود پیلوت برای فلر، نبود پایدارکننده شعله و یا محافظ باد این بازده تا ۶۲ درصد کاهش می‌یابد [2].

از سال ۱۹۸۱-۱۹۸۶، آژانس محیط‌زیست امریکا EPA برای افزایش بهره‌وری فلرها تحقیقات فراوانی انجام داد [3]. بسیاری از کارهای انجام‌شده توسط EPA، آزمایش‌های ابتدایی بود که با استفاده از پروپان و نیتروژن و با استفاده از فلر تیپ‌های آزمایشگاهی و یا تجاری تا قطر ۱۲ اینچ انجام شد. دامنه وسیعی از شرایط تجربی مانند ارزش‌های حرارتی، اثرات تزریق بخار، و نسبت هوا به گاز مورد مطالعه قرار گرفت [3].

انجمن پژوهش آلبرتا [4] تحقیقاتی را پشتیبانی می‌کرد که نشان داد جریان گاز خالص مانند متان، پروپان، گاز طبیعی در شرایط آزمایشگاهی و یا در پیلوت‌ها با درجه بالایی از بهره‌وری (۹۸٪ یا بیشتر) می‌سوزد. بزرگ‌ترین اثر منفی بر بازده، در نتیجه افزودن قطرات مایع به گاز هیدروکربن است. تجهیزات پیلوت هم که مخلوطی از گاز و مایع استفاده می‌کنند نیز با وزش باد دچار افت بازده می‌شوند.

مطالعه دیگری [5] نشان داد 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.

جانسون و همکاران وی [6] ضمن انجام آزمایش‌هایی درباره شعله‌های نفوذی در مسیر جریان سیال، نشان دادند که جریان باد و محتوای انرژی سوخت مستقیماً بر روی راندمان احتراق موثر است. سلومونز [7] احتراق متان را در یک واکنشگر کاتالیستی بررسی کرده و علاوه بر انجام آزمایش‌هایی در خصوص شعله احتراق متان، مقایسه‌ای بین مدل‌سازی دو بعدی و یک بعدی انجام داده است. مطالعات انجام‌شده توسط کاستینیرا [۸-۱۱] یکی از جدیدترین مطالعات در حوزه شبیه‌سازی فلر است. در این تحقیق برای چند نوع فلر شبیه‌سازی صورت گرفته و اثر باد بر روی راندمان احتراق بررسی شده است. آن‌ها ضمن مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود شیوه‌ی افزایش راندمان احتراق و کنترل آن را بررسی کرده‌اند. علاوه بر این سازمان منابع طبیعی کانادا با همکاری چند موسسه دیگر گزارشی از مطالعاتی مروری درباره عملکرد فلر منتشر کرده [12] که در آن مهم‌ترین پارامترهای مستقل موثر بر عملکرد فلر شامل سرعت باد، سرعت گاز فلر، ترکیب گاز، قطر لوله فلر و نرخ تزریق گاز می‌باشد. در تحقیق دیگر گاگالک و هایدن [13] عملکرد شعله فلر رقیق‌شده با نیتروژن را در برابر باد مطالعه کرده‌اند. عمده تحقیقات انجام‌شده در این زمینه به بررسی عملکرد فلر و راندمان احتراق مربوط می‌شود و کمتر پژوهشی مستقیماً به تاثیر نوع احتراق بر دیواره فلر تیپ پرداخته است. فقدان داده‌های تجربی گسترده یکی از مشکلات بر سر راه تحقیق در این زمینه است. تحقیقات منتشرشده در زمینه احتراق ناشی از شعله‌های فورانی^۱ بسیار زیاد است اما با این وجود مطالعات احتراق این نوع شعله‌ها - که مشابه شعله فلر است - در فضای باز بسیار محدود است.

با این وجود مطالعات تجربی توسط سازمان‌هایی مانند آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA) هنوز مبنای بسیاری

¹ jet flame

آشفته ارائه می‌کنند، چیزی که در عمل به راحتی قابل اندازه‌گیری نیست.

۲- شبیه‌سازی احتراق در تیپ فلر

نقطه شروع برای مدل‌سازی، وضع مجموعه‌ای از معادلات انتقالی حاکم بر مسئله نظیر معادلات جرم، گونه‌ها، ممنتوم و انرژی است. متأسفانه، حل مستقیم این معادلات انتقالی حاکم برای فلرهای صنعتی بسیار دشوار است، زیرا فلر صنعتی جریانی آشفته دارد و حل مستقیم و شبیه‌سازی عددی جریان آشفته به دلیل طیف گسترده‌ای از پارامترهای زمانی و مقیاس‌های طولی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین برخی از انواع مدل توربولانس باید استفاده شود. دیگر اینکه مکانیسم‌های شیمیایی در شرایط واقع‌بینانه برای احتراق هیدروکربن را نمی‌توان با یک معادله واکنش تک مرحله‌ای بیان کرد. چنین مدل‌هایی ممکن است شامل ده‌ها گونه و صدها واکنش باشد. از این رو برخی از ساده‌سازی‌های شیمیایی معمولاً برای حل باید انجام شود.

۲-۱ اصول دینامیک سیالات محاسباتی در احتراق

راه حل تحلیلی معادلات حاکم برای احتراق فلرها امکان‌پذیر نیست. بدیهی است که برخی روش‌های عددی باید در نظر گرفته شوند، اما این روش‌ها نیز به دلیل تعداد زیادی از معادلات و متغیرهای درگیر در فرایند احتراق، درجه بالای غیرخطی بودن برخی از این معادلات و نیاز به ترکیب جریان آشفته، شیمی، تابش و غیره به شدت پیچیده هستند. CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) ابزار عددی برای حل معادلات پیچیده جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی مانند مدل مساله فلر است. CFD بر اساس راه حل عددی معادلات انتقالی حاکم برای جرم، ممنتوم، انرژی و گونه‌ها عمل می‌کند و روش دیگری (علاوه بر روش‌های تجربی و تحلیلی) در دسترس را برای حل مسایل دینامیک سیالات ارائه می‌کند. CFD در سال‌های اخیر به دلیل افزایش چشمگیر قدرت کامپیوترها، محبوبیت بیشتری به دست آورد.

