



بررسی عددی میدان دمایی و ساختار شعله آرام گاز متان و هیدروژن در جت‌های برخوردی مایل

مهرداد کیانی^۱، حسین باشی^۲ و احسان هوشفر^{۳*}^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران^۲ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

چکیده

امروزه شعله‌های پیش‌آمیخته دارای کاربردهای فراوان صنعتی می‌باشند که در نتیجه افزایش کیفیت احتراق همراه با کاهش آلودگی این شعله‌ها، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این مطالعه برخورد دو جت شعله در زوایای متفاوت شبیه‌سازی شده است و ساختار شعله، دمای ماکزیمم شعله و میزان NO_x تولیدی در حالت شعله پیش‌آمیخته آرام، برای دو سوخت متان و هیدروژن ارائه شده است. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی تأثیر زاویه بین دو مشعل و همچنین تأثیر پیش‌گرم کردن هوا و سوخت بر دمای ماکزیمم شعله و NO_x تولیدشده بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بین دو مشعل، اختلاط جریان و جریان چرخشی بیش‌تر شده و دمای ماکزیمم شعله و مقدار تولید NO_x افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه از ۰ تا ۱۸۰ درجه، بیشینه دمای شعله متان و هیدروژن به‌ترتیب ۱۱.۵ و ۱۲.۴ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین با ۴۰۰ کلوین افزایش دمای ورودی سوخت و هوا، مقدار دمای بیشینه شعله برای متان و هیدروژن به‌ترتیب ۶ و ۴ درصد افزایش می‌یابد که در نتیجه منجر به افزایش قابل‌ملاحظه میزان NO_x تولیدی می‌شود.

کلمات کلیدی: میدان دما؛ شعله آرام؛ شعله‌های برخوردی؛ شبیه‌سازی عددی؛ احتراق.

Numerical Investigation of Temperature Field and Laminar Flame Structure of Inclined Impinging Jets of Methane and Hydrogen

M. Kiani¹, H. Bashi², E. Houshfar^{3,*}¹ Grad Student, Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran.² MSc Student, Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran.³ Assist. Prof., Mech. Eng., College of Eng., Univ. of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Nowadays, premixed flames are broadly utilized in various residential/industrial applications. Therefore, simultaneously increasing the quality of combustion and reducing the pollution of these flames is of great importance. In this study, collisions of two flame jets of H_2/CH_4 have been simulated; and flame structure, temperature, and NO_x emission are reported at different conditions. The main purpose of this work was to study the effect of angle between the burners and the effect of air and fuel preheating on the key design factors of impinging jets. It was observed that by increasing the angle between two burners, mixing and recirculating flow is enlarged, and the maximum flame temperature and NO_x production is increased accordingly. By increasing the angle from 0 to 180 degrees, the maximum flame temperature of methane and hydrogen increases by 11.5 and 12.4%, respectively. Preheating showed that with 400 K increase in the fuel and inlet air temperature, the maximum flame temperature for methane and hydrogen increases 6% and 4%, respectively, which eventually results in a higher NO_x .

Keywords: Temperature Field; Laminar Flame; Impinging Flames; Numerical Simulation; Combustion.

۱- مقدمه

مشعل‌های گازی پیش ترکیب در مصارف خانگی و بخش‌های صنعتی به‌منظور احتراق بهتر و انتقال حرارت سریع‌تر در رینولدز و فشار پایین استفاده بالایی دارند و این علت باعث شده که مطالعات زیادی روی شعله‌های پیش‌آمیخته انجام شود. مطالعه میدان دمایی شعله پیش‌ترکیب، باعث طراحی بهتر مشعل‌ها می‌شود [۱]. یکی از موضوع‌های اساسی در تحقیقات گذشته، افزایش کیفیت احتراق بوده است. بدین منظور بیش‌تر اصلاحات روی پارامترهای اغتشاش و نوسانی جریان متمرکز شده‌اند. هدف اصلی انجام این مطالعه، بررسی استفاده از گازهای هیدروژن و متان در مشعل‌های برخوردی (همانند شعله‌پخش‌کن مشعل‌های خانگی و شعله‌های صنعتی در بخش ذوب فلزات و ...) است که شعله‌ها با رژیم جریان آرام وارد ناحیه اختلاط شده و روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند. بدین ترتیب بررسی خواهد گردید که چنانچه شعله‌ها با یکدیگر زاویه داشته باشند، میزان تولید حرارت و انتشار آلاینده‌ی آن‌ها چگونه تغییر خواهد کرد.

یکی از عوامل تأثیرگذار روی مشخصه‌های شعله، دمای سوخت و هوا ترکیب شده قبل از احتراق است. با و همکاران [۲]، دمای هوا و سوخت را قبل از احتراق افزایش دادند و نتایج آنها نشان می‌دهد که این فرایند موجب پایداری بیش‌تر شعله شده است. اوپانک و همکاران [۳]، نشان دادند که پیش‌گرم کردن هوا و سوخت روی میزان تولید NO تأثیرگذار است و در نظر گرفتن پیش‌گرم کردن هوا و سوخت نسبت به حالت نادیده گرفتن آن باعث می‌شود، مقدار دوده تولیدی دقیق‌تر محاسبه گردد.

