

بررسی عددی اثر مکان پیلوت بر بلندشدگی شعله جت آشفته با سطوح مختلف ناهمگنی در محفظه احتراق

حسین هنردار^۱ و سید عبدالمهدی هاشمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، h.honardar@gmail.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، hashemi@kashanu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۶/۰۸، پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۹)

چکیده: احتراق مخلوط واکنش‌دهنده‌های ناهمگن نوعی از احتراق است که در آن اختلاط سوخت و هوا به‌طور کامل انجام نمی‌شود. این تحقیق به بررسی عددی اثر مکان پیلوت بر بلندشدگی شعله جت آشفته با سطوح مختلف ناهمگنی در محفظه احتراق پرداخته است. در این بررسی عددی، از مدل‌سازی معادلات ناویراستوکس به‌روش میانگین‌گیری رینولدز و مدل‌سازی آشفته‌گی k-ε استاندارد و مدل‌سازی جریان واکنشی روش اتلاف‌گردابه‌ای EDC استفاده شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که ارتفاع بلندشدگی شعله با افزایش طول ناهمگنی کاهش یافته و در طول ناهمگنی مشخصی که وابسته به نسبت هم‌ارزی و مکان پیلوت است، شعله به پایه می‌چسبد. در تمام حالات مورد بررسی، محدوده‌ای از طول‌های ناهمگنی یافت شد که در این طول‌ها شعله چسبیده بود. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع بلندشدگی شعله در حالت غیرپیش‌مخلوط بیشتر از حالتی است که مخلوط سوخت و هوا به‌صورت تقریباً پیش‌مخلوط در محفظه مشتعل می‌شوند. هرچه نسبت هم‌ارزی افزایش پیدا می‌کند، ارتفاع بلندشدگی کمتر می‌شود. براساس سه مکان مورد بررسی در دیوار جانبی برای مکان پیلوت و نتایج به‌دست‌آمده، پیلوتی که در محدوده وسط دیوار جانبی بود ارتفاع بلندشدگی کمتر و محدوده چسبیدن شعله بیشتری داشت. همچنین، ناحیه شعله در داخل محفظه با تغییر طول ناهمگنی تغییر می‌کند.

کلیدواژگان: پیلوت، ناهمگنی، احتراق آشفته، ارتفاع بلندشدگی، محفظه احتراق

مقدمه

شعله‌ها (چه آرام و چه آشفته) از نظر چگونگی احتراق به دو نوع پیش‌مخلوط و غیرپیش‌مخلوط تقسیم‌بندی می‌شوند. در شعله‌های پیش‌مخلوط، سوخت و اکسیدکننده ابتدا با یک مکانیزم مشخص و در یک محفظه مشخص باهم مختلط می‌شوند و سپس محترق می‌شوند، در صورتی که در شعله‌های غیرپیش‌مخلوط، سوخت و اکسیدکننده از قسمت‌های مختلف وارد یک محفظه می‌شوند و هم‌زمان که باهم مختلط می‌شوند محترق هم می‌شوند. هر دو حالت احتراق مزایا و معایب خاص خود را دارند. حالت سوم احتراق مخلوط واکنش‌دهنده‌های ناهمگن است. در این حالت، سوخت و هوا به‌صورت مجزا و قبل از ورود به محلی که قرار است اشتعال و احتراق صورت پذیرد به یک لوله مشترک وارد می‌شوند که در این لوله اختلاط آن‌ها صورت می‌گیرد. اگر طول این لوله خیلی زیاد باشد، اختلاط سوخت و هوا به‌صورت کامل صورت می‌گیرد و در واقع احتراق پیش‌مخلوط خواهد بود و اگر طول این لوله صفر باشد، اختلاطی بین سوخت و هوا نیست و احتراق غیرپیش‌مخلوط خواهد بود. به طول‌های مختلف این لوله مشترک، که میزان اختلاط سوخت و هوا در آن متفاوت است، سطوح مختلف ناهمگنی L_r گفته می‌شود. این نوع احتراق از سال ۱۹۹۷ مورد توجه قرار گرفته است. برخی احتراق‌های صنعتی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در شرایط رقیق و با سوخت و هوای ناهمگن کار کنند [۱]. یکی از پارامترهای مهم در شعله‌ها بلندشدگی شعله است. این پارامتر نشان می‌دهد

که وضعیت شعله چگونه است. اگر شعله به سر مشعل یا به مکانی که طراحی شده است چسبیده باشد یا با فاصله کمی از آن تشکیل شده باشد، شعله تثبیت شده است. هرچه میزان بلندشدگی بیشتر باشد، شعله از حالت تثبیت شده فاصله می‌گیرد و اگر این روند افزایش یابد، شعله بلندشده خاموش می‌شود. روش‌های مختلفی برای کنترل این پارامتر و تثبیت شعله وجود دارد. متداول‌ترین این روش‌ها استفاده از پیلوت، جسم مانع و پیچش جریان است. در محفظه احتراق‌های صنعتی، مانند توربین‌های گازی، از یک یا چند روش هم‌زمان برای تثبیت شعله استفاده می‌شود. برای مثال، از پیچش جریان اصلی به‌همراه پیلوت استفاده می‌شود و ممکن است ساختار مشعل شامل جسم مانع باشد. استفاده از پیلوت، به‌عنوان تثبیت‌کننده، ساده‌ترین روشی است که جریان اصلی را تغییر نمی‌دهد، اما این روش هم اشکالاتی مانند ایجاد جریان مجزا به‌عنوان سهمی از جریان اصلی را دارد. بررسی اثر مکان پیلوت با سطوح مختلف ناهمگنی جریان ورودی تمرکز این تحقیق است.

تحقیقاتی که تاکنون روی پدیده احتراق مخلوط واکنش‌دهنده‌های ناهمگن صورت گرفته تماماً در فضای باز انجام شده است. از این تحقیقات تنها دو مورد در مطالعات خود به بررسی تاثیر پیلوت پرداخته‌اند و در بقیه موارد، صرفاً از پیلوت به‌عنوان تثبیت‌کننده احتراق استفاده شده و اثرات آن بررسی نشده است. نتایج بعضی از تحقیقات مرتبط به‌طور مختصر بیان می‌شود.

در سال ۱۹۹۷، توسط لی و همکارانش مطالعه‌ای روی پارامترهای ساختار شعله جت آشفته قسمتی پیش‌مخلوط انجام شد [۲]. آن‌ها دریافتند وقتی که هوا به جریان اصلی اضافه می‌شود، طول شعله کاهش پیدا می‌کند و زمانی که نسبت سرعت جت داخلی به سرعت هوای خارجی افزایش یابد، طول شعله کاهش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت سرعت ورودی به سرعت خروجی، طول بلندشدگی شعله به‌طور خطی افزایش پیدا می‌کند و شیب این نسبت، با افزایش طول ناهمگنی، کمتر می‌شود. در سال ۲۰۰۰، منصور، با مطالعه آزمایشگاهی روی پایداری شعله‌های قسمتی پیش‌مخلوط [۳]، طراحی جدیدی برای شعله‌های قسمتی پیش‌مخلوط به‌دست آورد که سبب پایداری وسیع شعله شد. مشعل نازل مخروطی جریان متمرکز شعله‌ها را تا رینولدز ۶۰۰۰۰ پایدار می‌کرد و علت پایداری این شعله‌ها داشتن سر مشعل مخروطی است. در این مطالعه آزمایشگاهی، ساختار ناحیه واکنش از طریق بررسی توزیع رادیکال OH انجام شده است. در سال ۲۰۰۴، سامسون و همکارانش مطالعه‌ای روی انتشار آزادانه شعله‌های هوا و پروپان با اختلاط ناهمگن [۴] انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییرات کسر اختلاط هسته شعله را متأثر نمی‌کند. همچنین، به این نتیجه رسیدند که افزایش ارتفاع شعله در شعله‌های ناهمگن نسبت به حالت‌های همگن سرعت کمتری دارد. در سال ۲۰۰۷، سنگیسن و همکارانش مدل‌سازی عددی LES^۱ را برای یک جریان مشعل توربین گاز با دو حالت مختلف از پیلوت انجام دادند [۵]. دو حالت پیلوت به این صورت که در یک حالت ۶ درصد از متان که در مشعل باید سوخته شود، وارد پیلوت می‌شود و در پیلوت می‌سوزد و در حالت دوم، ۲ درصد از متان می‌سوزد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ورودی پیلوت هم در تثبیت شعله و هم در ناحیه شعله موثر است. در حالت دوم، درصد تثبیت شعله کمتر است و شعله مقداری دچار بلندشدگی می‌شود. این جابه‌جایی باعث به‌دام‌انداختن گازهای سرد رقیق می‌شود و مشکلی برای جریان عبوری پیلوت به‌وجود می‌آورد و تثبیت شعله را جابه‌جا می‌کند و باعث ایجاد ناپایداری می‌شود. وقتی که ۶ درصد سوخت متان وارد پیلوت می‌شود، نسبت هم‌ارزی در ناحیه ابتدای مشعل به‌گونه‌ای است که شعله در این ناحیه تشکیل و باعث تثبیت شعله می‌شود. از طرف دیگر، در نرخ ورودی سوخت به پیلوت کم (حالتی که ۲ درصد سوخت متان وارد پیلوت می‌شود)، اگر مخلوط اولیه رقیق باشد، در ناحیه بازچرخش جابه‌جاشده گازهای رقیق سردی را تشکیل می‌دهد که کاملاً اثر پیلوت را از بین می‌برد. این اثر از تثبیت شعله جلوگیری می‌کند و باعث ناپایداری بیشتر می‌شود. برای توربین‌هایی که در فشار بالا کار می‌کنند پیلوت با نرخ ورودی سوخت کم مناسب نیست. در سال ۲۰۱۴، میرس و همکارانش مطالعه‌ای روی پایداری شعله‌های آشفته پیلوت‌دار با ورودی ناهمگن انجام دادند [۶]. در این مطالعه، دو شعله با نسبت هم‌ارزی، سرعت جت و مشخصات شعله یکسان و با نسبت طول ناهمگنی متفاوت مورد مقایسه قرار گرفتند. پایداری شعله با شرایط ورودی ناهمگن نسبت به شرایط ورودی همگن بیشتر بوده که دلیل اصلی آن نرخ آزاد شدن حرارت بالاتر و نرخ اضمحلال پایین‌تر در نزدیکی