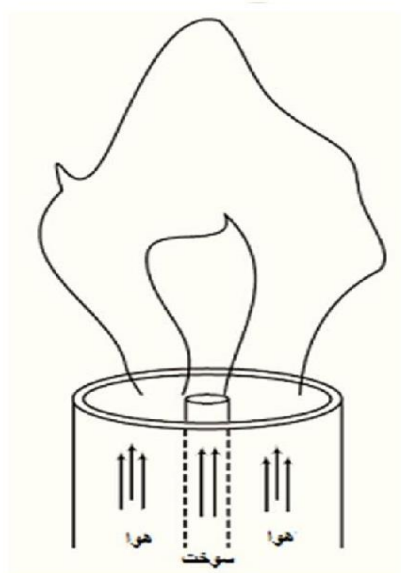
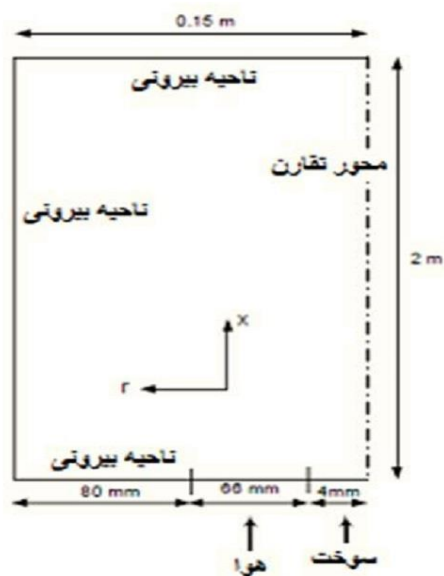
از تحقیقات نظری است. تحقیقات مشابهی که به بررسی عملکرد شعله‌های ناشی از جت سیال می‌پردازند نیز در این زمینه می‌توانند مورد توجه قرار گیرند. از جمله سایر مطالعات مرتبط می‌توان به تحقیقات توری [14]، ما و کوئینتیر [14]، سمیت و همکاران [15]، مارس و همکاران [16] و یالدیزی و همکارانش [17] اشاره کرد. گزارش پروژه فلر در دانشگاه البرتا [5] که به مطالعات تجربی درباره راندمان احتراق پرداخته و نیز گزارش‌های موسسه سندیا مانند گزارش بارلو و فرانک [18] همچنان یکی از منابع تجربی مهم برای تحقیقات در زمینه فلر می‌باشد.

تحقیقات فراوان در زمینه فلر عمدتاً به فرضیات و مسایل شبیه‌سازی شعله و یا بررسی اثر وزش باد بر روی شعله پرداخته و اثر هندسه فلر بر چگونگی احتراق بررسی نشده است. هندسه احتراق چگونگی جریان سوخت و هوا را تعیین کرده و لذا می‌تواند بر چگونگی احتراق و در نتیجه پارامترهای احتراقی مانند دما و میزان آلاینده‌ها تأثیرگذار باشد.

هدف اصلی این مقاله پیش‌بینی اثر هندسه بر روی توزیع دمای جداره نوک فلر و آلاینده‌های خروجی از آن است. برای نیل به این هدف، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شبیه‌سازی احتراق برای هندسه استوانه‌ای و هندسه مخروطی شکل (مخروط بسته) و هندسه مخروطی شکل وارونه (مخروط واگرا یا باز) انجام شده است.

پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند برای برآورد بهتر از عملکرد فلرها و گازهای خروجی از آن در واحدهای صنعتی به کار گرفته شود. به علاوه استفاده از مدل شبیه‌سازی در مطالعات زیست‌محیطی در مقایسه با راه‌اندازی آزمایش‌های مربوط به فلر-که معمولاً پرهزینه است- صرفه اقتصادی نیز دارد. همچنین این مدل‌ها اطلاعات مفیدی برای پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل دقیق از غلظت گونه‌ها در جریان‌های

وزش باد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شماتیک دامنه مربوط به شبیه‌سازی نوک فلر در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱- شماتیک هندسه نوک فلر استوانه‌ای

همانطور که پیش از این گفته شد، با توجه به محدودیت داده‌های تجربی در این زمینه در ابتدا مدل مورد نظر بر اساس یک مورد تجربی موجود و نتایج آن شبیه‌سازی می‌شود تا امکان مقایسه وجود داشته باشد. به این ترتیب صحت و اعتبار شبیه‌سازی مشخص خواهد شد. سپس می‌توان با توجه به اطمینان موجود به نحوه شبکه‌بندی و اعمال شرایط مربوط به شبیه‌سازی، اقدام به توسعه مدل شبیه‌سازی نموده و حالت‌های مورد نظر را بررسی نمود.

۲-۲ رویکرد حجم محدود

در تحقیق حاضر از نرم‌افزار تجاری فلوئنت به عنوان نرم‌افزاری که مدل‌های آشفته‌گی، شیمی، احتراق و مدل‌های عددی را دربر دارد، استفاده خواهد شد. به طور کلی، استراتژی فلوئنت (و سایر نرم‌افزارهای مشابه CFD) این است که به جای حل مساله دامنه پیوسته، مساله با دامنه گسسته با استفاده از شبکه نقاط حل می‌شود. در این دامنه گسسته، معادلات انتقالی حاکم گسسته می‌شوند و متغیرهای جریان تنها در نقاط شبکه حل می‌شوند. مقادیر در مکان‌های دیگر توسط درون‌یابی بین نقاط شبکه تعیین می‌شوند. از این رو مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی که سیستم با آن‌ها مشخص شده است به مجموعه‌ای از معادلات جبری تبدیل می‌شود که باید حل شوند.

۲-۳ مدل احتراق

محاسبات با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انسیس ۱۴ پس از ساخت شبکه حل در نرم‌افزار گمبیت ۲،۳ انجام می‌شود. در حالتی که وزش باد در اطراف فلر وجود ندارد می‌توان شبیه‌سازی را با استفاده از مدل دارای تقارن محوری به صورت دو بعدی انجام داد؛ اما وزش باد این تقارن را به هم زده و لذا برای شبیه‌سازی وزش باد در اطراف فلر، این کار به صورت سه بعدی انجام می‌شود. با این وجود در این تحقیق علاوه بر حل سه‌بعدی، حل دو بعدی نیز برای هندسه استوانه‌ای و به منظور مقایسه نتایج در حالت بدون وزش باد با تحقیقات مشابه [۱۱] انجام شده است. در این حالت نیمی از دامنه جهت کاهش میزان کار محاسباتی نرم‌افزار مد نظر قرار گرفته است. عدد ماخ جریان بسیار کم بوده و لذا می‌تواند به صورت سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته شود. در تمام حالت‌های دیگر (با وجود وزش باد و یا حتی بدون باد و حتی برای هندسه استوانه‌ای) حل سه بعدی انجام‌شده و شرایط هندسه و

که ρ چگالی جریان و v بردار سرعت است.

معادله بقای ممنتوم

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

که در آن v' بخش نوسانی بردار سرعت توربولانس، μ ویسکوزیته مولکولی دینامیکی سیال و P فشار است. خط‌های روی ترم‌ها نشان‌دهنده میانگین آن پارامتر است. تنش‌های رینولدز $\overline{\rho v v'}$ ترم‌های اضافی هستند که از تجزیه متغیرهای تلاطم به بخش نوسانی و میانگین ایجاد شده‌اند و برای حل کردن معادله فوق باید توسط مدل‌های آشفته، مدل‌سازی شوند. در اینجا بر اساس فرضیه بوزینیسک از مدل معروف $k-\epsilon$ استفاده می‌شود.

معادله انرژی

با توجه به انتقال حرارت در مساله احتراق، معادله انرژی نیز باید در نظر گرفته شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_i \bar{J}_i + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})) + S_h \quad (3)$$

که در آن k_{eff} هدایت موثر، τ_{eff} تنش موثر، J شار پخش گونه‌های i دما، S_h ترم چشمه انرژی و h انتالپی است. معادله انتقال گونه‌ها

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\bar{v} \rho Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \quad (4)$$

که در آن R_i نرخ خالص تولید گونه i در واکنش شیمیایی است. در این تحقیق قانون گازهای کامل به کار گرفته شده، از نیروهای خارجی و اثر آنها صرف‌نظر می‌شود و انرژی سینتیک سیال نیز ناچیز است.