از عوامل مؤثر بر ساختار شعله می‌توان به هندسه مشعل اشاره کرد. تأثیر مشعل حلقوی بر ساختار شعله و شاخصه‌های انتقال حرارت آن در برخورد به سطح صاف در رژیم جریان آرام پیش ترکیب توسط ایران دوست [۴] و دانگ [۵] بررسی شد. دانگ و همکاران [۶]، اثر عدد رینولدز و فاصله نازل تا صفحه برخورد را روی مشخصه‌های انتقال حرارت مشعل دایروی و شیاری در شرایط آزمایشی یکسان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مشعل‌های شیاری دارای شعله‌ی یکنواخت‌تری نسبت به نوع دایروی هستند و همچنین میزان شار حرارتی میانگین آن‌ها بیش‌تر است. از طرف دیگر، مشعل‌های چندگانه با توجه به کارایی

گسترده‌ای که دارند، به شکل مبسوط مورد بررسی قرار گرفته‌اند. زمانی که صفحه هدف از مشعل فاصله زیادی داشته باشد، به انرژی بیش‌تری نیاز است. کیفیت مربوط به چندین مشعل که با هم کار می‌کنند، به سه عامل بستگی دارد: (۱) نوع و هندسه مشعل (۲) ساختار قرارگیری مشعل‌ها (۳) مشخصه‌های جریان. اثر قرارگیری جت شعله‌های حلقوی روی یکدیگر در فواصل متفاوت توسط وو و همکاران [۷] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مشخصات انتقال حرارت به‌شدت به فاصله مشعل‌ها وابسته است. مشخصه‌های انتقال حرارت یک ردیف از جت شعله‌های چندگانه شیاری به‌صورت تجربی توسط کوک و همکاران [۸] مطالعه گردید. طراحی آزمایش آن‌ها شامل، چندین مشعل عمودی بدون زاویه با هم بود. نتایج آن‌ها نشان داد که شار حرارتی مشعل مرکزی بیش از حالتی است که یک مشعل به‌صورت منفرد قرار دارد. البته این پژوهش نشان داد که مزیت مذکور با افزایش فاصله بین مشعل‌ها از بین رفته است. چنانچه مشعل‌ها نسبت به یکدیگر زاویه داشته باشند، جت‌ها روی یکدیگر تأثیر گذاشته و منجر به تغییر ساختار شعله می‌شوند.

شیه و همکاران [۹] گزارش دادند که برای افزایش ترکیب و اختلاط سوخت به‌جای قرار دادن موازی مشعل‌ها، آن‌ها می‌توانند به‌صورت مایل باهم برخورد داشته باشند. لی و همکاران [۱۰] اثر پایداری را با استفاده از روش تجربی پی‌ای وی^۱ برای دو مشعل متقاطع شیاری که باهم زاویه ۴۵ درجه داشتند، برای سوخت پروپان مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با مشعل شیاری تخت مقایسه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این شکل از مشعل‌ها نسبت به حالت تخت باعث بهبود پایداری شعله می‌شوند. کیانی و همکاران [۱۱] تأثیر فاصله مرکز تا مرکز و زاویه قرارگیری دو مشعل برخوردی را از طریق روش‌های آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که دمای ماکزیمم شعله با مقدار زاویه برخورد دو شعله رابطه مستقیم و با فاصله مرکز تا مرکز دو مشعل رابطه معکوس دارد.

با توجه به مروری بر پژوهش‌های انجام شده می‌توان دریافت که وضعیت قرارگیری مشعل‌ها و همچنین قرار

^۱ Particle Image Velocimetry (PIV)

محاسبه مقدار تشکیل NO سریع اتخاذ شده است. توزیع ذرات دوده از طریق حل معادلات بقای نسبت جرم و چگالی تعداد ذرات دوده به دست آمده است. حرکت توده‌ای و ترموفورتیک ذرات دوده در معادلات بقا در نظر گرفته شده است. نرخ تولید از طریق پیروی روشی مدل شده است که ماندل و همکاران [۱۷] با در نظر گرفتن هسته‌زایی، رشد سطح، انعقاد و اثر اکسیداسیون توصیف کرده‌اند.

در حالت پایه، هوا و سوخت در دمای ۳۰۰ کلوین وارد دامنه محاسباتی می‌شوند. دامنه محاسباتی به اندازه کافی طویل ترسیم شده تا بتوان شرایط مرزی جریان در خروجی را به صورت توسعه یافته در نظر گرفت. در محور جریان، فرض جریان متقارن نسبت به محور و روی دیواره فرض عدم لغزش، آدیاباتیک و عدم نشت به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. در حالت جریان چرخشی ناشی از نیروی بویانسی در صفحه خروجی فرض شده است که جریانی که از بیرون می‌آید، هوای محیط در ۳۰۰ کلوین است. معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی، گونه‌ها همراه با تشکیل NO و دوده به صورت همزمان با شرایط مرزی مناسب و با استفاده از تکنیک محاسباتی تفاضل محدود صریح حل شده است. برای رسیدن به یک حل مستقل از شبکه‌بندی و تست شبکه، تعداد مش در جهات مختلف تغییر داده شد.

مخلوط هوا و سوخت و محصولات احتراق، سیال نیوتونی و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده‌اند؛ همچنین اثرات جابه‌جایی آزاد، انتقال حرارت تابشی و تلفات وسیکوزیته در معادلات انرژی صرف نظر شده است. بدیهی است، با وجود اینکه جریان سرد غیرواکنشی در ورودی به شکل آرام است، اما پس از ورود به دامنه حل دچار نوسانات شدیدی می‌شود که علت این امر ناشی از اثر برخورد دو شعله روی یکدیگر است که باعث ایجاد اغتشاشات ریز می‌شود [۱۸] و با در نظر گرفتن فرض‌های بالا معادلات بقای جرم، مومنتوم و بقای انرژی برای یک جریان واکنشی مغشوش به صورت زیر تعریف و حل شده‌اند:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \quad (1)$$

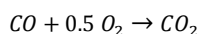
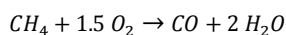
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{i,j} - \bar{\rho} \bar{u}_i' \bar{u}_j') + \bar{\rho} g_j \quad (2)$$

گرفتن دو مشعل در کنار هم و زاویه آن‌ها تأثیر به‌سزایی در میدان دمایی شعله دارد.