1. Large Eddy Simulation

مشعل است. اختلاط ناقص بالادست جریان خروجی جت باعث ایجاد گرادیان‌های کم در کسر اختلاط در محدوده پیلوت می‌شود. در سال ۲۰۱۵، ژی یا او و همکارانش تحقیقی روی ناپایداری احتراق شعله پیلوت در یک احتراق تثبیت‌شده با جسم مانع پیلوت انجام دادند [۷]. هدف اصلی این تحقیق بررسی دینامیک شعله پیلوت و فراهم‌کردن زمینه‌هایی برای مطالعه مکانیزم‌های فعل و انفعال بین شعله پیلوت و شعله اصلی بود. با افزایش نرخ جرمی جریان سوخت پیلوت، شعله پیلوت به تدریج از حالت پایدار به ناپایدار تغییر کرد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که با افزایش نرخ جریان جرمی سوخت پیلوت، نسبت‌های هم‌ارزی در هر دو لایه برشی و ناحیه بازچرخش افزایش می‌یابد. این نتایج نشان داد که نرخ جرمی جریان سوخت پیلوت تاثیر قابل توجهی در پایداری دینامیکی شعله پیلوت دارد. تصاویر شعله پرسرعت و تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که ریزش گرداب متقارن دلیل اصلی شعله ناپایدار است. از نظر آن‌ها، شرط لازم برای پایداری شعله اصلی وجود یک شعله پیلوت قوی است. بنابراین، نرخ جریان جرمی سوخت پیلوت باید برای به‌دست‌آوردن شعله پیلوت پایدار بهینه شود. در سال ۲۰۱۶، کلینهنز و همکارانش مطالعه‌ای روی مشخصه‌های شعله آشفته مشعل پیلوت‌دار با سه سطح ناهمگنی ورودی با شبیه‌سازی LES انجام دادند [۸]. در نتایج آزمایشگاهی، میزان ناهمگنی بهینه‌ای به‌دست آمد که منجر به تثبیت شعله بالاتری می‌شد. همچنین، به این نتیجه رسیدند که آزادسازی حرارت متمرکزتر و زودتر برای افزایش تثبیت شعله مفید است. در سال ۲۰۱۶، کلینهنز و همکارانش تحقیقی روی مشخصه‌های شعله آشفته مشعل پیلوت‌دار با سه سطح ناهمگنی مختلف ورودی انجام دادند [۸]. نتایج منجر به دست‌آوردن طول ناهمگنی شد که در آن پایداری شعله بالاترین میزان را دارد. همچنین، آن‌ها دریافتند که برای افزایش پایداری شعله باید آزادکردن حرارت زودتر و متمرکزتر صورت بگیرد. در سال ۲۰۱۶، گوپبرت و همکارانش مطالعه‌ای روی پایداری شعله آشفته با ورودی ناهمگن انجام دادند [۱۰]. مطالعه بر روی اثرات سه سوخت دی‌متیل-اتر، گاز مایع و گاز طبیعی فشرده انجام شد. نتایج نشان داد که گاز طبیعی فشرده بیشترین و دی‌متیل‌اتر کمترین بهبود پایداری را دارند که دلایل ممکن برای این تفاوت تثبیت پایداری، الگوهای اختلاط، اثرات پیلوت و خواص سوخت بیان شد. تغییر نرخ آزادشدن گرما از طریق پیلوت در سه نوع سوخت به روش‌های مشابه اثر می‌گذارد. ترکیب‌های هوا و گاز طبیعی غنی همگن به‌خوبی در تماس با پیلوت نمی‌سوزند. در این حالت، بیشینه سرعت جریان در آستانه پدید آمدن شعله کمتر از حالت ترکیب ناهمگن با ناهمگنی متوسط می‌باشد. علت این تغییر، نزدیک‌بودن ترکیب مخلوط در حالت ناهمگن به حالت استوکیومتری در تماس با پیلوت است. در سال ۲۰۱۶، منصور و همکارانش با تحقیق بر روی اثر میدان اختلاط بر پایداری شعله‌های ناهمگن آشفته [۱۲] به این نتیجه رسیدند که میدان اختلاط پارامتری کلیدی اثرگذار در پایداری این نوع شعله است. در شرایط یکسان ورودی، (نسبت هم‌ارزی و رینولدز) ساختار میدان جریان از سطح ناهمگنی تاثیر می‌پذیرد. نتایج عددی نشان می‌دهد که نوسانات سرعت محوری، در سطح ناهمگنی که پایدارتر است، بیشتر است. از طرف دیگر، زمانی که به محدوده بلندشدگی شعله نزدیک می‌شود، با افزایش عدد رینولدز یا کاهش نسبت هم‌ارزی، لایه OH وسیع‌تر می‌شود و هرچه این لایه نازک‌تر باشد نشان‌دهنده پایداری بیشتر شعله یا فاصله‌داشتن از ناحیه خاموشی است. در سال ۲۰۱۸، منصور و همکاران، به‌منظور بررسی تثبیت شعله‌های ناهمگن قسمتی‌پیش‌مخلوط سوخت‌های گازی، سرمشعلی با مقطع مستطیلی انتخاب کردند [۱۴]. در این کار، طراحی روی شعله‌های آشفته مقطع مستطیلی برای بهبود پایداری انجام شده است. پارامترهایی نظیر نسبت هم‌ارزی، سطح ناهمگنی و عدد رینولدز در این مطالعه بررسی شده است. بررسی این پارامترها نشان داد که مخلوط ناهمگن بسیار پایدارتر از مخلوط کاملاً پیش‌مخلوط است. تثبیت شعله با استفاده از نازل هرمی مقطع مستطیلی بسیار بهبود پیدا کرد. این سرمشعل توانایی تثبیت شعله‌های صفحه‌ای آشفته از مخلوط غیرپیش‌مخلوط تا کاملاً پیش‌مخلوط را دارد. سرمشعل نازل هرمی مقطع مستطیل توانست تا نسبت هم‌ارزی ۰/۶ را پایدار بسوزاند، در صورتی که مقطع دایره‌ای می‌تواند برای شعله‌های غنی استفاده شود. در این مشعل میزان تثبیت جریان ناهمگنی بسیار بیشتر از شعله پیش‌مخلوط ساده است. با اضافه‌کردن جریان اضافی محوری، تثبیت شعله بیشتری به‌دست آمد. در سال ۲۰۱۹، جین و همکارانش اثرات ناهمگنی بر ساختار شعله‌های پیش‌مخلوط آشفته را بررسی کردند [۱۶]. با افزایش طول ناهمگنی، شعله‌های

شبهه بنسن با نوک شعله کوتاه‌تر در پایین دست جریان پیلوت تشکیل شد. برای تمام شعله‌های بررسی شده، سطح بیشینه شعله با افزایش نرخ ناهمگنی افزایش یافت.

حضور هوای محیط و نفوذ آن ساختار شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه اکثر احتراق‌های صنعتی در داخل محفظه یا کوره انجام می‌شود، بنابراین در تحقیق حاضر برخلاف مطالعات گذشته اثر ناهمگنی در یک محفظه احتراق بدون حضور هوای محیط بررسی می‌شود. هدف این مقاله بررسی اثر سطوح مختلف ناهمگنی ورودی و مکان پیلوت بر وضعیت بلندشدگی شعله در نسبت هم‌ارزی مختلف در جریان آشفته ورودی با دبی جریان اصلی و پیلوت ثابت است.

معادلات حاکم و روش عددی

برای شبهه‌سازی جریان واکنشی، معادله پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، انتقال گونه‌ها و آشفستگی حل می‌شوند. این معادلات به صورت روابط (۱) تا (۵) بیان می‌شوند.

معادله پیوستگی

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا، \vec{V} بردار سرعت مخلوط گاز و ρ_g چگالی مخلوط گاز است.

معادله اندازه حرکت

$$\rho_g \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \bar{\tau} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = (\mu + \mu_t) (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) \quad (3)$$

در رابطه بالا، p بیانگر فشار استاتیک، $\bar{\tau}$ بیانگر تانسور تنش برشی، μ گرانروی مولکولی و μ_t گرانروی مربوط به آشفستگی است. به منظور محاسبه گرانروی آشفستگی، از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$\mu_t = \frac{\rho_g C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

معادله انرژی

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V} c_p T_g) = \vec{\nabla} \cdot ((\lambda_g + \lambda_{g,t}) \vec{\nabla} T_g) - \sum_{i=1}^{N_s} \bar{\omega}_i h_i W_i \quad (5)$$

در رابطه بالا، λ_g ضریب هدایت حرارتی گاز، $\lambda_{g,t}$ ضریب هدایت حرارتی آشفستگی، $\bar{\omega}_i$ بیانگر نرخ مولی تولید، h_i بیانگر آنتالپی و W_i بیانگر وزن مولکولی آلاینده است.

معادله انتقال گونه‌ها

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V} Y_i) = -\vec{\nabla} \bar{J}_i + \bar{\omega}_i W_i \quad (6)$$

$$\bar{J}_i = -(\rho_g (D_{i,m} + D_t)) \vec{\nabla} Y_i \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $D_{i,m}$ نفوذ جرمی برای گونه i و D_t نفوذ ناشی از آشفستگی است.

برای مدل کردن تنش‌های رینولدزی در معادله بقای تکانه از مدل اغتشاشی k-ε استاندارد استفاده می‌شود. شبهه‌سازی عددی محفظه احتراق به صورت متقارن محوری و با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام می‌شود. تصحیح فشار با الگوریتم سیمپل انجام می‌شود [۱۷]. همچنین، در این مدل‌سازی از روش گسسته‌سازی با تقریب بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود. سینتیک‌های یک یا دوم‌حله‌ای متداول، که گونه‌های شیمیایی محدودی دارند، برای مخلوط‌های غنی قابل استفاده نیستند. در این تحقیق، به منظور بررسی غلظت رادیکال OH در ردیابی ناحیه احتراق و همچنین ضرورت بررسی آلاینده‌گی NOx در کارهای آینده، استفاده از سینتیک‌های کوچک امکان‌پذیر نبود. لذا، با توجه به اینکه سینتیک GRI2.11 نسبت به GRI3 نتایج بهتری برای تخمین آلاینده‌ها دارد [۱۹، ۱۸]، در این شبهه‌سازی سینتیک GRI2.11 با ۴۹ گونه شیمیایی و ۲۲۷ واکنش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰].