۲-۵ تشریح مساله

برای بررسی اثر احتراق و باد بر عملکرد فلر سه هندسه متفاوت با شکل‌های استوانه‌ای، مخروط باز (وارونه) و

ایجاد شبکه مناسب برای حل جریان احتراق یکی از مهم‌ترین مراحل در حل مسایل شبیه‌سازی احتراق است. تراکم شبکه و تعداد گره‌ها به طور مستقیم بر جواب‌ها و مدت زمان حل تاثیرگذار خواهد بود. در مواردی ممکن است پس از حل اولیه نسبت به اصلاح شبکه اقدام نمود و مجدداً با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی دامنه مورد نظر را حل کرد. این پیچیدگی‌ها مانع از آن می‌شود که بتوان به آسانی پس از ایجاد شبکه و هندسه مورد نظر به پاسخ‌های مطلوب دست یافت. به ویژه نیاز به معتبر سازی نتایج پس از هر مرحله از حل کار را دشوارتر می‌نماید. در تحقیق حاضر حل‌های اولیه بر اساس شبکه هندسه استوانه‌ای بنا می‌شود و اعتبارسنجی می‌گردد. اعتبار نتایج در این مرحله تا حد زیادی می‌تواند راهگشای حل‌های بعدی باشد.

در ادامه کار نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق با نتایج تجربی مقایسه می‌شود و پس از اعتبارسنجی روش حل شبیه‌سازی برای تمام هندسه‌های نوک فلر و در شرایط مختلف وزش باد انجام می‌شود تا تاثیر هندسه بر عملکرد نوک فلر تعیین شود.

۲-۴ معادلات حاکم

به طور سنتی، مدل‌سازی جریان مغشوش در احتراق با استفاده از معادلات تنش رینولدز (RANS) انجام می‌شود. در این رویکرد فرض می‌شود که متغیرهای جریان آشفته را می‌توان به دو بخش متوسط و متغیرهای نوسانی تقسیم کرد و بنابراین اثر ادیهای جریان آشفته را می‌توان از طریق برخی از مدل‌های جریان مغشوش حل نمود. مدل‌های RANS در بسیاری از مسایل احتراقی به دلیل کارکرد موفق آن‌ها و سادگی در تشریح رفتار جریان به کار گرفته می‌شوند. برای جریان حالت پایدار، معادلات به صورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی

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

هوا: ۱۸/۲ میلی‌متر، ارزش حرارتی پایین: ۸/۵۱ مگاژول بر مترمکعب و فشار کاری: ۱ اتمسفر (۱۰۱,۳۲۵ پاسکال).

جدول ۱- حالت‌های مختلف حل مساله

A	۱	بدون وزش باد	هندسه
	۲	باد شدید	استوانه‌ای
	۳	باد ملایم	
B	۴	بدون وزش باد	هندسه
	۵	باد شدید	مخروط باز
	۶	باد ملایم	
C	۷	بدون وزش باد	هندسه
	۸	باد شدید	مخروط
	۹	باد ملایم	بسته

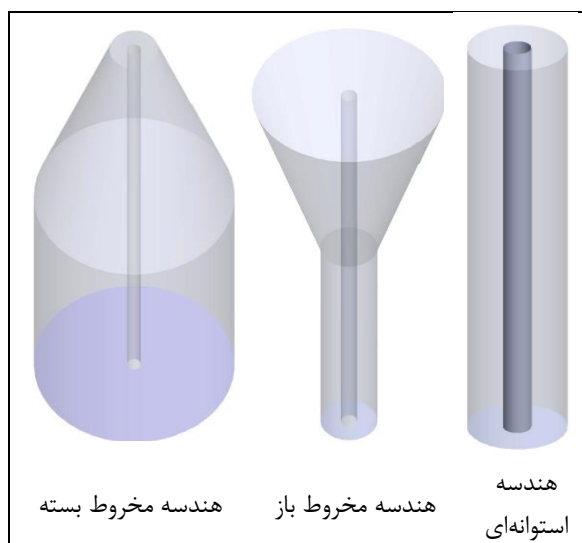
ابعاد برای هندسه استوانه‌ای بر اساس نتایج تجربی موجود انتخاب شده است تا امکان مقایسه و اعتبارسنجی حل وجود داشته باشد. برای سایر هندسه‌ها نسبت‌ها بر اساس هندسه استوانه‌ای به عنوان مبنا و با توجه به مشعل‌های موجود در صنعت که در زمینه‌های دیگری جز فلر کاربرد دارند به نحوی انتخاب شده‌اند تا با شرایط واقعی عملکرد فلر مطابقت داشته باشند. جدول ۲ ابعاد انواع مختلف نوک فلر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه این است که با توجه به هدف این مطالعه برای بررسی اثر باد، در سه شکل مذکور ناحیه اطراف شعله نیز تا محدوده بی‌نهایت فیزیکی در نظر گرفته شده است. دیواره این ناحیه محل اعمال شرط مرزی برای وزش باد می‌باشد. همچنین در شکل‌های مذکور تنها نیمی از هندسه حل نشان داده شده است که در حالت مدل‌سازی سه بعدی تمام این ناحیه (شامل ناحیه رسم نشده) به دلیل عدم تقارن در جهت وزش باد- که در این مسایل از سمت چپ به راست فرض شده است- در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

هدف از شبیه‌سازی تعیین تاثیر هندسه و وزش باد بر روی توزیع آلاینده‌ها و انتقال حرارت و توزیع دمای دیواره نوک فلر می‌باشد.

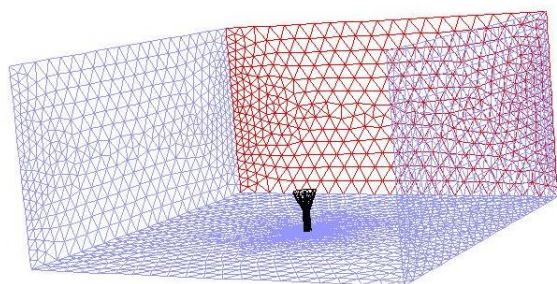
مخروط بسته برای نوک فلر در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی احتراق برای هر حالت با در نظر گرفتن شرایط هوای ساکن و نیز با در نظر گرفتن باد در دو حالت باد وزش ملایم (سرعت ۳ متر بر ثانیه) و نیز باد شدید (سرعت ۱۰ متر بر ثانیه) انجام شد. مجموع حالت‌های مدل‌سازی شده نه حالت مختلف است که شرایط واقعی ممکن را تا حد امکان در بر می‌گیرد. شکل ۲ هندسه‌ی انواع مختلف نوک فلر بررسی شده در این مطالعه را بدون در نظر گرفتن مقیاس و اندازه‌های واقعی نشان می‌دهد که با توجه به شکل هندسه دهانه نازل هوا نام‌گذاری شده‌اند.

انواع حالت‌هایی که در این پژوهش برای وزش باد در نظر گرفته شده است را می‌توان به صورت جدول ۱ دسته‌بندی کرد. به این ترتیب برای نه حالت مختلف شبیه‌سازی سه بعدی انجام شده است.