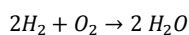
پیش‌گرم کردن سوخت و هوا باعث افزایش بازده، یکنواخت‌تر شدن دمای ناحیه احتراق و افزایش نرخ واکنش می‌شود [۱۲]؛ بنابراین پیش‌گرم کردن می‌تواند روی میزان NO_x اثر بگذارد. از این رو در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از یک روش عددی، ساختار شعله حاصل شده از سوختن گاز متان و هیدروژن که از پرکاربردترین و پرطرفدارترین سوخت‌های موجود در صنعت هستند، با توجه به ویژگی منحصر به فرد آن‌ها در مشعل‌های شیبی برخورداری در کنار یکدیگر مورد بررسی قرار گیرد؛ همچنین از آنجایی که تا کنون اثر پیش‌گرم کردن روی شعله‌های برخورداری بررسی نشده، در این مطالعه سعی شده است تا اثر پیش‌گرم کردن جریان غیرواکنشی ورودی را بر شعله حاصل شده در جریان‌های برخورداری مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۲- شبیه‌سازی

این شبیه‌سازی معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و غلظت گونه‌ها را برای جریان آرام، واکنشی و متقارن نسبت به محور با در نظر گرفتن شرایط مرزی متناسب حل کرده است [۱۳]. برای فرایند احتراق، واکنش دومرحله‌ای احتراق متان و هوا استفاده شده است که به صورت زیر است:



همچنین واکنش اساسی احتراق هیدروژن به صورت زیر در نظر گرفته شده است:



نرخ واکنش به وسیله تعیین پارامترهای سینتیکی از کار دوپنت و همکاران [۱۴] بعد از اصلاح مناسب در مقایسه با داده‌های تجربی، به دست آمده است [۱۲].

برای سنجش میزان NO در شعله هر دو مسیر حرارتی و سریع در نظر گرفته شده است. تشکیل حرارتی NO با پیروی از مکانیسم زلدویچ شبیه‌سازی گشته است که در آن حالت پایا برای اتم N، تعادل جزئی بین اتم O و مولکول O₂ فرض شده و مقدار مناسب برای پارامترهای سینتیکی واکنش در نظر گرفته شده است [۱۵]. مدل تجربی دی‌سوئت [۱۶] از

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

زمانی که واکنش با سرعت انجام می‌شود، اغتشاش به آرامی گونه‌های داغ و سرد را مخلوط کرده و به داخل ناحیه واکنش می‌کشاند. در این حالت که به‌عنوان احتراق کنترل شونده توسط اختلاط شناخته می‌شود، می‌توان از اثر سینتیک شیمیایی صرف‌نظر کرد. برای مشعل‌های متقاطع مدل اتلاف گردابه^۱ که به‌وسیله مگنوسن پیشنهاد شده است [۱۸]، استفاده گردیده است. انتخاب مدل احتراقی مناسب به عدد دامکولر جریان (Da)، نسبت مقیاس زمانی جریان به واکنش (بستگی دارد که در این مورد بیش از ۱ است، بنابراین EDM به‌نظر مناسب می‌آید. واکنش تک‌مرحله‌ای در معادله ۸ نشان داده شده است. آنالیزهای دقیق‌تر با به‌کاربردن مکانیزم کاهش‌یافته - جزئیاتی قابل انجام است.

$$F + v Ox \rightarrow (1 + v)Pr \quad (8)$$

که r_s ضریب استوکیومتریکی جرمی برای واکنش تک‌مرحله‌ای اصلی است. این مدل بر اساس فرض یک واکنش سریع، برگشت‌ناپذیر و تک‌مرحله‌ای است. به‌عنوان نتیجه مقادیر مرجع معادله انتقال می‌توانند به کمک تناوب مخلوط شدن در توربولانس ε/k مشخص شوند.

$$\bar{\omega} = -A\bar{\rho} \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \min \left(\bar{Y}_f, \frac{\bar{Y}_o}{r_f}, B \frac{\bar{Y}_p}{1 + r_f} \right) \quad (9)$$

در اینجا A و B ثابت‌های تجربی هستند که A=4 و B=0.5 و YP نسبت جرمی محصولات است.

شکل ۱ نمای کلی دو مشعل و دامنه محاسباتی آن‌ها را برای شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. مقدار عرض مقطع مشعل‌ها برابر ۰/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پارامتری که تغییر آن در این هندسه مورد مطالعه قرار گرفته است، زاویه بین دو مشعل است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دامنه محاسباتی متقارن است؛ بنابراین فقط نصف این دامنه در این مطالعه شبیه‌سازی گشته است. سیال کاری موردنظر یک‌بار ترکیب هوا و متان و بار دیگر ترکیب هوا و هیدروژن است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{h}\tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho}\alpha \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} - \bar{\rho}\tilde{u}_j''\tilde{h}'' \right) + \bar{S}_h \quad (3)$$

در معادلات بالا، کمیت‌هایی که بالای آن‌ها علامت بار(-) قرار دارد، نشان دهنده مقدار متوسط رینولدزی و نماد تیلدا (~) نشان دهنده، مقدار متوسط وزنی کمیت‌ها است. مقدار شار حرارت مغشوش در معادله بقای انرژی به وسیله فرضیه گرادیان بوزینسک تعیین گردیده است.

$$-\overline{u_j''h''} \approx \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \quad (4)$$

در جریان مغشوش واکنشی، معادله انتقال گونه‌ها برای گونه Y_s را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) تعیین کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{Y}_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{Y}_s\tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\bar{\rho}D_{m,s} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{Y}_s}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_s; S = 1, \dots, N_s \quad (5)$$