مسئله شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی محفظه با استفاده از فلونت، کار تجربی گرتون و همکاران مبنای مطالعه و مدل‌سازی قرار می‌گیرد. ایشان، در سال ۱۹۹۴، به مطالعه احتراق غیرپیش‌مخلوط گاز طبیعی درون یک محفظه استوانه‌ای پرداختند [۲۱]. برای بهبود در مشاهده نتایج، دبی بیشتر از دبی مورد مطالعه در کار تجربی گرتون و همکاران است و طول محفظه مورد مطالعه از ۱۷۰ به ۱۸۵ cm افزایش یافته است. همچنین، به محفظه احتراق یک ورودی مجزا برای پیلوت اضافه شده است. مدل‌سازی هندسه به صورت دوبعدی و بر مبنای تقارن محوری است. در بررسی حاضر، برای مدل‌سازی آشفستگی و محاسبه گرانیوی آشفستگی از مدل k-ε استاندارد استفاده شده است. در مطالعه‌ای از سیلوا و همکاران، در سال ۲۰۰۷، برای آنالیز اثر تشعشع احتراق آشفته غیرپیش‌مخلوط گاز طبیعی در محفظه احتراق استوانه‌ای از این مدل اغتشاشی استفاده شده است [۲۲]. هندسه مورد مطالعه این بررسی مشابه هندسه بررسی حاضر است. مطالعه‌ای از جلالیان و مظاهری، در سال ۲۰۱۸، اثرات چند سینتیک شیمیایی کلی بر شبیه‌سازی سه‌بعدی شعله برخاسته متان را در هندسه مشابه با هندسه حاضر با مدل اغتشاشی k-ε استاندارد مقایسه کردند [۲۳]. این مدل اغتشاشی به دلیل داشتن بهترین نتیجه برای این هندسه استفاده شده است. با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε استاندارد و در نظر گرفتن روش مناسب اثر دیواره می‌توان نتایج مناسب به دست آورد. برای مدل‌سازی جریان واکنشی، از روش اتلاف گردابه‌ای EDC^۱ استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفستگی، از معادلات ناویراستوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز (RANS)^۲ استفاده شده است. طرحواره هندسه محفظه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

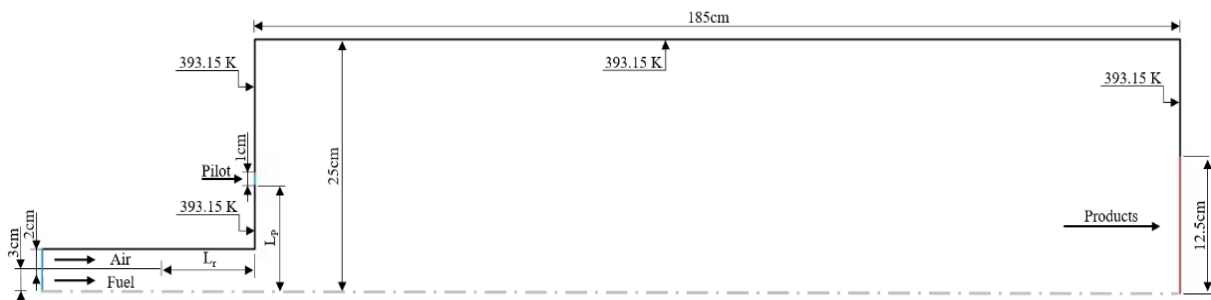


Figure 1- Schematic of the combustion chamber studied [20]

شکل ۱- طرحواره محفظه احتراق مورد مطالعه [۲۰]

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، سوخت و هوا به صورت مجزا به محفظه احتراق وارد می‌شوند. اگر طول ناهمگنی (L_r) صفر باشد، یعنی سوخت و هوا بدون هیچ اختلاط اولیه‌ای وارد محفظه احتراق می‌شوند و سپس در محفظه احتراق محترق می‌شوند (احتراق غیرپیش‌مخلوط). هرچه طول ناهمگنی زیادتر شود، سوخت و هوا با میزان اختلاط بیشتری وارد محفظه احتراق می‌شوند که در حالت حدی و زمانی که طول ناهمگنی خیلی زیاد شود، در واقع سوخت و هوا به صورت کاملاً پیش‌مخلوط وارد محفظه احتراق شده و محترق می‌شوند. در این تحقیق، اثر تغییر مکان پیلوت (L_p) در دیوار جانبی ورودی محفظه در طول ناهمگنی مختلف (L_r) بر بلندشدگی شعله ایجادشده در محفظه احتراق بررسی شده است. مبنای کار تجربی گرتون و همکاران سوخت ورودی به محفظه احتراق گاز با ترکیب ۹۰ درصد جرمی متان و ۱۰ درصد جرمی نیتروژن است. همچنین، ترکیب هوای ورودی به صورت ۲۳ درصد جرمی اکسیژن و ۷۶ درصد جرمی نیتروژن و ۱ درصد جرمی بخار آب است. سرعت ورودی سوخت به محفظه ۷/۷۶ متر بر ثانیه و سرعت ورود هوا به محفظه ۳۶/۲۹ متر بر ثانیه است که با این شرایط، صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در مدل‌سازی پیلوت فرض شده که محصولات حاصل از احتراق متان

1. Eddy Dissipation Concept
2. Reynolds Averaged Navier-Stokes

و هوا در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ در دمای ۱۷۰۰ کلوین، که توسط نرم‌افزار Gaseq محاسبه شده است، با دبی ثابت 0.0207 kg/s از مکان مشخص شده در شکل ۱ وارد محفظه می‌شود. دبی جرمی کل ورودی به محفظه 0.328 kg/s ، دمای هوای ورودی $323/15 \text{ K}$ و دمای سوخت $313/15 \text{ K}$ در نظر گرفته شده است. برای یکسان‌سازی شرایط و مقایسه صحیح بین نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، دبی ورودی به محفظه در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف یکسان در نظر گرفته شده که با توجه به فرضیات فوق، در دبی ورودی مخلوط یکسان، هرچه نسبت هم‌ارزی بیشتر می‌شود، سرعت هوا کمتر و سرعت سوخت بیشتر می‌شود. در مرز ورودی، که محل ورود سوخت و هواست، شرط مرزی دبی ورودی سوخت و هواست. در محل خروج گازهای احتراقی روی مرز خروجی، از شرط فشار نسبی صفر استفاده می‌شود. در مرز مشترک سیال با دیواره کوره، از شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها برای سرعت استفاده می‌شود. همچنین، دیواره محفظه در دمای ثابت $393/15 \text{ K}$ قرار دارد. برای مسئله خط مرکزی، محفظه به‌عنوان محور تقارن در نظر گرفته شده و تغییرات حول محور تقارن صفر است.

استقلال حل از تعداد سلول شبکه محاسباتی

انتخاب بهترین شبکه محاسباتی بسیار حائز اهمیت است. هم شبکه‌ای که نتایج با دقت بالا داشته باشد و هم شبکه‌ای که خیلی ریز نباشد که مدت‌زمان حل عددی را بالا ببرد. با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استاندارد و همچنین برای رفتار اطراف دیوار از تابع دیواره استاندارد استفاده شده است، میزان γ^+ باید در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار بگیرد. سلول‌های شبکه محاسباتی به‌صورت مربعی و یکنواخت در نظر گرفته شده است. با توجه به موارد فوق، برای بررسی وابسته نبودن نتایج حل به شبکه محاسباتی، چهار شبکه محاسباتی یکنواخت مربعی با ابعاد سلول ۵ میلی‌متر معادل 19200 سلول، ۳ میلی‌متر معادل 53817 سلول، $2/5$ میلی‌متر معادل 76800 سلول و $2/3$ میلی‌متر معادل 90980 سلول انتخاب شده است و نتایج حل روی هر کدام مقایسه شده است. شکل ۲ نتایج مربوط به کسر جرمی OH در مقطعی با طول $1/2$ متر داخل محفظه را برای این چهار شبکه نشان می‌دهد. گزینش این کسر جرمی به‌عنوان معیار به این دلیل است که نرخ واکنش به‌شدت وابسته به دماست و به این ترتیب هم میدان دما ارزیابی می‌شود و هم سینتیک واکنش. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج دو شبکه با 76800 و 90980 تعداد سلول، تفاوت چندانی باهم ندارد. بنابراین، برای ادامه کار، شبکه با 76800 سلول مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان γ^+ برای مش با ابعاد $2/5$ میلی‌متر برابر 152 است که داخل محدوده مورد نظر است.

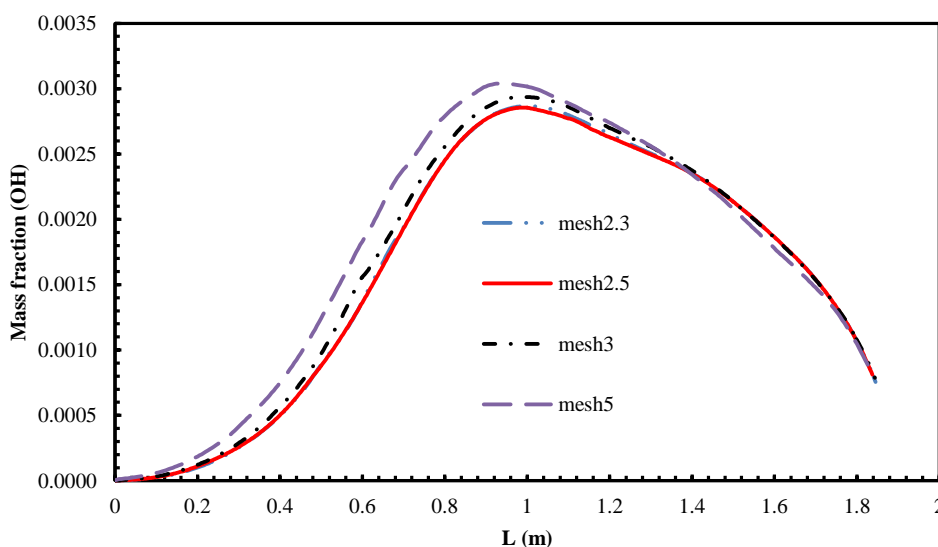


Figure 2- OH mass fraction at some point in the middle of the chamber for the independency of the mesh

شکل ۲- کسر جرمی OH در مقطعی در وسط محفظه برای بررسی استقلال حل از شبکه

راستی‌آزمایی حل عددی

برای راستی‌آزمایی حل، هندسه محفظه احتراق با ابعاد واقعی شبیه‌سازی شد که در آن دما در نقاط متعددی از محفظه با داده‌های تجربی گرتون و حل عددی داسیلوا [۲۴] مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی هماهنگی خوبی دارند. داسیلوا توسط مدل احتراقی آرنیوس^۱ و همچنین الگوریتم تصحیح فشار سیمپل‌سی^۲ حل عددی را انجام داده است که مشاهده می‌شود که نتایج تحقیق فعلی نسبت به نتایج حل عددی داسیلوا و همکاران تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد.