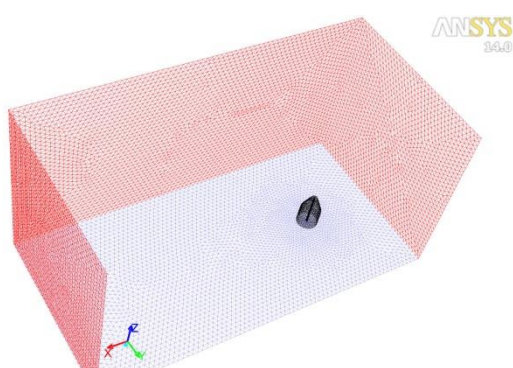


شکل ۲: انواع مختلف نوک فلر بر اساس شکل هندسی

برای مقایسه نتایج با داده‌های تجربی در دسترس، شرایط حل مساله برای هر سه هندسه مطابق شرایط شعله فلر نوع D [۱۸] به شرح زیر در نظر گرفته شده است: ترکیب سوخت: هوا و متان شامل ۲۵٪ سوخت CH₄ و ۷۵٪ حجمی هوا، سرعت سوخت: ۴۹/۶ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۲۲۴۰۰، سرعت هوا: ۱۱/۴ متر بر ثانیه، قطر نازل سوخت: ۷/۲ میلی‌متر، قطر نازل



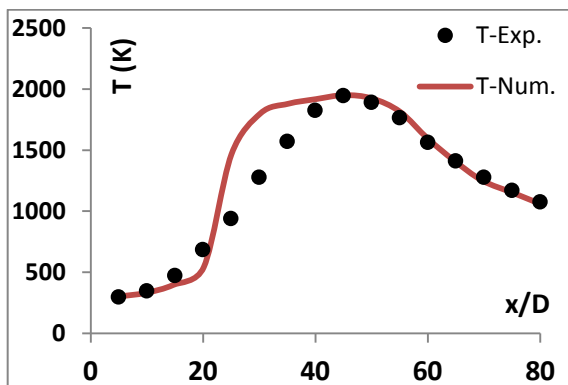
شکل ۴: بخشی از شبکه‌بندی هندسه مخروط باز و محیط اطراف



شکل ۵: بخشی از شبکه‌بندی هندسه مخروط باز و محیط اطراف

۳-۲ اعتبارسنجی نتایج

برای اطمینان از صحت حل و با توجه به توضیحات ذکرشده در بخش اول نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی موجود [۱۸] مقایسه شدند. نتایج مقایسه برای دما و کسر جرمی متان در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تحقیق حاضر برای نمودار دما در هندسه استوانه‌ای با مقادیر تجربی ([18])

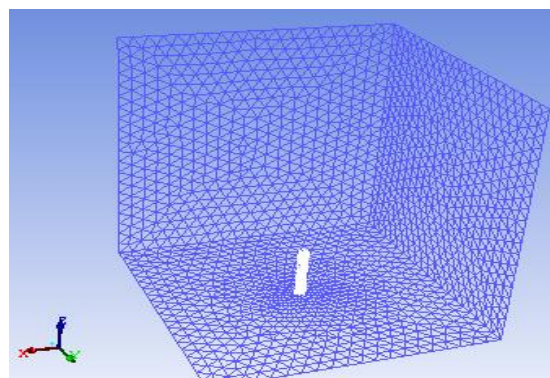
جدول ۲: ابعاد هندسه نوک فلر (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

هندسه	هندسه	هندسه	
استوانه‌ای	مخروط باز	مخروط بسته	
قطر لوله سوخت	۷/۲	۷/۲	۷/۲
ارتفاع نوک فلر	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
ارتفاع قسمت استوانه‌ای	۱۵۰	۸۰	۸۰
قطر لوله خروج هوا	۲۵/۶	۸۷/۲	۲۵/۶
قطر لوله ورود هوا	۲۵/۶	۲۵/۶	۱۰۵/۶

۳- نتایج و بحث

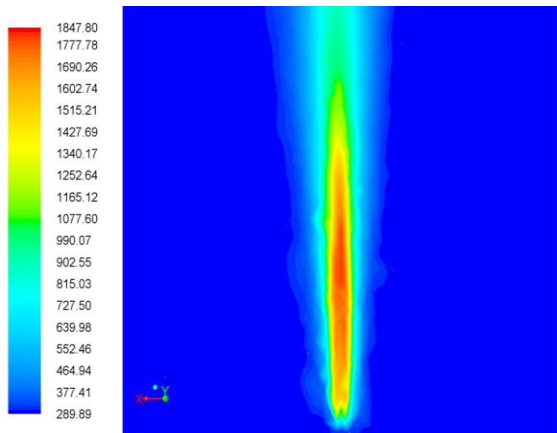
۳-۱ شبکه‌بندی و حساسیت حل به شبکه

برای حل مساله هندسه استوانه‌ای از یک شبکه هرمی استفاده شده است. برای رسیدن به بهترین جواب‌ها و با دقت لازم از روش تطبیقی استفاده شده است، بدین صورت که در هر مرحله شبکه در نقاط حساس ریزتر شده و مجدداً مساله حل می‌شود. به این ترتیب حساسیت جواب‌ها به میزان ریز بودن سلول‌های شبکه از بین رفته و جواب‌ها به اندازه کافی دقیق و قابل اعتماد است. شکل‌های ۳ تا ۵ شبکه‌بندی و فضای حل این سه هندسه را نشان می‌دهد. برای هندسه‌های مخروطی نوع شبکه‌بندی، شبکه هرمی می‌باشد.

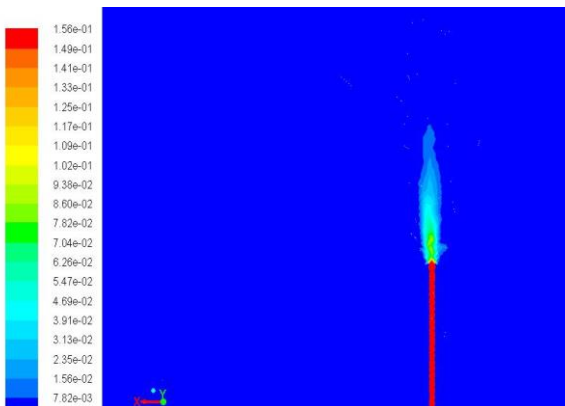


شکل ۳: بخشی از شبکه‌بندی هندسه مخروط باز و محیط اطراف

شکل‌های ۸ و ۹ کانتورهای دمای شعله و کسر جرمی سوخت را در حالتی که وزش باد وجود ندارد نشان می‌دهد.

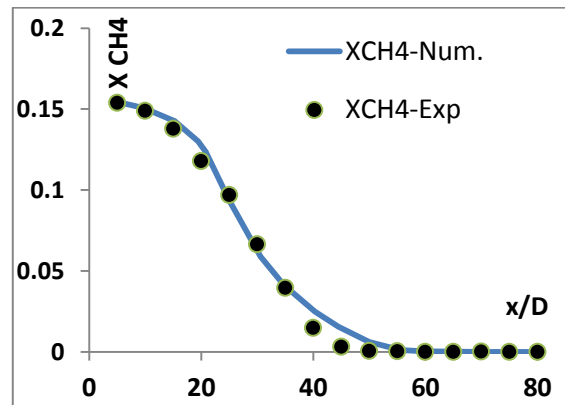


شکل ۸: کانتور دمای شعله، هندسه استوانه‌ای، بدون وزش باد



شکل ۹: کانتورهای کسر جرمی سوخت CH₄، هندسه استوانه‌ای، بدون وزش باد

مقایسه شکل کانتورهای دما به عنوان نماینده شکل شعله برای هندسه‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که در هندسه استوانه‌ای با وجود وزش باد طول شعله بلندتر از هندسه‌های دیگر است و این طول برای هندسه مخروط باز از سایر هندسه‌ها در حالت وزش باد شدید کوتاه‌تر است که می‌تواند نشانه‌ای برای ناپایداری شعله در هنگام وزش باد شدید باشد و حتی سرعت‌های بیشتر باد ممکن است منجر به خاموشی کامل شعله در این هندسه شود.