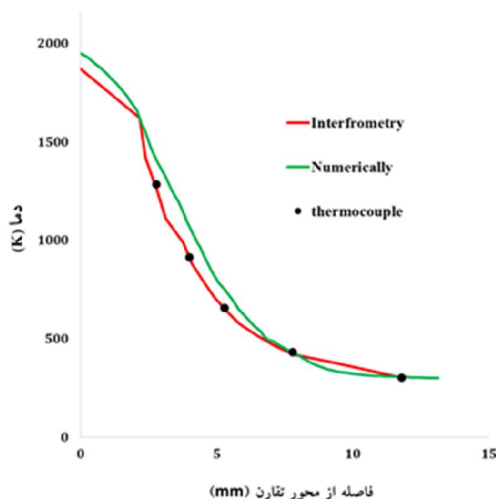
در معادله بالا S در محدوده $1 < S < N_s$ تغییر می‌کند که در آن N_s تعداد کل گونه‌ها در زنجیره واکنش احتراق است. ضریب پخش جرم $D_{m,s}$ و عدد اشمیت اغتشاش (Sc_t) با پیروی از تقریب غلظت ثابت، عدد ثابت در نظر گرفته شده‌اند. مدل RNG k-ε برای مدل کردن اغتشاش جریان استفاده شده است. این مدل به وسیله بخش‌های مرجع اضافی در معادله ε تجهیز گشته است که می‌تواند به صورت دقیق اثر جریان‌های غیر ایزتروپیک و ناحیه‌های گردشی را پیش‌بینی کند. علاوه بر این اثبات شده است که مدل RNG k-ε در شبیه‌سازی فیزیک ساختار پیچیده جت‌های برخوردی کارآمد است. کمیت‌های اسکالر توربولانس (k و ε) استفاده شده‌اند تا مقدار تنش رینولدزی را محاسبه کنند و به‌وسیله معادلات ۶ و ۷ تعیین گشته‌اند که در آن‌ها $C_{2\varepsilon}$ و $C_{1\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ثابت‌های مدل اغتشاش تجربی می‌باشند. در این معادلات G_k تولید انرژی جنبشی (k) با گرادیان متوسط سرعت، G_b تولید k از طریق بایونسی، Y_M نشان دهنده سهم انبساط نوسانی در نرخ تلفات کلی داخل اغتشاش تراکم پذیر است. α_ε و α_k معکوس عدد پرانتل موثر به ترتیب برای k و ε است و S_k و S_ε بخش‌های مرجع می‌باشند که کاربر تعریف می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

¹ Eddy Dissipation Model

اینترفرومتری ۱ برای هندسه مشابه با هندسه‌ی شبیه‌سازی شده در رینولدز ۷۰ و نسبت هم‌ارزی ۱ به‌دست‌آمده است. نتایج این مقایسه در شکل ۲ که میزان دما را بر اساس فاصله از محور تقارن (z) نشان می‌دهد، به نمایش گذاشته شده است.

با دقت در شکل ۲ می‌توان دریافت که به علت وجود گونه‌هایی که به‌طور کامل واکنش ندادند، با نزدیک شدن به خط تقارن تغییرات دمایی بیش‌تر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با دقت خوبی (با اختلاف کمتر از ۸ درصد) با مدل تجربی موردنظر تطابق دارد؛ بنابراین می‌توان از صحت این مدل‌سازی اطمینان حاصل کرد.

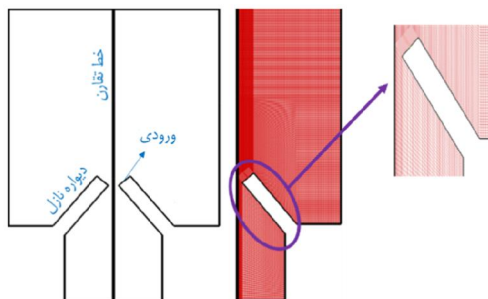


شکل ۲- صحت‌سنجی شبیه‌سازی (مقایسه نتایج مدل با کارهای تجربی انجام‌شده)

۴- بحث و نتایج

۴-۱- مقدمه

در این مطالعه، نرم‌افزار فلوئنت ۱۸ جهت شبیه‌سازی برخورد دو جت شعله شیباری با شرایط ورودی $P_0 = 0.87$ bar و $T_0 = 300$ K مورد استفاده قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی، دیواره مشعل‌ها به‌صورت آدیاباتیک فرض شده است تا از



شکل ۱- دامنه محاسباتی

برای تمامی موارد بررسی استقلال داده‌ها از تعداد مش، پنج مش‌بندی متفاوت انتخاب و دمای بیشینه شعله متناسب با آن روی یک خط مشخص به‌دست‌آمده که نتایج مربوط به جریان مخالف برای متان در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- بررسی استقلال از شبکه

تعداد سلول	137829	78953	44896	30986	18632
دمای شعله	2218	2219	2222	2224	2228

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، بعد از این که تعداد سلول‌ها به ۷۸۹۵۳ می‌رسد، مقدار دمای شعله تقریباً ثابت می‌ماند (کم‌تر از ۰.۵٪ تغییر می‌کند)؛ بنابراین این مقدار از تعداد سلول‌ها برای تمام محاسبات کافی است.

۲- صحت‌سنجی

برای اطمینان از شبیه‌سازی انجام شده نتایج شبیه‌سازی با کارهای انجام شده در گذشته مقایسه گردیده است. بدین منظور دمای شعله مربوط به گاز 50% LFG در فواصل مختلف از یک مقطع مشخص یعنی در $(H/D_H = 8)$ که با این شبیه‌سازی به‌دست‌آمده، با داده‌های تجربی کیانی و همکاران [۱۹] مقایسه شده است. این داده‌های تجربی یک‌بار از طریق اندازه‌گیری به‌وسیله ترموکوپل و بار دیگر با استفاده از روش

¹ Interferometry

از آنجایی که بخش عمده‌ای از NO_x تولیدی وابسته به دما است، زاویه برخورد می‌تواند روی تولید NO_x نیز تأثیرگذار باشد [۲۱] میزان NO_x تولیدی ضمن ایجاد آلودگی روی کیفیت احتراق نیز تأثیرگذار است. در این قسمت به منظور بررسی اثر زاویه روی دمای احتراق و میزان تولید NO_x سوخت هیدروژن و متان، با ثابت نگه داشتن فاصله مرکز تا مرکز دو مشعل و سایر پارامترها اثر زاویه برای حالت موازی، θ=120°، θ=90°، θ=60° و موقعیت جریان مخالف، مقدار محاسبه شده دمای بیشینه و NO_x ارائه گشته است.