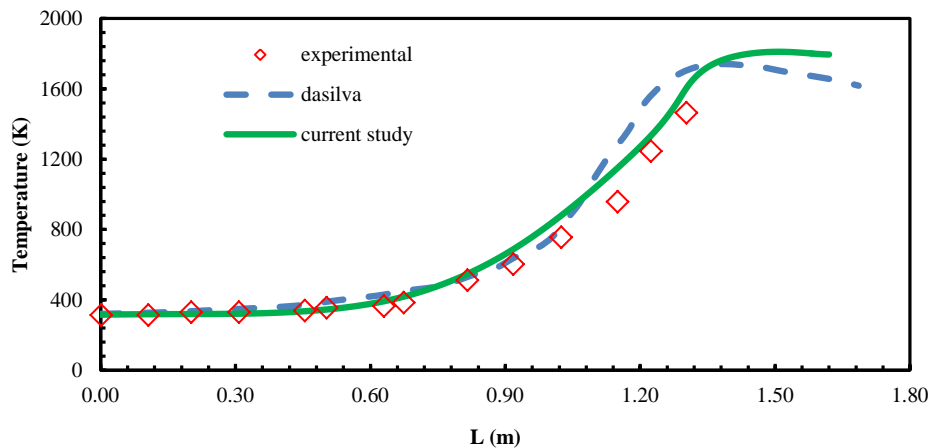


Figure 3- Comparison of chamber axis temperature with the experimental [21] and other numerical results [22]

شکل ۳- مقایسه دما در محور محفظه با نتایج تجربی [۲۱] و نتایج عددی دیگر [۲۴]

نتایج و بحث

بررسی اثرات طول ناهمگنی نیازمند بررسی رفتار جریان در ورودی است. جریان اصلی در ورود به محفظه، به دلیل افزایش قطر محفظه نسبت به قطر جت ورودی و اثر پله، دارای ناحیه بازچرخش است. در شکل ۴، خطوط جریان در محفظه نشان داده شده است. در شکل زیر، جریان برگشتی و وارد شدن به جریان اصلی در ابتدای محفظه به خوبی مشاهده می‌شود. همچنین، یک ناحیه بازچرخش بین جریان پیلوت و جریان اصلی در محفظه مشاهده می‌شود. جریان اصلی، به دلیل اثر مکش، جریان پیلوت را به سمت پایین می‌کشد که در شکل زیر مشاهده می‌شود.

تغییر طول ناهمگنی مستقیم بر روی کسر جرمی واکنش‌دهنده‌ها و سرعت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با این دو تغییر، پروفیل سرعت در محفظه، مکان و قدرت ناحیه‌های بازچرخش و کسر اختلاط در محفظه تغییر می‌کند. در شکل ۵، نمودار a کسر جرمی CH_4 در مقطع ورودی را برای طول‌های ناهمگنی مختلف برای نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ نمودار a مشاهده می‌شود، اثر تغییر طول ناهمگنی در طول‌های ناهمگنی زیر ۳۰۰ میلی‌متر بسیار زیاد است. با شروع افزایش طول ناهمگنی از حالت غیرپیش‌مخلوط، بیشینه کسر جرمی از حالت غیرپیش‌مخلوط، که در محور برابر ۱ است، به ۰/۱۱۸ در طول ناهمگنی ۳۰۰ میلی‌متر می‌رسد. این مقدار در طول ناهمگنی ۱۴۰۰ میلی‌متر برابر ۰/۵۲ است. با اختلاط سوخت و هوا و قرار گرفتن میزان ترکیب در محدوده قابل اشتعال، امکان تشکیل شعله بیشتر خواهد شد. انتظار می‌رود با شروع افزایش طول ناهمگنی از حالت غیرپیش‌مخلوط، ارتفاع بلندشدگی کاهش یابد. در شکل ۵ نمودار b، تغییرات سرعت محوری در مقطع ورودی بر حسب طول ناهمگنی برای نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان داده شده است. با افزایش

1. Eddy Breakup-Arrhenius

2. Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent

طول ناهمگنی، پروفیل پله‌ای سرعت، که تغییرات زیادی در مرز بین سوخت و هوا دارد، به پروفیل هموار مخلوط سوخت و هوا نزدیک می‌شود. این تغییر پروفیل سرعت و میزان یکنواختی در طول شعله اثر دارد.

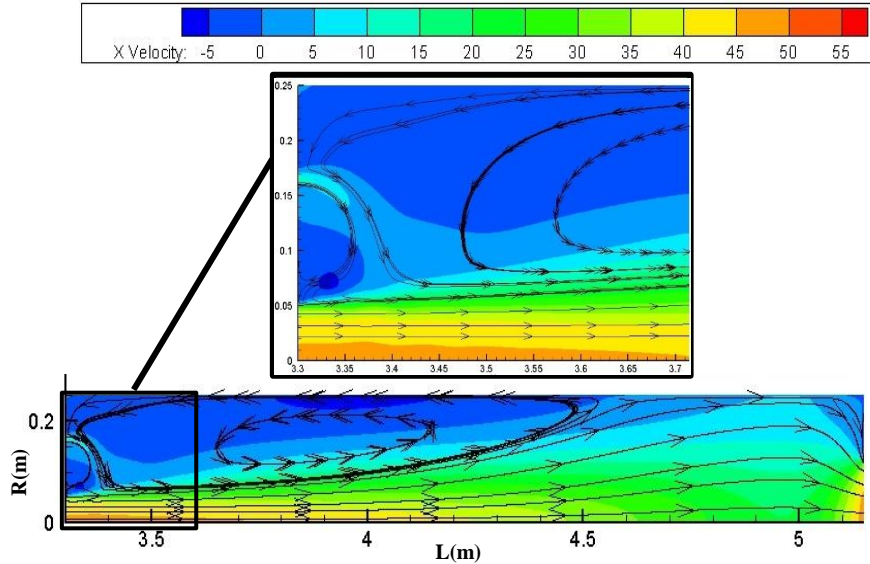


Figure 3- Streamline contour in chamber
شکل ۴- کانتور خطوط جریان در محفظه

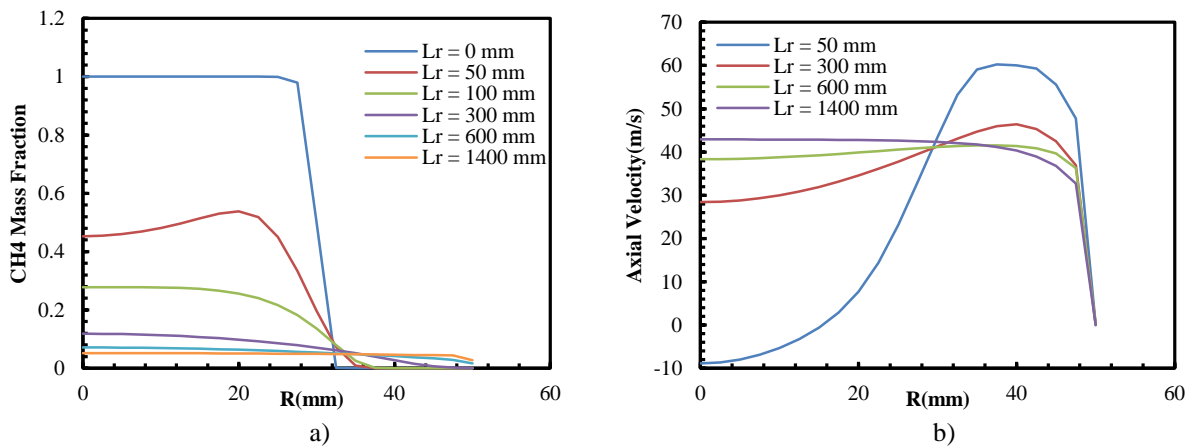


Figure 5- a) CH₄ mass fraction entering the chamber at different inhomogeneous lengths at equivalence ratio of 0.9
b) axial velocity of the mixture entering the chamber at different inhomogeneous lengths at equivalence ratio of 0.9

شکل ۵- الف) کسر جرمی متان هنگام ورود به محفظه در طول‌های ناهمگنی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و
ب) سرعت محوری مخلوط در ورود به محفظه در طول‌های ناهمگنی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹

با بررسی کانتورهای سرعت محوری در طول‌های ناهمگنی مختلف در نسبت هم‌ارزی ثابت و مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر، مکان ناحیه بازچرخش، که بیشترین اندازه آن در شعاع ۷ سانتی‌متری محور شعله و در مقطعی با فاصله ۲ سانتی‌متری ورودی جریان اصلی قرار دارد، مشاهده می‌شود. با استفاده از دو خط عمود می‌توان مشخصات این ناحیه را نشان داد. در شکل ۶ نمودارهای a و b به ترتیب تغییرات سرعت محوری روی خط شعاع ثابت ۷ سانتی‌متر و مقطع ۲ سانتی‌متری ورودی جریان اصلی است.

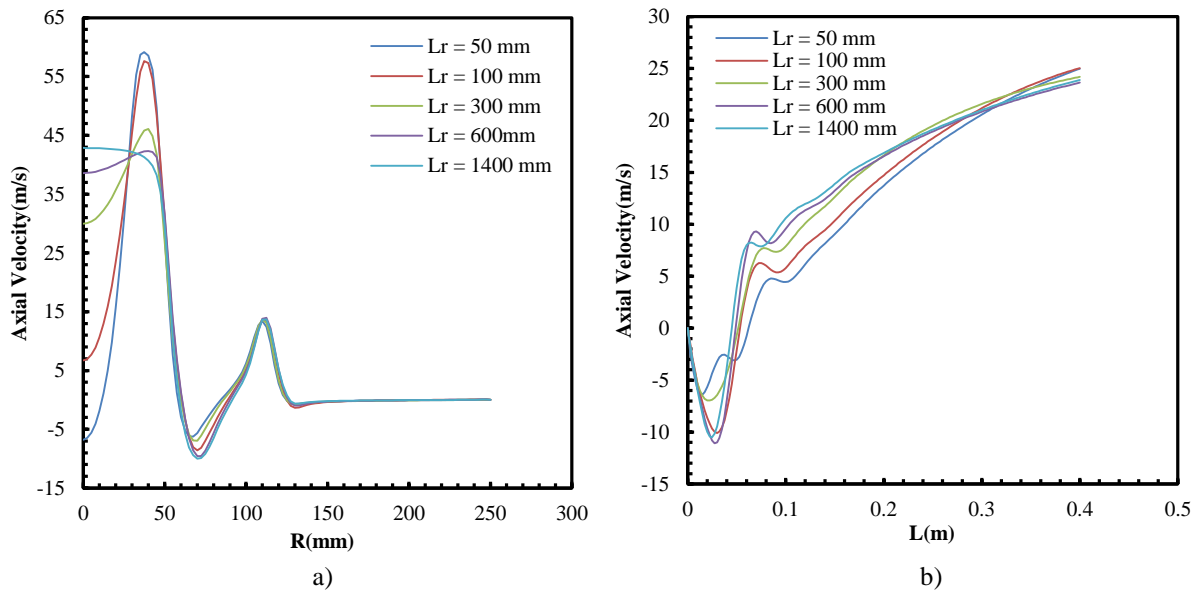


Figure 6- a) Axial velocity inside the chamber in radial distance 7 cm at different inhomogeneous lengths at equivalence ratio of 0.9
 b) Axial velocity in 0.02 m inside the chamber at different inhomogeneous lengths at equivalence ratio of 0.9

شکل ۶- الف) سرعت محوری در شعاع ۷ cm داخل محفظه در طول‌های ناهمگنی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و
 ب) سرعت محوری در طول ۰/۰۲ m داخل محفظه در طول‌های ناهمگنی مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹

با توجه به شکل ۶، در هر دو نمودار، با افزایش طول ناهمگنی، ابتدا ناحیه بازچرخش بزرگ‌تر شده و با افزایش طول ناهمگنی از ۶۰۰ به ۱۴۰۰ میلی‌متر، این ناحیه کمی کوچک‌تر می‌شود. برای بررسی اثر تغییر مکان پیلوت، کانتور سرعت محوری جریان در ابتدای محفظه در شکل ۷ برای طول ناهمگنی ثابت ۳۰۰۰ میلی‌متر و نسبت هم‌ارزی ۱/۱ نشان داده شده است. در این شکل، اثر تغییر مکان پیلوت در شکل‌گیری و مکان ناحیه بازچرخش نزدیک جریان ورودی به محفظه نشان داده شده است.