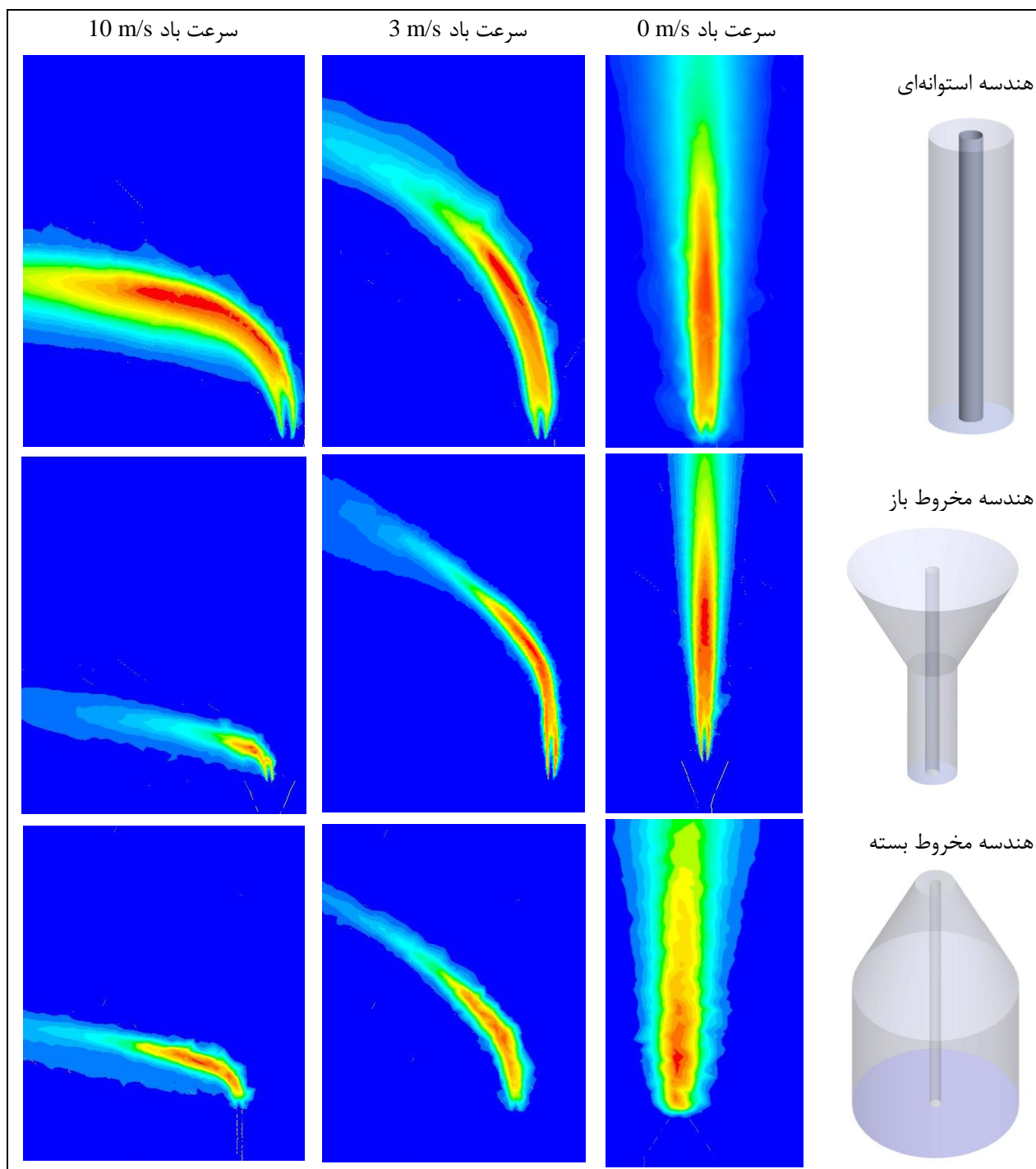


شکل ۷: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق در تحقیق حاضر برای کسر جرمی متان در هندسه استوانه‌ای با مقادیر تجربی ([18])

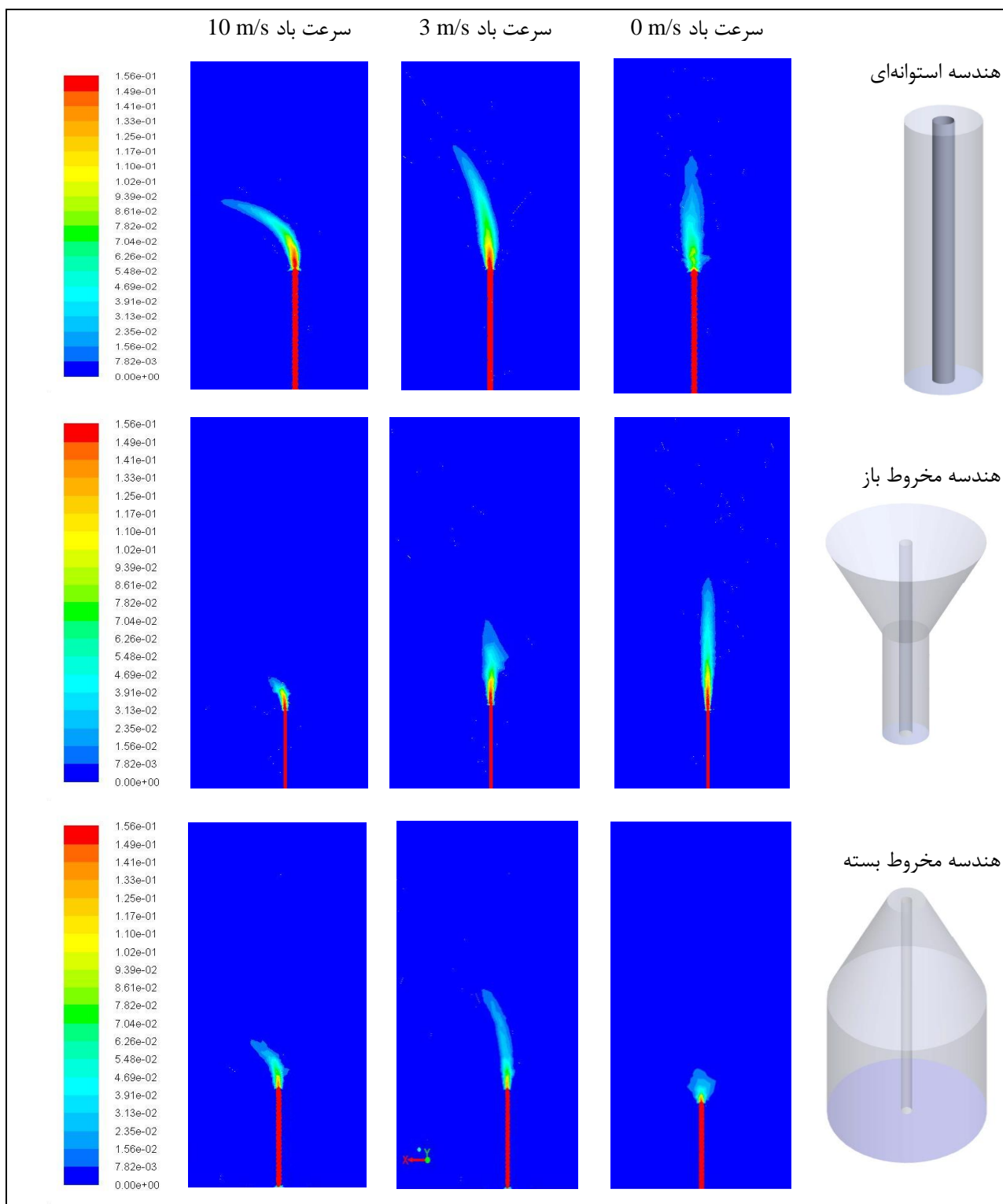
مقایسه نتایج دمای مرکزی و کسر جرمی متان برای هندسه استوانه‌ای در حالت دو بعدی و بدون وزش باد با داده‌های تجربی موجود برای دمای مرکزی به خوبی نشان می‌دهد که حل عددی حاضر با نتایج تجربی مطابقت می‌کند. اختلاف اندک موجود در نمودار دما با داده‌های تجربی با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزاری و شرایط ساده کننده در حل معادلات ناویر استوکس در روش‌های عددی قابل اغماض است. به علاوه هماهنگی نمودار کسر جرمی سوخت متان و مقادیر تجربی به خوبی عملکرد صحیح نرم‌افزار و شبیه‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. این مقایسه تاییدی بر درستی روش انتخاب شده برای شبکه، مدل جریان و توربولانس و شرایط مرزی اعمال شده می‌باشد. بر این اساس با اطمینان می‌توان سایر شبیه‌سازی‌ها را با اعمال تغییرات لازم انجام داد.