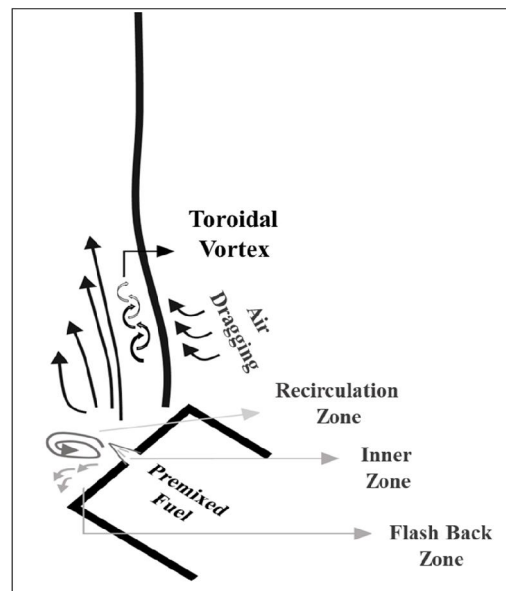
در شکل ۴ پیکره شعله و کانتور دمایی (خطوط و نواحی همدم) مربوط به زوایای مختلف برخورد شعله‌ها برای سوخت متان به نمایش گذاشته شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه برخورد دو مشعل از ۰ تا ۱۸۰ درجه، قسمت داغ شعله توسعه پیدا کرده و جریان برگشتی پایینی قوی‌تر شده است؛ همچنین در اثر برخورد بیش‌تر شعله، قسمت گرم شعله به صورت باریک‌تر ظهور پیدا کرده است. این نتایج با نتایج انجام شده در مطالعات قبلی در مورد جریان مخالف مطابقت دارد [۲۱،۲۲]. از آنجا که عملکرد احتراق توسط میزان انتشار اکسید نیتروژن تحت تأثیر قرار می‌گیرد، نتایج عددی برای نرخ تولید ناکس فوری^۴ و اکسید نیتروژن حرارتی در این بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از ناکس تولیدی سوخت در این مسأله به خاطر مقدار بسیار کم نیتروژن آلی در سوخت هیدروژن و متان می‌توان چشم‌پوشی کرد؛ در حالی که ناکس فوری به خاطر حضور رادیکال‌های حاوی کربن تولید می‌شود و ناکس حرارتی از کربن و اکسیژن در دماهای بالا تشکیل می‌شود. در نهایت مقدار NO_{ppm} (در حالت خشک/غیرمرطوب) از معادله ۱۰ محاسبه شده است [۲۳]:

$$NO_{ppm} = \frac{NO \text{ mole fraction} \times 10^6}{1 - H_2O \text{ mole fraction}} \quad (10)$$

تأثیر زاویه برخورد دو شعله روی میزان NO_x تولیدی و همچنین دمای بیشینه شعله در جداول ۲ و ۳ و نمودارهای ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

انتقال حرارات از دیواره مشعل به هوای آزاد جلوگیری شود. ساختار دمایی و مقدار NO_x تولید شده برای این دو مشعل، با سطح مقطع 0.7mm × 20mm که شعله آن‌ها تحت زوایای مختلف باهم برخورد می‌کنند به دست آمده و تأثیر زاویه بر میزان تولید NO_x و ساختار دمایی شعله برخورد مورد بررسی قرار گرفته است. در ساختار شعله می‌توان نواحی داخلی شعله ۱، ناحیه جریان برگشتی پایینی^۲ و جریان گردشی^۳ را مطابق شکل ۳ مشاهده کرد.



شکل ۳- نواحی مختلف جریان

۴-۲- زاویه برخورد

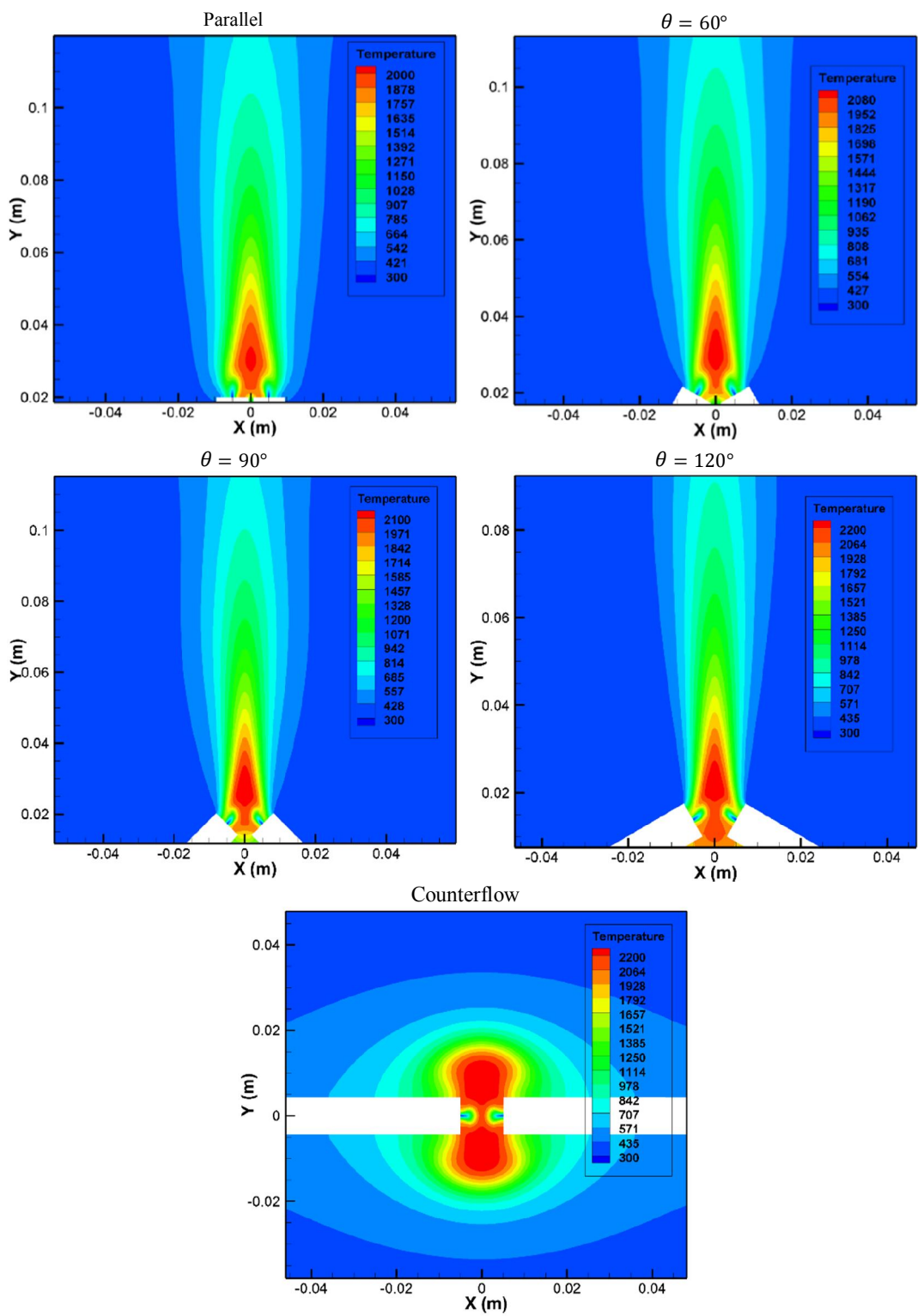
برخلاف یک جت تنها، انتشار گونه‌ها می‌تواند به علت هندسه پیچیده این مطالعه به یک میدان جریان خاص منجر شود. برخورد دو جت مایل نسبت به حالت موازی باعث ایجاد گرمای بیش‌تر و دمای بالاتر شعله می‌شود [۲۰]. در این مطالعه به بررسی توزیع دمایی شعله حاصل شده از سوختن متان و هیدروژن پرداخته می‌شود.