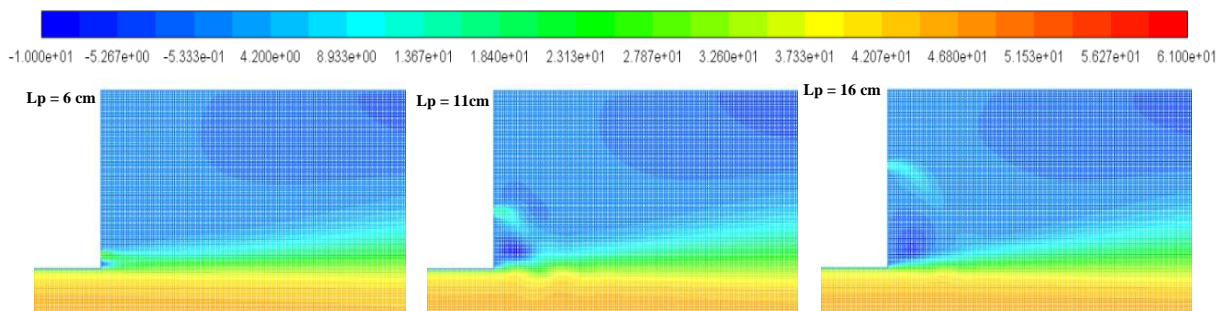


Figure 7- Comparison of axial velocity contours at constant equivalence ratio and inhomogeneity length in different pilot places (L_p)
 شکل ۷- مقایسه کانتورهای سرعت محوری در نسبت هم‌ارزی و طول ناهمگنی ثابت و مکان‌های پیلوت (L_p) مختلف

با توجه به شکل ۷، ناحیه بازچرخش در دو حالت پیلوت ۱۱ و ۱۶ سانتی‌متر قابل مشاهده است، اما این ناحیه بازچرخش در مکان پیلوت چسبیده به جریان اصلی دیده نمی‌شود. برای بررسی دقیق‌تر، در شکل ۸، نمودارهای a و b به ترتیب کسر جرمی CH_4 و سرعت محوری جریان را در مقطع عبور کرده از مرکز ناحیه بازچرخش عمود بر محور تقارن نشان داده شده است. این مقطع داخل محفظه و در ۳ سانتی‌متری خروجی جریان اصلی است.

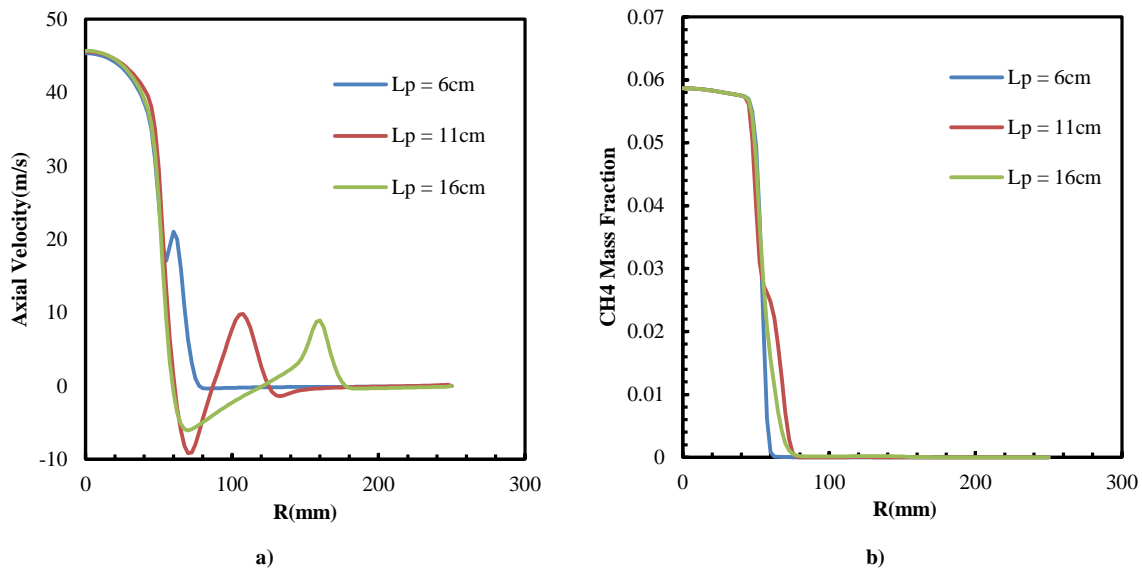


Figure 8- a) CH₄ mass fraction in 0.03 m inside the chamber at constant inhomogeneous length and equivalence ratio for different pilot places (L_p)

b) Axial velocity in 0.03 m inside the chamber at constant inhomogeneous length and equivalence ratio for different pilot places (L_p)

شکل ۸- الف) کسر جرمی متان در ۰/۰۳ m داخل محفظه در طول ناهمگنی و نسبت هم‌ارزی ثابت و مکان‌های پیلوت (L_p) مختلف
 ب) سرعت محوری در ۰/۰۳ m داخل محفظه در طول ناهمگنی و نسبت هم‌ارزی ثابت و مکان‌های پیلوت (L_p) مختلف

از نمودار a شکل ۸ مربوط به کسر جرمی متان می‌توان دریافت که در مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متری اختلاط سریع‌تر اتفاق افتاده است. در نمودار b شکل ۸، بیشترین مقدار اندازه سرعت منفی برای حالت پیلوت ۱۱ سانتی‌متر است. از طرف دیگر، در نمودار b شکل ۸ برای حالت مکان پیلوت ۶ سانتی‌متر، که نزدیک‌ترین مکان پیلوت به جریان اصلی است، سرعت محوری در هیچ شعاعی منفی نمی‌شود.

برای تحلیل و بررسی بلندشدگی شعله، مبنای بلندشدگی کسر جرمی OH در محفظه احتراق در نظر گرفته شده است. بر این اساس مکان‌هایی که دارای میزان ۲۰۰ ppm کسر جرمی OH باشند سطح شعله را هم در حالت رقیق هم در حالت غنی به‌خوبی نشان می‌دهند [۲۵]. با استفاده از این معیار، حداقل فاصله محوری (h) که این شرط را داشته باشد به‌عنوان معیاری از ارتفاع بلندشدگی شعله ارائه می‌شود.

شکل ۹ نمودار تغییرات ارتفاع بلندشدگی شعله را در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۹ در دبی ثابت، در مکان‌های مختلف پیلوت، برحسب طول ناهمگنی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با تغییر مکان پیلوت در سه مکان روی دیوار جانبی، هم طول بلندشدگی تغییر کرده و هم در طول ناهمگنی متفاوت، شعله دارای طول بلندشدگی صفر یا شعله چسبیده است. با افزایش فاصله پیلوت از محور محفظه، ارتفاع بلندشدگی کاهش یافته است، اما این کاهش به‌صورت خطی نیست. طبق نمودار، وقتی پیلوت در فاصله ۱۱ سانتی‌متری محور قرار دارد، دارای کمترین طول بلندشدگی در بین سه مکان مورد بررسی است. همچنین، در طول ناهمگنی کمتری شعله می‌چسبد. طول بلندشدگی در طول ناهمگنی یکسان برای حالتی که پیلوت در فاصله ۶ سانتی‌متری جریان ورودی قرار دارد، بیشترین مقدار می‌باشد. همچنین در این حالت، در طول ناهمگنی بیشتری شعله چسبیده ایجاد می‌شود. در هر سه مکان مورد بررسی، بعد از چسبیدن شعله، با افزایش طول ناهمگنی، وضعیت شعله ثابت می‌ماند و جدا نمی‌شود. در نسبت هم‌ارزی ۰/۸، الگوی تغییرات طول بلندشدگی شعله همانند نمودار ۹ است و با افزایش طول ناهمگنی، ارتفاع بلندشدگی کاهش می‌یابد. شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۸، همانند نمودار شکل ۹، بعد از چسبیدن جدا نمی‌شود. ارتفاع بلندشدگی شعله برای این نسبت هم‌ارزی در حالتی که پیلوت در ۱۱ سانتی‌متری محور قرار دارد، دارای

کمترین مقدار است. همچنین شعله برای این مکان پیلوت در مقایسه با دو مکان دیگر زودتر می‌چسبید. البته، مقادیر بلندشدگی در طول‌های ناهمگنی و همچنین طول ناهمگنی که شعله چسبیده است متفاوت است، اما این الگو در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ متفاوت است. با توجه به شکل ۹، در نسبت هم‌ارزی ۱/۱، بعد از اینکه شعله جدا شده، با افزایش طول ناهمگنی چسبید. با ادامه افزایش طول ناهمگنی، شعله دوباره جدا شده و به یک ارتفاع بلندشدگی میل می‌کند.

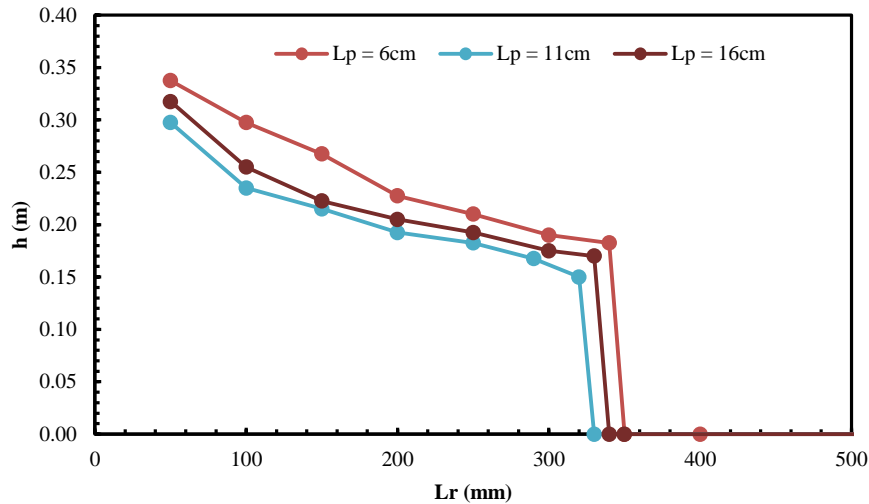


Figure 9- Lift off height (h) at equivalence ratio of 0.9 and pilot places (L_p) of 6, 11 and 16 cm
 شکل ۹- ارتفاع بلندشدگی (h) در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و مکان‌های پیلوت (L_p) ۶، ۱۱ و ۱۶ سانتی‌متر

در شکل ۱۰، همانند دو نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و ۰/۹، حالتی که پیلوت در ۱۱ سانتی‌متری محور قرار دارد کمترین ارتفاع بلندشدگی شعله را دارد و در طول ناهمگنی کمتری شعله چسبیده است. تفاوت این نسبت هم‌ارزی جدا شدن شعله با افزایش طول ناهمگنی است. به ترتیب، با افزایش طول ناهمگنی، ابتدا، شعله در حالتی که پیلوت در ۶ سانتی‌متری محور قرار دارد، جدا می‌شود. با ادامه افزایش طول ناهمگنی، شعله در حالتی که پیلوت در ۱۶ سانتی‌متری محور قرار دارد جدا شده و با افزایش اندکی در طول ناهمگنی شعله حالت سوم، پیلوتی که در ۱۱ سانتی‌متری محور تقارن قرار دارد، جدا می‌شود.