۳-۴ نتایج حل برای هندسه استوانه‌ای (G4)

الف- بدون وزش باد



شکل ۱۰: مقایسه شکل کانتورهای دما در حالت‌های مختلف



شکل ۱۱: مقایسه شکل کانتورهای کسر جرمی سوخت در حالت‌های مختلف

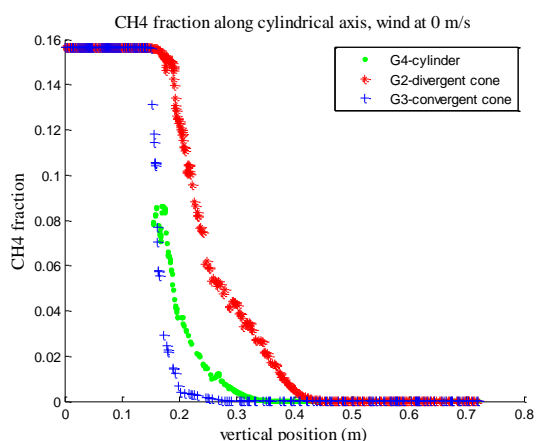
استوانه‌ای میزان دمای شعله افزایش یافته و حداکثر دما از ۱۹۴۷ کلوین در حالت بدون وزش باد به بیش از ۱۹۷۰ کلوین در وزش باد شدید می‌رسد. در هندسه مخروط باز

کانتورهای کسر جرمی سوخت در شکل ۱۱ برای همه حالت‌های مطالعه شده نشان داده شده‌اند. براساس شکل‌های ۱۰ و ۱۱، با افزایش سرعت باد در هندسه

۳-۵ مقایسه مقادیر محور میانی در حالت بدون

وزش باد

با توجه به تاثیر وزش باد بر انحراف شعله از محور میانی، مقادیر محور میانی در حالت عدم وزش باد مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۱۲ تغییرات کسر جرمی سوخت متان را برای سه هندسه و در حالتی که سرعت باد صفر است نشان می‌دهد. در این حالت استفاده از هندسه مخروط باز، باعث انتقال احتراق به موقعیت‌های بالاتر می‌شود. مقدار کسر جرمی سوخت در هندسه مخروط بسته کاهش سریع‌تری را در طول خط مرکزی نشان می‌دهد (شیب تندتر نمودار) و لذا با توجه به عدم وزش باد در این حالت می‌توان نتیجه گرفت که هندسه مخروط بسته به سوختن سریع‌تر سوخت متان در مشعل سوزا کمک می‌کند.



شکل ۱۲: تغییرات کسر جرمی سوخت در هندسه‌های مختلف، بدون وزش باد

تغییرات دما در هندسه‌های مختلف در شرایط بدون وزش باد در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

شرایط متفاوت بوده و کانتورهای دما کاهش دما را با افزایش سرعت وزش باد نشان می‌دهد به طوری که حداکثر دما از ۲۴۳۰ کلوین به ۲۰۶۰ کلوین می‌رسد. برای هندسه مخروط بسته برخلاف دو هندسه دیگر این روند رویه ثابتی ندارد به طوری که حداکثر دما از ۱۳۴۰ کلوین با وزش باد ملایم به ۱۸۰۰ رسیده و با باد شدید به ۱۷۴۰ کلوین کاهش می‌یابد.

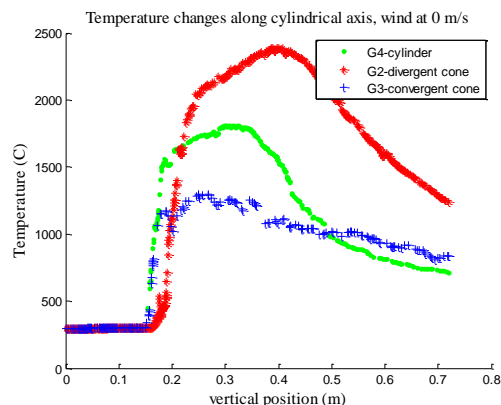
مقایسه کانتورهای سوخت متان نشان می‌دهد که با وزش باد مقداری از متان به محیط اتمسفر وارد شده است که این امر می‌تواند به دلیل وجود فشار منفی در سمت مخالف جهت وزش باد در اطراف لوله سوخت باشد که منجر به مکیده شدن سوخت به محیط بیرون از لوله شده است. مقایسه کانتورهای متان در سه هندسه در حالتی که باد نمی‌وزد، نشان می‌دهد که در هندسه مخروط بسته متان در محیط اتمسفر نفوذ چندانی ندارد و در همان دهانه لوله سوخت مصرف می‌شود ولی این مقدار نفوذ در هندسه مخروط باز بیشتر و در هندسه استوانه‌ای حداکثر طول نفوذ را دارد. لازم به ذکر است که حداکثر کسر جرمی در کانتورهای مربوط به سوخت متان، یکسان و مربوط به میزان متان در لوله سوخت و قبل از احتراق است. مقایسه کانتورهای سوخت متان در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که در حالت هوای ساکن و بدون وزش باد، میزان سوخت ورودی به اتمسفر در هندسه مخروط بسته کمتر از سایر هندسه‌ها است. با وزش باد، این رویه تغییر کرده و در هندسه مخروط باز، این مقدار کمترین می‌شود. مقایسه این کانتور با کانتورهای دما به طور همزمان می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که احتمال خاموش شدن شعله در حالت هندسه مخروط باز و در زمان وزش باد شدید بیش از سایر حالت‌ها است.

تاثیر وزش باد و هندسه بر عملکرد مشعل سوزا با بررسی میزان تغییر پارامترهای مختلف در محور مرکزی مشعل نتایج قابل توجهی به همراه دارد به ویژه که این نتایج تاثیر وزش باد را بر میزان انحراف از خط مرکزی نشان می‌دهد.