¹ Inner Zone

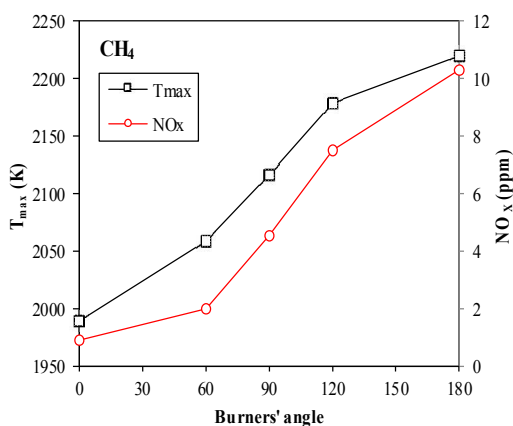
² Flash Back Zone

³ Recirculation Zone

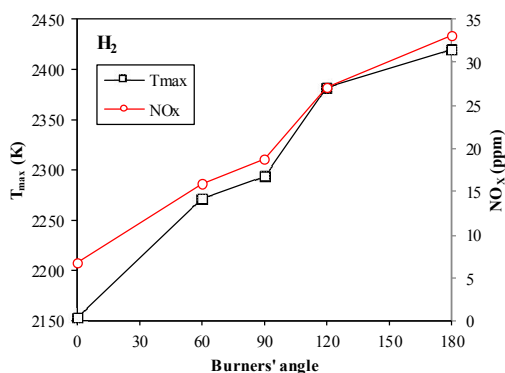
⁴ Prompt NO_x



شکل ۴- کانتورهای دمایی برای زوایای مختلف مشعل‌ها



شکل ۵- اثر زاویه مشعل‌ها بر مقدار NO_x و ماکزیمم دمای حاصل از احتراق متان



شکل ۶- اثر زاویه مشعل‌ها بر مقدار NO_x و ماکزیمم دمای حاصل از احتراق هیدروژن

از مقایسه بیشینه دما برای زوایای متفاوت می‌توان دریافت که بیشینه دما مربوط به شعله‌های برخوردی با زاویه کمتر است. در مشعل‌های برخوردی در خروج، جریان هر سیال ممنوم در راستای محور x دیگری را خنثی می‌کنند که این نکته موجب پایداری هر چه بیشتر شعله می‌شود؛ بنابراین هر چه زاویه بین دو مشعل بیشتر شود، این تغییر باعث می‌شود تا اختلاط هر چه بهتر صورت گیرد که نهایتاً باعث افزایش دمای شعله شده و یا به عبارتی دیگر شار حرارتی بیش‌تری تولید می‌کند.

بین دمای ماکزیمم و مقدار NO_x تولیدی همبستگی مثبتی وجود دارد و چنانچه مشاهده می‌شود، دمای شعله در

جدول ۲- میزان NO_x تولیدی و دمای ماکزیمم احتراق متان در زوایای مختلف مشعل‌ها

NO _x (ppm)	دمای ماکزیمم شعله	موقعیت قرارگیری (زاویه برحسب درجه)
0.87	1989	(جریان موازی)
1.96	2059	60
4.56	2116	90
7.5	2175	120
10.3	2219	(جریان مخالف)

جدول ۳- میزان NO_x تولیدی و دمای ماکزیمم احتراق هیدروژن در زوایای مختلف مشعل‌ها

NO _x (ppm)	دمای ماکزیمم شعله	موقعیت قرارگیری (زاویه برحسب درجه)
6.7	2153	(جریان موازی)
16	2271	60
18.8	2294	90
27	2382	120
33	2420	(جریان مخالف)

همان‌طور که از جداول و نمودارهای فوق مشخص است با افزایش زاویه بین دو مشعل دمای بیشینه شعله افزایش می‌یابد. این پدیده از لحاظ فیزیکی قابل توجیه است؛ زیرا برخورد دو جت با یکدیگر منجر به تولید ناحیه‌ای چرخشی می‌شود که باعث اختلاط بیش‌تر و در نتیجه‌ی آن انتقال حرارت از ذرات سوخته شده به نسوخته می‌شود و افزایش کیفیت احتراق را به همراه دارد. از طرفی دیگر اثر دو شعله مستقیم روی یکدیگر روی نرخ واکنش سوختن آن تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که از مقایسه شکل دریافت می‌شود، با افزایش زاویه، انرژی فعال‌سازی واکنش کاهش یافته و کیفیت احتراق افزایش یافته است.