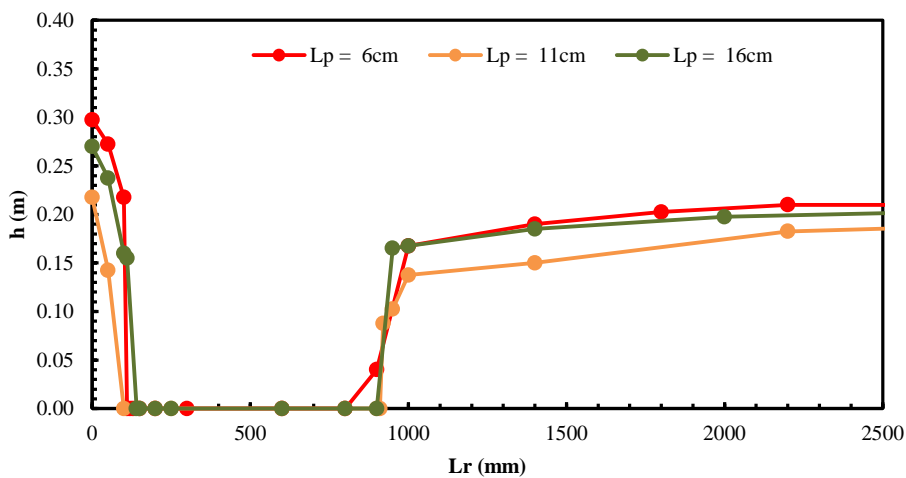


Figure 10- Lift off height (h) at equivalence ratio of 1.1 and pilot places (L_p) of 6, 11 and 16 cm
 شکل ۱۰- ارتفاع بلندشدگی (h) در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ و مکان‌های پیلوت (L_p) ۶، ۱۱ و ۱۶ سانتی‌متر

پس از جداسدن شعله در هر سه حالت، ارتفاع بلندشدگی در هر حالت به مقداری متفاوت میل می‌کند و کمترین میزان ارتفاع بلندشدگی مربوط به حالتی است که پیلوت آن در ۱۱ سانتی‌متری محور قرار دارد. شکل‌های ۷ تا ۱۰، که در بالا ارائه شد، اثر مکان‌های پیلوت و طول‌های ناهمگنی مختلف بر ارتفاع بلندشدگی شعله را در نسبت هم‌ارزی ثابت نشان داد. مطابق با نتایج نشان‌داده‌شده، در بررسی مکان پیلوت، با فاصله‌گرفتن پیلوت از محل شعله، طول بلندشدگی ابتدا در ۱۱ سانتی‌متری کاهش و از ۱۱ سانتی‌متری تا ۱۶ سانتی‌متری افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، با فاصله‌گرفتن پیلوت از محور شعله، به‌دلیل ایجاد ناحیه بازچرخش قوی بین خروجی پیلوت و جریان اصلی، تثبیت شعله بیشتر از حالت پیلوت چسبیده به جریان اصلی است. همچنین، در مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر، محدوده چسبیدن شعله افزایش می‌یابد. اگر کارکرد استفاده از پیلوت به‌منظور تثبیت بیشتر شعله در محدوده طراحی و کاهش ارتفاع بلندشدگی شعله باشد، با فاصله‌گرفتن پیلوت از محور شعله، کارکرد اصلی پیلوت تقویت می‌شود. البته، با افزایش فاصله پیلوت از ۱۱ سانتی‌متری محور به فاصله ۱۶ سانتی‌متری، ارتفاع بلندشدگی شعله افزایش و محدوده چسبیدن شعله کاهش می‌یابد. به‌عبارتی، با افزایش زیادتر فاصله پیلوت از محور، پیلوت کارکرد خود را از دست می‌دهد. همچنین، دو شکل ۸ و ۹ با نتایج به‌دست‌آمده از ارتفاع بلندشدگی در مکان‌های مختلف پیلوت همخوانی کامل دارند.

در شکل ۱۱، اثر نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و طول‌های ناهمگنی مختلف بر بلندشدگی شعله در مکان پیلوت ثابت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول ناهمگنی، ارتفاع بلندشدگی شعله کاهش می‌یابد. با افزایش طول ناهمگنی در سه نسبت هم‌ارزی بررسی شده، شعله در طول‌های ناهمگنی متفاوت می‌چسبد. با ادامه افزایش در طول ناهمگنی ۹۰۰ میلی‌متر، شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۱ دوباره جدا شده و ارتفاع بلندشدگی با افزایش طول ناهمگنی افزایش یافته و به مقدار ثابت ۰/۲ متر میل می‌کند. در دو نسبت هم‌ارزی دیگر، بعد از چسبیدن شعله، شعله چسبیده می‌ماند. با افزایش نسبت هم‌ارزی، ارتفاع بلندشدگی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبت هم‌ارزی، طول ناهمگنی که شعله می‌چسبد کاهش می‌یابد.

در نمودارهای ۹ تا ۱۱، اثر تغییر مکان پیلوت در دیوار جانبی و اثر تغییر نسبت هم‌ارزی در طول‌های مختلف ناهمگنی بر بلندشدگی شعله به‌صورت مجزا نشان داده شد. در بلندشدگی شعله و عملکرد پیلوت، مکان‌هایی که شعله چسبیده وجود دارد از اهمیت بالایی برخوردار است.

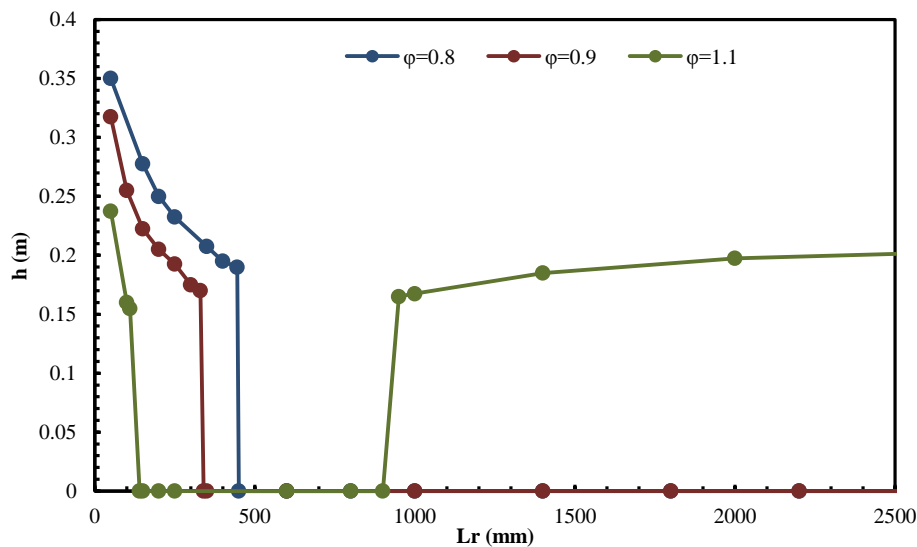


Figure 11- Lift off height (h) at different equivalence ratios(ϕ) of 0.8, 0.9 and 1.1 for pilot place (L_p) 16 cm
 شکل ۱۱- ارتفاع بلندشدگی (h) در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۱ برای مکان پیلوت (L_p) ۱۶ سانتی‌متر

در شکل ۱۲، طول‌های ناهمگنی که در آن شعله می‌چسبد برحسب مکان‌های مختلف پیلوت و در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌کنید، شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۱ در طول ناهمگنی کمتری چسبیده و کمترین میزان برابر ۱۰۰ میلی‌متر برای مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر است. همچنین، بیشترین طول‌های ناهمگنی که شعله در آن‌ها چسبیده است مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۸ برابر با ۴۵۰ میلی‌متر برای دو حالت پیلوت ۶ و ۱۶ سانتی‌متر است. از سوی دیگر، طبق شکل زیر، کمترین طول ناهمگنی که در آن شعله چسبیده است برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۱ به ترتیب برابر ۴۳۰، ۳۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر مربوط به مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر است.

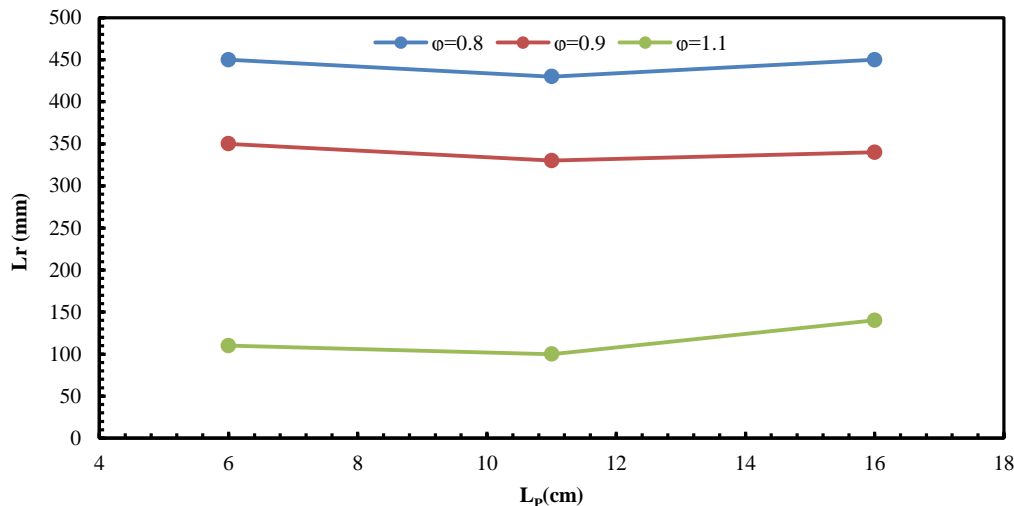


Figure 12- Inhomogeneity lengths (L_r) of the flame start to attach at different equivalence ratios (ϕ) and pilot places (L_p)
 شکل ۱۲- طول‌های ناهمگنی (L_r) شروع چسبیدن شعله در نسبت‌های هم‌ارزی (ϕ) و مکان‌های پیلوت (L_p) مختلف

با توجه به نمودار فوق، در سه نسبت هم‌ارزی بررسی شده، اگر هدف از پیلوت زودتر چسبیدن شعله باشد، مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر در طول ناهمگنی کمتری شعله چسبیده دارد.