می‌دهد. به همین دلیل صرف‌نظر از توزیع آلاینده‌ها در نقاط مختلف مشعل سوزا و در میدان جریان، میزان آلاینده‌ها در نقطه خروج از مشعل سوزا و در زمان ورود به اتمسفر از نظر زیست‌محیطی مهم است. این مقدار در حالت‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه اولیه داده‌های آلاینده‌ها برای هندسه مخروط باز نشان می‌دهد که در مجموع با استفاده از این هندسه میزان آلاینده مونوکسید کربن وارد شده به محیط‌زیست کاهش می‌یابد که این موضوع برای این هندسه مزیت محسوب می‌شود. مقایسه با دمای ماکزیمم تأییدی بر این واقعیت است چرا که امکان سوختن کامل برای این آلاینده فراهم می‌شود. درعین حال دمای ماکزیمم برای دیواره مشعل و محیط اطراف در این هندسه نسبت به سایر هندسه‌ها بالاتر است که می‌تواند باعث استهلاک سریع‌تر مشعل شود.

جدول ۳: میزان سوخت و مونوکسید کربن ورودی به اتمسفر

نوع هندسه	شرایط وزش باد	کسر جرمی آلاینده‌ی CO مونوکسید کربن	کسر جرمی هیدروکربن نسوخته CH4
هندسه استوانه‌ای	بدون وزش باد	2.16652e-05	0.155932
	باد ۳ متر بر ثانیه	4.10877e-08	0.156387
	باد ۱۰ متر بر ثانیه	7.44969e-07	0.249991
هندسه مخروط باز	بدون وزش باد	2.47409e-10	0.156386
	باد ۳ متر بر ثانیه	6.94e-08	0.156367
	باد ۱۰ متر بر ثانیه	2.67902e-09	0.156386
هندسه مخروط بسته	بدون وزش باد	1.24528e-05	0.156044
	باد ۳ متر بر ثانیه	1.44252e-05	0.156028



شکل ۱۳: تغییرات دما در هندسه‌های مختلف، بدون وزش باد

در حالت عدم وزش باد، استفاده از هندسه مخروط باز منجر به افزایش بیشتر دما در محور میانی می‌شود. این افزایش دما به میزان چشمگیری (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) بیشتر از هنگامی است که از هندسه مخروط بسته استفاده می‌شود. همچنین حداکثر دما در هندسه مخروط باز در ارتفاعات بالاتر واقع می‌شود (در فاصله ۰/۴۵ متر بعد از ورود به اتمسفر) که به معنی گسترش و نفوذ بیشتر شعله به محیط است درحالی‌که در هندسه‌های دیگر این امر در ارتفاعات پایین‌تری رخ می‌دهد (حدود ۰/۳ متر بعد از ورود به محیط).

۳-۶ ملاحظات زیست‌محیطی

مطالعه مقدار کسر جرمی مونوکسید کربن و کسر جرمی دی‌اکسید کربن در این تحقیق نشان می‌دهد که هندسه مخروط بسته منجر به کاهش میزان مونوکسید کربن نسبت به هندسه استوانه‌ای می‌شود درحالی‌که هندسه مخروط باز آن را افزایش می‌دهد. این روند حتی با وزش باد نیز حفظ می‌شود که به معنی برتری هندسه مخروط بسته بر سایر هندسه‌ها است. با این وجود ملاحظات زیستی از جهت دیگری نیز قابل تامل است. از نظر ملاحظات زیست‌محیطی میزان آلاینده‌ها در لحظه خروج از دستگاه آلاینده و هنگام ورود به محیط دارای اهمیت می‌باشد. چرا که ورود آلاینده‌ها به محیط‌زیست، موضوعی مستقل از اتفاقاتی است که پس از ورود به اتمسفر رخ

جدول ۳: میزان سوخت و مونوکسید کربن ورودی به اتمسفر

نوع هندسه	شرایط وزش باد	کسر جرمی آلاینده‌ی CO مونوکسید کربن	کسر جرمی هیدروکربن نسوخته CH4
	باد ۱۰ متر بر ثانیه	1.31432e-05	0.249533

نتیجه‌گیری، برای هر کدام از پارامترهای مذکور برای شرایط مطلوب، امتیازی معادل عدد یک داده شد. برای تغییرات نامطلوب امتیاز منهای یک و برای عدم تغییر، امتیاز صفر در نظر گرفته شد. با فرض ارزش یکسان برای هر پارامتر و ضریب وزنی یک برای آن‌ها مجموع تغییرات این پارامترها محاسبه شد. به این ترتیب هر چه مقدار حاصل جمع بزرگ‌تر و مثبت باشد نشان‌دهنده نقطه قوت آن حالت است. نتایج حاصل از این محاسبه در جدول ۴ درج شده است.

جمع‌بندی امتیازات برای هندسه‌های مختلف در شرایط مختلف در جدول نشان داده شده است. در این جدول امتیاز مثبت نشان‌دهنده برتری یک حالت در یک ستون نسبت به حالت متناظر در ردیف مربوط به همان خانه جدول است و امتیاز منفی میزان نامطلوب بودن عملکرد در مقایسه با حالت متناظر ذکر شده را نشان می‌دهد.

با توجه به نوسان تغییرات در مقدار پارامترها در بررسی اولیه نمی‌توان در مورد داده‌های به دست آمده نتیجه کمی ارائه کرد. برای جلوگیری از پراکندگی در مقایسه پارامترها، نتیجه حاصل از مقایسه یک به یک حالت‌های مختلف برای هر پارامتر مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه پارامترهای مختلف به طور مطلق تغییرات یکنواختی را نشان نداده و لذا اگر چه در موردی ممکن است یک هندسه بر سایر هندسه‌ها برتری داشته باشد در یک پارامتر دیگر ممکن است دارای نقاط ضعف باشد. برای

جدول ۴: مقایسه کمی حالت‌های مختلف (امتیاز منفی: عملکرد نامطلوب، امتیاز مثبت: عملکرد مطلوب، صفر: عدم تغییر)

استوانه‌ای-۰	استوانه‌ای-۳	استوانه‌ای-۱۰	مخروط باز-۰	مخروط باز-۳	مخروط باز-۱۰	مخروط بسته-۰	مخروط بسته-۳	مخروط بسته-۱۰
استوانه‌ای-۰	--	۰	۰	۰	-۲	۰	-۲	-۲
استوانه‌ای-۳	--	--	۱	۰	۱	-۲	-۲	-۴
استوانه‌ای-۱۰	--	--	۲	۲	۲	۰	-۲	-۲
مخروط باز-۰	--	--	--	-۳	-۳	۰	-۴	-۴
مخروط باز-۳	--	--	--	--	۱	۰	۰	۰
مخروط باز-۱۰	--	--	--	--	--	۰	۰	-۲
مخروط بسته-۰	--	--	--	--	--	--	۱	-۲
مخروط بسته-۳	--	--	--	--	--	--	--	-۴

مشاهده نشده (امتیاز صفر) که این حالت برای مخروط باز مربوط به شرایط عدم وزش باد و در مقایسه با هندسه متداول استوانه‌ای و یا مقایسه هندسه مخروط باز و بسته است. با توجه به این که عدم وزش باد به ندرت در واقعیت اتفاق می‌افتد و غالباً در ارتفاعات مربوط به مشعل سوزا باد می‌وزد می‌توان این حالت خنثی را برای هندسه استوانه‌ای در نتیجه‌گیری دخالت نداد. همچنین هندسه مخروط

این جمع‌بندی به خوبی نشان می‌دهد که هندسه مخروط باز در بیشتر مواقع به سایر هندسه‌ها برتری دارد. اعداد مثبت نشان می‌دهند که مخروط باز به هندسه استوانه‌ای مزیت دارد و به علاوه امتیازهای منفی برای حالت مخروط بسته در مقایسه با مخروط باز مجدداً نشان‌دهنده برتری هندسه مخروط باز بر هندسه مخروط بسته است. تنها نکته قابل توجه زمانی است که تفاوتی بین حالت‌ها

دو فلر در نهایت منجر به تغییر مطلوبی نمی‌شود. در مقابل هندسه مخروط بسته منجر به تضعیف عملکرد نوک فلر می‌گردد.