جدول ۴- دمای ماکزیمم شعله و میزان NO_x برای دماهای مختلف ورودی سوخت متان و هوا

مقدار NO_x	دمای ماکزیمم شعله (کلوین)	دمای ورودی سوخت و هوا (کلوین)
33	2219	300
44	2280	400
49	2310	500
57	2346	600
64	2373	700

جدول ۵- دمای ماکزیمم شعله و میزان NO_x برای دماهای مختلف ورودی سوخت هیدروژن و هوا

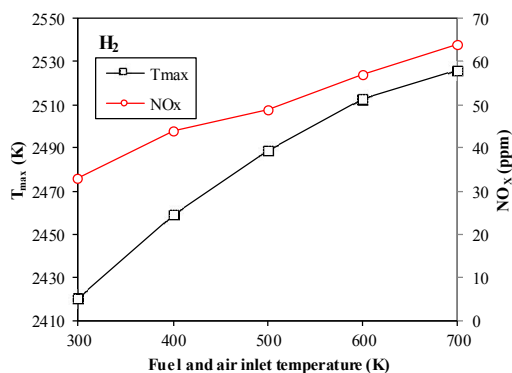
مقدار NO_x	دمای ماکزیمم شعله (کلوین)	دمای ورودی سوخت و هوا (کلوین)
33	2219	300
44	2280	400
49	2310	500
57	2346	600
64	2373	700

تمامی حالات از ۱۸۰۰ کلوین بیشتر بوده که محدوده مناسب برای تولید اکسید نیتروژن حرارتی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر اکسید نیتروژن تولیدی NO_x حرارتی است.

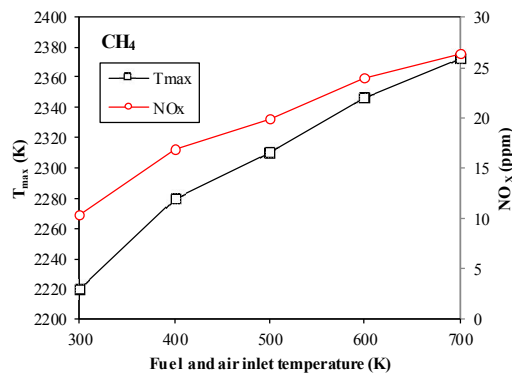
۴-۲- اثر پیش‌گرم کردن سوخت

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر نرخ واکنش تأثیر می‌گذارد، پیش‌گرم کردن جریان غیرواکنشی ورودی است؛ اما با توجه به اینکه در مشعل‌های برخوردی رفتار شعله‌ی حاصل شده متفاوت از مشعل‌های تک‌کی است و مقدار این تأثیرگذاری می‌تواند در تک شعله با مشعل‌های برخوردی تفاوت قابل توجهی داشته باشد، مقدار این تأثیرگذاری در این مطالعه به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت تأثیر دمای ورودی سوخت و هوا روی دمای شعله تحلیل شده است. برای این منظور، در یک هندسه خاص (یعنی در حالت جریان مخالف) همه پارامترها ثابت نگه داشته شده و فقط مقدار دمای ورودی سوخت و هوا تغییر پیدا کرد. نتایج این بررسی در جداول ۴ و ۵ و شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

همان‌طور که از داده‌های موجود در جداول مشخص است، پیش‌گرم کردن سوخت و هوای ورودی دمای شعله را به شکل محسوسی افزایش داده است. این نتیجه مطابق انتظار است؛ زیرا با افزایش دمای ورودی سوخت و هوا در واقع



شکل ۸- اثر پیش‌گرم کردن سوخت در دمای ماکزیمم و مقدار NO_x شعله متان



شکل ۷- اثر پیش‌گرم کردن سوخت در دمای ماکزیمم و مقدار NO_x شعله متان

بزرگ‌تر شدن ناحیه شعله در راستای Y و باریک‌تر شدن شعله در راستای X می‌شود.

همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش دمای سوخت و هوا قبل از احتراق منجر به افزایش دمای بیشینه احتراق و افزایش تولید NO_x می‌شود. این پدیده نیز تأییدکننده مطالب بالا است که بخش عمده NO_x تولید شده در این احتراق از نوع حرارتی است.

۶- مراجع

- [1] Lombardi L, Carnevale E, Corti A (2006) Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. *Energy* 31(15): 3208–3219.
- [2] Bâ A, Cessou A, Marcano N, Panier F, Tsiava R, Cassarino G, Ferrand L, Honoré D (2019) Oxyfuel combustion and reactants preheating to enhance turbulent flame stabilization of low calorific blast furnace gas. *Fuel* 242: 211-221.
- [3] Ouyang Z, Liu W, Man C, Zhu J, Liu J (2018) Experimental study on combustion, flame and NOX emission of pulverized coal preheated by a preheating burner. *Fuel Process Technol* 179: 197-202.
- [4] Irandoost MS, Ashjaee M, Askari MH, Ahmadi S (2015) Temperature measurement of axisymmetric partially premixed methane/air flame in a co-annular burner using Mach-Zehnder interferometry. *Opt Lasers Eng* 74: 94-102.
- [5] Dong LL, Cheung CS, Leung CW (2002) Heat transfer from an impinging premixed butane/air slot flame jet. *Int J Heat Mass Transfer* 45(5): 979-992.
- [6] Dong LL, Cheung CS, Leung CW (2001) Heat transfer characteristics of an impinging butane/air flame jet of low Reynolds number. *Exp Heat Transfer* 14(4): 265-282.
- [7] Wu J, Seyed-Yagoobi J, Page RH (2001) Heat transfer and combustion characteristics of an array of radial jet reattachment flames. *Combust Flame* 125(1-2): 955-964.
- [8] Kwok LC, Leung CW, Cheung CS (2005) Heat transfer characteristics of an array of impinging pre-mixed slot flame jets. *Int J Heat Mass Transfer* 48(9): 1727-1738.
- [9] Shih HY, Hsu JR, Lin YH (2014) Computed flammability limits of opposed-jet H_2/CO syngas diffusion flames. *Int J Hydrogen Energy* 39(7): 3459-3468.
- [10] Li CC, Chen JW, Yang JT (2012) Stabilization of double flames interacting with the intersecting flow on a V-shaped burner. *Combust Sci Technol* 184(12): 2117-2135.