شکل ۱۳ کانتورهای کسر جرمی OH برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف در مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر و طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر است. در این کانتورها اثر تغییر نسبت هم‌ارزی را می‌توان مشاهده کرد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، مقدار بیشینه کسر جرمی OH در محفظه افزایش یافته است. همچنین، طول شعله در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ بیشترین است. در محل اتصال پیلوت به شعله اصلی، هرچه نسبت هم‌ارزی افزایش یافته، این ناحیه کوتاه‌تر، ضخامت بیشتر و مقدار کسر جرمی OH بیشتر شده است.

در شکل ۱۴، کانتورهای کسر جرمی OH برای مکان‌های پیلوت مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر مکان پیلوت (L_p)، مکان چسبیدن شعله تغییر نمی‌کند. این مکان دیواره محفظه در لبه ورودی جت است. در حالتی که پیلوت در ۱۱ سانتی‌متری محور قرار دارد، شعله دارای طول کمتر و بیشینه کسر جرمی OH بیشتر است. همچنین محل اتصال شعله اصلی به پیلوت طول کمتر و ضخامت بیشتر دارد. بیشترین طول شعله مطابق شکل فوق، در حالت پیلوت ۶ سانتی‌متری محور است.

در کانتور شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب، اثر تغییر نسبت هم‌ارزی و مکان پیلوت به صورت مجزا نشان داده شد. برای نشان دادن اثر طول ناهمگنی به صورت کانتور، دو حالت وابسته به نسبت هم‌ارزی وجود دارد. برای دو نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و ۰/۹ یک حالت و برای نسبت هم‌ارزی ۱/۱ حالتی متفاوت از دو نسبت دیگر وجود دارد. این دو حالت در دو دسته کانتور در ادامه نشان داده شده است.

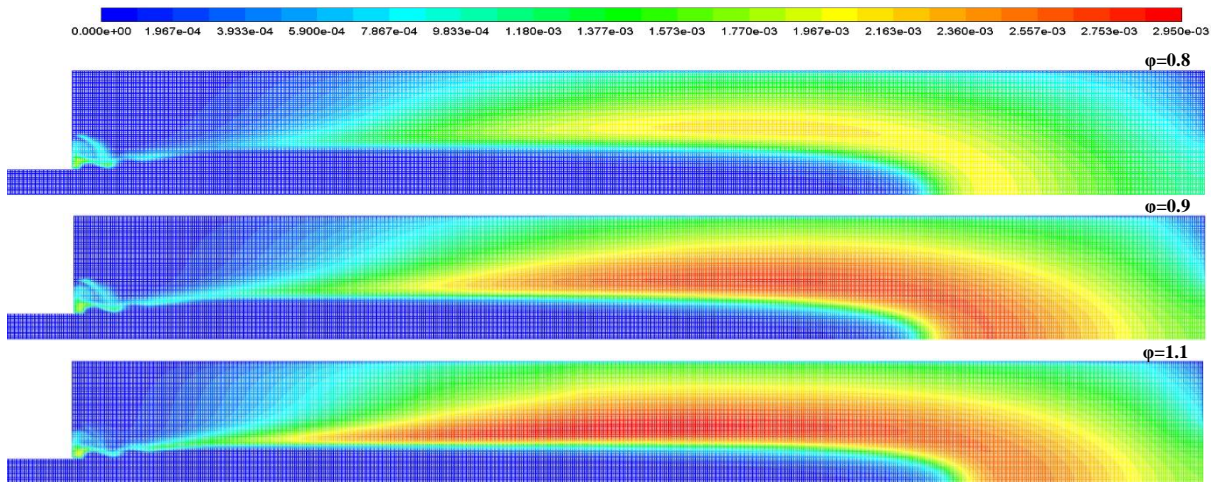


Figure 13- Comparison of OH mass fraction contours at constant pilot place (L_p) 11cm and inhomogeneity length (L_r) 600mm and different equivalence ratios (ϕ)

شکل ۱۳- مقایسه کانتورهای کسر جرمی OH در مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر و طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر ثابت و نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

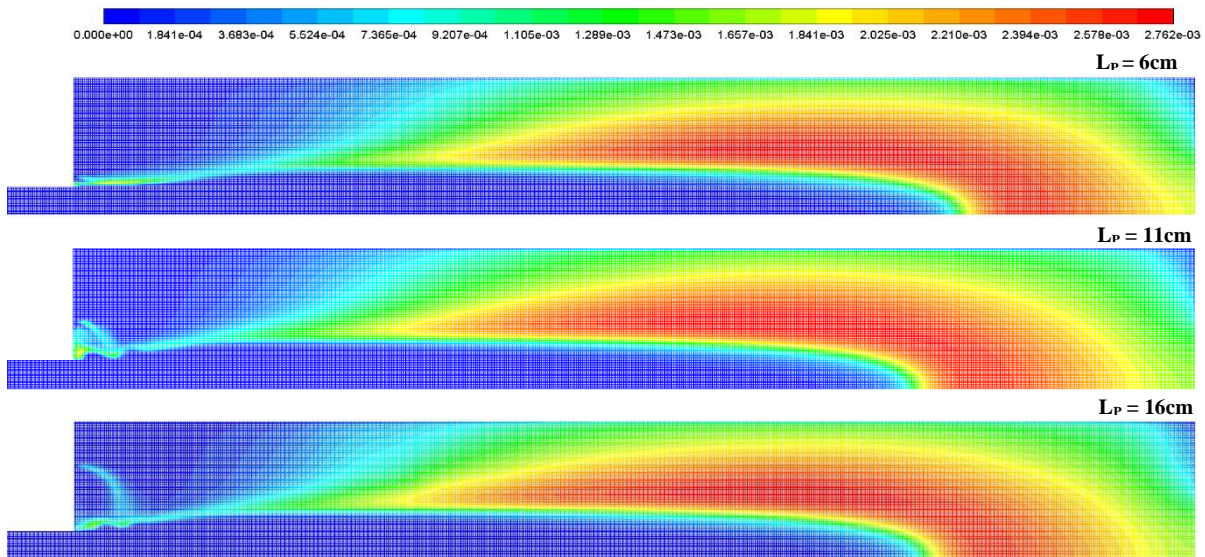


Figure 14- Comparison of OH mass fraction contours at constant equivalence ratio (ϕ) 0.9 and inhomogeneity length (L_r) 600mm and different pilot place (L_p)

شکل ۱۴- مقایسه کانتورهای کسر جرمی OH در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر ثابت و مکان‌های پیلوت (L_p) مختلف

در شکل ۱۵، اثر تغییر طول ناهمگنی برای نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. در این سه کانتور، با افزایش طول ناهمگنی از ۵۰ به ۳۲۰ میلی‌متر، در نسبت هم‌ارزی ۰/۹، شعله جدا شده و ارتفاع بلندشدگی کاهش یافته و سطح شعله افزایش داشته است. همچنین، طول شعله در طول ناهمگنی ۳۲۰ میلی‌متر کاهش یافته است. در طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر، مطابق با شکل ۱۰، شعله چسبیده و طول شعله نسبت به دو طول ناهمگنی ۵۰ و ۳۲۰ میلی‌متر بیشتر است. میزان کسر جرمی OH در طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر بیشتر از دو طول ناهمگنی دیگر است. در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ کانتورها مشابه کانتور زیر است.

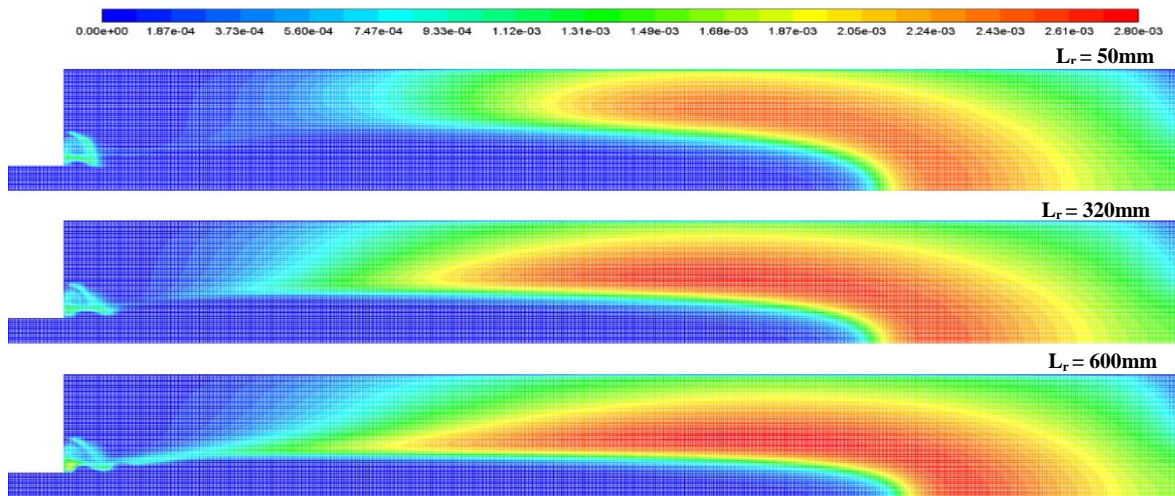


Figure 15- Comparison of OH mass fraction contours at constant equivalence ratio(ϕ) 0.9 and pilot place (L_p) 11cm with different inhomogeneity lengths(L_r)

شکل ۱۵- مقایسه کانتورهای کسر جرمی OH در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر با طول‌های ناهمگنی (L_r) مختلف همان‌طور که اشاره شد، اثر تغییر طول ناهمگنی در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ متفاوت از دو نسبت هم‌ارزی بررسی شده است. شکل ۱۶ اثر تغییر طول ناهمگنی در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ برای مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

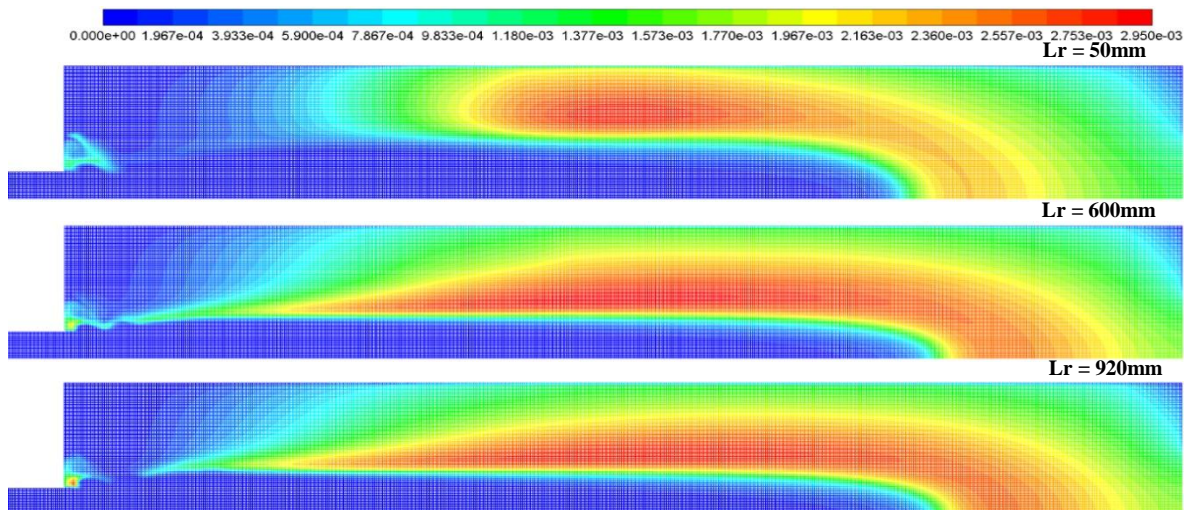


Figure 16- Comparison of OH mass fraction contours at constant equivalence ratio(ϕ) 1.1 and pilot place (L_p) 11cm with different inhomogeneity lengths (L_r)