ب- در هنگام وزش باد ملایم عملکرد هندسه مخروط باز و هندسه مخروط بسته مشابه یکدیگر و بهتر از هندسه استوانه‌ای است.

ج- با وزش باد شدید عملکرد هندسه مخروط باز از دو هندسه دیگر بهتر است و هندسه استوانه‌ای نتیجه بهتری نسبت به هندسه مخروط بسته نشان می‌دهد.

۴-۲ تاثیر وزش باد بر احتراق، آلاینده‌گی و انتقال حرارت نوک فلر

صرف‌نظر از تغییر هندسه برای هر هندسه با در نظر گرفتن دمای حداکثر شعله و آلاینده‌های خروجی به محیط‌زیست و دمای جداره نوک مشعل سوزا می‌توان نتایج زیر را برای تغییر وزش باد مطرح کرد:

الف- در هندسه استوانه‌ای وزش باد منجر به تغییر قابل توجهی در مجموع پارامترهای ذکر شده نمی‌شود.

ب- در هندسه مخروط باز وزش باد منجر به کاهش عملکرد مطلوب نوک فلر می‌شود.

ج- در هندسه مخروط بسته وزش باد ملایم منجر به بهبود اندک عملکرد نوک فلر می‌شود. با این وجود افزایش سرعت وزش باد این عملکرد را به شدت تضعیف می‌کند.

در مجموع مطالعات و برای ترکیب حالت هندسه وزش باد می‌توان گفت که هندسه مخروط باز از مزیت نسبی به سایر هندسه‌ها برخوردار است.

بسته در غالب موارد یا دارای ضعف نسبت به سایر حالت‌ها است و یا منجر به تغییر مطلوبی نشده است و بنابراین با در نظر گرفتن چهار پارامتر میزان سوخت نسوخته و مونوکسید کربن ورودی به محیط‌زیست، افزایش دمای شعله و افزایش دمای جداره مشعل، می‌توان بر اساس مطالعات انجام‌شده نتیجه گرفت که هندسه مخروط باز هندسه مطلوب‌تری برای نوک فلر مشعل سوزا است.

همچنین بر اساس این جدول می‌توان تاثیر وزش باد را به طور مستقل در هر هندسه برای پارامترهای مورد مطالعه ملاحظه کرد. بر این اساس می‌توان گفت که وزش باد در هندسه استوانه‌ای به طور کلی تاثیری مثبت یا منفی در مجموع عوامل نشان نمی‌دهد. برای هندسه مخروط باز وزش باد منجر به ضعف عملکرد نوک فلر می‌شود و در هندسه مخروط بسته به جز در هنگام وزش باد ملایم منجر به عملکرد نامطلوب‌تر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۴-۱ تاثیر هندسه بر احتراق، آلاینده‌گی و دمای نوک فلر

بر اساس مطالعات احتراقی برای احتراق سوخت متان برای نوک فلر بر اساس شبیه‌سازی سه بعدی انجام‌شده برای سه هندسه استوانه‌ای، مخروط باز و مخروط بسته و با در نظر گرفتن دمای حداکثر شعله و آلاینده‌های خروجی به محیط‌زیست و دمای جداره نوک مشعل سوزا می‌توان نتایج زیر را ذکر کرد:

الف- تغییر هندسه منجر به تفاوت کمی بین هندسه مخروط باز و هندسه مخروط بسته نمی‌شود و عملکرد این

۵- منابع

- [1] س. درفشی، م. چاوش‌باشی، س. رادمان، مطالعه امکان سنجی سیستم بازیابی گازهای ارسالی به فلر پتروشیمی تبریز و کاهش عملیات فلرینگ تحت مکانیزم CDM، سومین همایش سراسری مدیران و متخصصین HSE وزارت نفت، 1389.
- [2] C. B. JR, V. Gershtein, and X. Li, *Computational fluid dynamics in industrial combustion*. CRC Press, 2001, p. 630.
- [3] "Evaluation of the Efficiency of Industrial Flares: H2S Gas Mixtures and pilot Assisted Flares EPA-600/2-86-080," 1986.

- [4] M. Stroscher, "Investigation of Flare Gas Emissions in Alberta," 1996.
- [5] L. Kostiuk, M. Johnson, and G. Thomas, "University of Alberta flare research project," 2004.
- [6] 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.
- [7] S. Salomons, "Modelling the behaviour of a reverse-flow catalytic reactor for the combustion of lean methane," University of Alberta, Edmonton, 2003.
- [8] D. Castiñeira and T. Edgar, "CFD for simulation of steam-assisted and air-assisted flare combustion systems," *Energy & fuels*, pp. 1044–1056, 2006.
- [9] D. Castiñeira, "A Computational Fluid Dynamics Simulation Model for Flare Analysis and Control," The University of Texas at Austin, 2006.
- [10] 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.
- [11] 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, Jul. 2008.
- [12] P. Gogolek, A. Caverly, R. Schwartz, D. Seebold, and J. Pohl, "Emissions from elevated flares—a survey of the literature," 2010.
- [13] P. Gogolek and A. Hayden, "Performance of flare flames in a crosswind with nitrogen dilution," *J. Can. Pet. Technol.*, vol. 43, no. 8, pp. 43–47, 2004.
- [14] S. C. Herndon, D. D. Nelson, E. C. Wood, W. B. Knighton, C. E. Kolb, Z. Kodesh, V. M. Torres, and D. T. Allen, "Application of the Carbon Balance Method to Flare Emissions Characteristics," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 39, pp. 12577–12585, Oct. 2012.
- [15] J. D. Smith, A. Suo-ahttila, S. Smith, and J. Modi, "Evaluation of the Air-Demand, Flame Height, and Radiation from low-profile flare tips using ISIS-3D," in *American – Japanese Flame Research Committees International Symposium*, 2007.
- [16] M. Gómez-Mares, M. Muñoz, and J. Casal, "Axial temperature distribution in vertical jet fires.," *Journal of hazardous materials*, vol. 172, no. 1, pp. 54–60, Dec. 2009.
- [17] M. Yaldizli, K. Mehravaran, and F. a. Jaber, "Large-eddy simulations of turbulent methane jet flames with filtered mass density function," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 53, no. 11–12, pp. 2551–2562, May 2010.
- [18] R. S. Barlow and J. H. Frank, "Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames," *Symposium (International) on Combustion*, vol. 27, no. 1, pp. 1087–1095, Jan. 1998.