آنتالپی ورودی محصولات افزایش می‌یابد یا به عبارت دیگر انرژی فعال‌سازی واکنش، کاهش داده شده است. این آنتالپی بیش‌تر خود را در پایان واکنش در دمای محصولات نشان داده و باعث افزایش دمای احتراق می‌شود.

اگرچه افزایش دمای ورودی باعث افزایش دمای شعله می‌گردد و کاهش مصرف سوخت را به همراه خواهد داشت، اما یک اثر منفی آن افزایش تولید NO_x است. این پدیده به علت افزایش دمای ماکزیمم شعله است؛ زیرا مقدار NO_x تولیدی به‌شدت به دمای شعله وابسته است [۲۴]. افزایش دما تا ۷۰۰ کلوین منجر به افزایش ۹۴ درصدی میزان اکسیدهای نیتروژن شده است که در پارامترهای طراحی مشعل باید مد نظر قرار گیرد. جداول ۴ و ۵ و شکل‌های ۷ و ۸ وابستگی NO_x تولیدی را به پیش‌گرم کردن سوخت و هوا نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به کمک نرم‌افزار فلوئنت ساختار دمایی و مقدار NO_x تولیدشده مربوط به برخورد دو شعله با زاویه‌های متفاوت برای دو سوخت هیدروژن و متان مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر اثر زاویه‌ی بین دو مشعل بر این دو پارامتر، تأثیر پیش‌گرم کردن هوا و سوخت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش زاویه برخورد دو شعله باعث اختلاط بیش‌تر گونه‌ها شده که منجر به احتراق با دمای بالاتر می‌گردد؛ همچنین مقدار تولید NO_x با افزایش زاویه افزایش می‌یابد، که از این پدیده (بیش‌تر شدن دما و متناسب با آن بیش‌تر شدن NO_x) می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر NO_x تولیدی از نوع حرارتی است. این نتیجه را می‌توان از مقایسه مقدار NO_x تولیدی مربوط به دو سوخت هیدروژن و متان نیز به‌دست آورد؛ با این مقایسه می‌توان دید که دمای شعله هیدروژن حدود 200 درجه بالاتر از دمای شعله متان است، میزان NO_x تولیدشده در احتراق هیدروژن نیز چند برابر احتراق متان است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم افزایش تولید NO_x با افزایش دما است؛ همچنین از مشاهده ساختار شعله در زوایای گوناگون می‌توان استنباط کرد که افزایش زاویه برخورد دو شعله، باعث افزایش مقدار جریان برگشتی و

- [18] Lock A, Briones AM, Aggarwal SK, Puri IK, Hegde U (2007) Liftoff and extinction characteristics of fuel-and air-stream-diluted methane-air flames. *Combust Flame* 149(4): 340-352.
- [19] Kiani M, Houshfar E, Ashjaee M (2019) Experimental investigations on the flame structure and temperature field of landfill gas in impinging slot burners. *Energy* 170: 507-520.
- [20] Chen JW, Chiu CP, Mo SH, Yang JT (2015) Combustion characteristics of premixed propane flame with added H₂ and CO on a V-shaped impinging burner. *Int J Hydrogen Energy* 40(2): 1244-1255.
- [21] Kiani M, Houshfar E, Ashjaee M (2018) An experimental and numerical study on the combustion and flame characteristics of hydrogen in intersecting slot burners. *Int J Hydrogen Energy* 43(5): 3034-3049.
- [22] Hosseini SE, Bagheri G, Wahid MA (2014) Numerical investigation of biogas flameless combustion. *Energy Convers Manage* 81: 41-50.
- [23] ANSYS Fluent Tutorial Guide (2018) Modeling species transport and gaseous combustion.
- [24] Hosseini SE, Wahid MA, Abuelnuor AA (2012) High temperature air combustion: Sustainable technology to low NO_x formation. *Int Rev Mech Eng* 6(5): 947-953.
- [11] Kiani M, Houshfar E, Niaraki Asli AE, Ashjaee M (2017) Combustion of syngas in intersecting burners using the interferometry method. *Energy Fuels* 31(9): 10121-10132.
- [۱۲] جلیلی مهر م، مقیمان م، نیازمند ح (۱۳۹۶) مطالعه اثر پیش گرمایش سوخت گاز طبیعی بر تشکیل دوده، درخشندگی شعله و انتشار NO به روش عددی و آزمایشگاهی. *مجله مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۷۹-۹۰: ۷(۱).
- [13] Datta A, Saha A. Contributions of self-absorption and soot on radiation heat transfer in a laminar methane-air diffusion flame. *Proc Inst Mech Eng A* 221(7): 955-970.
- [14] DuPont V, Pourkashanian M, Williams A (1993) Modelling process heaters fired by natural gas. *J Inst Energy* 66: 20-38.
- [۱۵] کیانی م، امیری پ، اسماعیل پور ک (۱۳۹۶) بررسی میدان دما و ساختار شعله آرام جت‌های برخوردی مایل گاز لندفیل با استفاده از روش تجربی اینترفرومتری ماخ-زندر. *مهندسی مکانیک مدرس* ۲۳۳-۲۴۰: ۷(۶).
- [16] De Soete GG (1975) Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen. *Symp (Int) Combust* 15(1): 1093-1102.
- [17] Mandal BK, Sarkar A, Datta A (2006) Numerical prediction of the soot and NO formation in a confined laminar diffusion flame without and with air preheat. *Proc Inst Mech Eng A* 220(5): 473-486.