شکل ۱۶- مقایسه کانتورهای کسر جرمی OH در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ و مکان پیلوت ۱۱ سانتی‌متر با طول‌های ناهمگنی (L_r) مختلف در شکل ۱۶، با افزایش طول ناهمگنی، ابتدا شعله می‌چسبد و با افزایش بیشتر طول ناهمگنی، شعله مجدداً جدا می‌شود. در این سه کانتور، شعله در حالتی که چسبیده است دارای بیشترین سطح است. در طول ناهمگنی ۵۰ و ۹۲۰ میلی‌متر، هر دو شعله جدا دارند، اما سطح شعله در طول ناهمگنی ۹۲۰ میلی‌متر بیشتر بوده و پایین شعله به صورت نوک تیز است. در طول ناهمگنی ۹۲۰ میلی‌متر که شعله جدا شده است، افزایش بیشتر طول ناهمگنی باعث تغییر در ارتفاع بلندشدگی نشد و این مقدار حدود ۱۸ سانتی‌متر است.

نتیجه‌گیری

- در مقاله حاضر، اثر تغییر مکان پیلوت در طول‌های مختلف ناهمگنی بر بلندشدگی شعله در محفظه احتراق به صورت عددی بررسی شد. این بررسی با فرض ثابت بودن تمام مشخصات پیلوت انجام شد. نتایج این تحقیق به شرح زیر است:
- در تمام حالات مورد بررسی، محدوده‌ای از طول‌های ناهمگنی یافت شد که در این طول‌ها شعله چسبیده بود.
 - براساس سه مکان مورد بررسی در دیوار جانبی برای مکان پیلوت و نتایج به دست آمده، پیلوتی که در محدوده وسط دیوار جانبی بود ارتفاع بلندشدگی کمتر و محدوده چسبیدن شعله بیشتری داشت. همچنین، حالتی که پیلوت در نزدیک‌ترین فاصله از ورودی اصلی قرار داشت، بیشترین ارتفاع بلندشدگی و کمترین محدوده چسبیدن شعله را داشت.
 - با شروع افزایش طول ناهمگنی از حالت غیرپیش مخلوط، ارتفاع بلندشدگی کاهش می‌یابد و با ادامه افزایش شیب روند کاهش ارتفاع بلندشدگی کاهش می‌یابد.
 - بیشترین ارتفاع بلندشدگی در حالت‌های مورد بررسی مربوط به طول ناهمگنی صفر در حالت غیرپیش مخلوط است.
 - در مکان‌های پیلوت بررسی شده، با افزایش نسبت هم‌ارزی، ارتفاع بلندشدگی کاهش یافت.
 - در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و ۰/۹ بعد از چسبیدن شعله، با ادامه افزایش طول ناهمگنی، شعله چسبیده باقی ماند.
 - در مکان پیلوت ثابت، بعد از چسبیدن شعله، با ادامه افزایش طول ناهمگنی، شعله در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ جدا شد و با ادامه افزایش طول ناهمگنی به مقدار ثابتی میل کرد.

منابع

1. J. C. Barnes and A. M. Mellor, "Effects of unmixedness in piloted lean premixed gas-turbine combustors," *Journal of Propulsion and Power*, 14, 1998, pp. 967-973.
2. T.-W. Lee, M. Fenton, R. Shankland, "Effects of Variable Partial Premixing on Turbulent Jet Flame Structure," *Combustion and Flame*, 109, Issue 4, 1997, pp. 536-548.
3. M. Mansour, "A Concentric Flow Conical Nozzle Burner for Highly Stabilized Partially Premixed Flames," *Combustion Science and Technology*, 152, No. 1, 2000, pp. 115-145.
4. B. RENOUE, E. SAMSON and A. BOUKHALFA, "an experimental study of freely propagating turbulent propane/air flames in stratified inhomogeneous mixtures," *Combustion Science and Technology*, 176, 2004, pp. 1867-1890.
5. A. X. Sengissen, A. V. Giaque, G. S. Staffebach, M. Porta, W. Krebs, P. Kaufmann and T. J. Poinot, "Large eddy simulation of piloting effects on turbulent swirling flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2007, pp. 1729-1736.
6. S. Meares, V. N. Prasad, G. Magnotti, R. S. Barlow and A. R. Masri, "Stabilization of piloted turbulent flames with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 2015, pp. 1477-1484.
7. F. Xiao, Y. Fujiang and G. Zhihui, "Combustion instability of pilot flame in a pilot bluff body stabilized combustor," *Chinese Journal of Aeronautics*, 28, No. 6, 2015, pp. 1606-1615.
8. K. Kleinheinz, T. Kubis, P. Trisjono, M. Bode and H. Pitsch, "Computational study of flame characteristics of a turbulent piloted jet burner with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, Issue 2, 2017, pp. 1747-1757.
9. B. A. Perry, M. E. Mueller and A. R. Masri, "A two mixture fraction flamelet model for large eddy simulation of turbulent flames with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, 2017, pp. 1767-1775.
10. T. F. Guiberti, M. Juddoo, D. A. Lacoste, M. J. Dunn, W. L. Roberts and A. R. Masri, "Fuel effects on the stability of turbulent flames with compositionally inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, 2017, pp. 1777-1784.
11. S. Galindo, F. Salehi, M. J. Cleary and A. R. Masri, "MMC-LES simulations of turbulent piloted flames with varying levels of inlet inhomogeneity," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, Issue 2, 2017, pp. 1759-1766.
12. M. S. Mansour, H. Pitsch, S. Kruse, M. F. Zayed, M. S. Senosy, M. Juddoo, J. Beekmann and A. R. Masri, "A concentric flow slot burner for stabilizing turbulent partially premixed inhomogeneous flames of gaseous fuels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91, 2018, pp. 214-229.
13. H. C. Cutcher, R. S. Barlow, G. Magnotti and A. R. Masri, "Turbulent flames with compositionally inhomogeneous inlets: Resolved measurements of scalar dissipation rates," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, Issue 2, 2017, pp. 1737-1745.
14. M. S. Mansour, H. Pitsch, S. Kruse, M. F. Zayed, M. S. Senosy, M. Juddoo, J. Beekmann and A. R. Masri, "A concentric flow slot burner for stabilizing turbulent partially premixed inhomogeneous flames of gaseous fuels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91, 2018, pp. 214-229.

15. N. Kim and Y. Kim, "Multi-environment probability density function approach for turbulent partially-premixed methane/air flame with inhomogeneous inlets," *Combustion and Flame*, 182, 2017, pp. 190-205.
16. W. Jin, S. A. Steinmetz, M. Juddoo, M. J. Dunn, Z. Huang and A. R. Masri, "Effects of shear inhomogeneities on the structure of turbulent premixed flames," *Combustion and Flame*, 208, 2019, pp. 63-78.
17. B. E. Van doormaal and G. D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows", *Numerical Heat Transfer*, 7, 1984, pp. 147-163.
18. K. Cheong, P. Li, F. Wang and J. Mi, "Emissions of NO and CO from counterflow combustion of CH₄ under MILD and oxyfuel conditions", *Energy*, 124, 2017, pp. 652-664.
19. R. S. Barlow, A. N. Karpetis and J. H. Frank, "Scalar Profiles and NO Formation in Laminar Opposed Flow Partially Premixed Methane/Air Flames," *Combustion and Flame*, 127, Issue 3, 2001, pp. 2102-2118.
20. C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner, Jr., V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenberg, "Gri2.11 Chemistry and thermodynamic files," http://www.me.berkeley.edu/gri_mech, Accessed 20 May 2020.
21. D. Garréton and O. Simonin, "Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces", *ASCF Ercoftac CFD Workshop*, EDF Org, Chatou, France, 1994.
22. C. V. Silva, F. H. R. França and H. A. Vielmo, "Analysis of the turbulent, non-premixed combustion of natural gas in a cylindrical chamber with and without thermal radiation," *Combustion Science and Technology*, 179, No. 8, 2007, pp. 1605-1630.
23. A. Jalalian and K. Mazaheri, "Comparison of some global chemical kinetics effects on methane lifted flame 3D simulation," *Modares Mechanical Engineering*, 17, No. 8, 2017, pp. 207-216. (in Persian)
24. C. V. da Silva, H. A. Vielmo and F. H. R. Franca, "Numerical Simulation of the Combustion of Methane and Air in a Cylindrical Chamber," *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, 2005.
25. X. Qin, I. K. Puri and S. K. Aggarwal. "Characteristics of lifted triple flames stabilized in the near field of a partially premixed axisymmetric jet," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, 2002, pp. 1565-1572.

English Abstract

Numerical study of the effect of pilot place on turbulent flame lift off with different levels of inhomogeneity in combustion chamber

H. Honardar¹ and S. A. Hashemi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, h.honardar@gmail.com

2- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, hashemi@kashanu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2020.06.09, Received in revised form: 2020.08.29, Accepted: 2020.09.19)

Combustion of a mixture of inhomogeneity reactants is a type of combustion in which the mixing of fuel and air is not complete. This study investigated the effect of the pilot location on the turbulent jet flame lift off height with different levels of inhomogeneity in the combustion chamber. The effect of different equivalence ratios has also been investigated. In this numerical study, the configuration modeling of Navier Stokes equations using Reynolds averaging method, standard k- ϵ turbulence and reactive flow modeling of Eddy Dissipation Concept (EDC) method have been used. Results show that the flame lift off height decreases with increasing inhomogeneity length and the flame attach during a certain inhomogeneity length, which depends on the equivalence ratio and pilot location. In all of the cases studied, a range of inhomogeneity lengths was found during which the flame was attached. The results show that the flame lift off height in non-premixed mode is higher than in the case where the fuel-air mixture ignites almost premixed in the chamber. The higher the equivalence ratio, the lower the flame lift off height. Based on the three locations studied in the side wall for the pilot location and the results obtained, the pilot in the middle area of the side wall had a lower flame lift off height and a higher attached flame range. Also, the flame area inside the chamber changes as the inhomogeneity changes.

Keywords: Pilot, Inhomogeneity, Turbulent combustion, Lift off height, Combustion chamber